

**PİM BAĞLANTILI TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDE
HASAR ANALİZİ**

Yük. Müh. Gurbet ÖRÇEN

**Doktora Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR
KASIM-2011**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİM BAĞLANTILI TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDE
HASAR ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Gurbet ÖRÇEN

(07220201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Ekim 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Kasım 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Aydın TURGUT (F.Ü)

Prof. Dr. Yusuf CALAYIR (F.Ü)

Doç. Dr. Şemsettin TEMİZ (İnönü Ü.)

Yrd. Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (F.Ü)

KASIM-2011

ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışmasında çalışmalarında yol gösteren, her türlü katkıyı sağlayan Tez Danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Mustafa GÜR' e sonsuz teşekkür eder, saygılar sunarım.

Bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve her konuda desteklerini gördüğüm Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Aydın TURGUT' a, Bölüm Başkanı Prof.Dr. Yaşar BİÇER' e ve İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı Öğretim üyesi Prof.Dr. Yusuf CALAYIR' a teşekkür eder, saygılar sunarım.

Çalışmamın her aşamasında ve bir yıl boyunca laboratuvar imkanlarından faydalanmam konusunda yardımcı olan, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Onur SAYMAN' a teşekkür eder, saygılar sunarım. Aynı zamanda ilgilerinden ve yardımlarından dolayı Sayın Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU' ya, Arş.Gör. Mustafa ÖZEN' e, Arş.Gör.Dr. Semih BENLİ' ye ve deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen tüm Öğretim Üye ve Elemanlarına teşekkür ederim.

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd.Doç.Dr. Mete Onur KAMAN' a, Sayın Yrd.Doç.Dr. M. Yavuz SOLMAZ' a, Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd.Doç.Dr. Kadir TURAN' a sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında gösterdiği ilgi ve destekten dolayı Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Doç.Dr. Orhan ÇAKIR' a teşekkür eder, saygılar sunarım. Aynı zamanda Mekanik Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Yrd.Doç.Dr. Tamer ÖZBEN' e ve bölümümüzün tüm Öğretim Üye ve Elemanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmayı (2021 nolu) maddi olarak destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve İzoreel A.Ş.' ne teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım süresince destekleri ile yanımda olan anneme, babama, abilerim Kadri, M.Ali, kardeşlerim Özlem, Cihan ve Elif' e sonsuz teşekkür ederim.

Gurbet ÖRÇEN
Elazığ/2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	XIX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	2
1.2. Kompozit Yapılarda Bağlantılar.....	17
1.2.1. Tabakalı kompozit malzemelerin birleştirilmesi.....	18
1.2.1.1. Mekanik bağlı bağlantılar	19
1.3. Deniz Araçlarında Kullanılan Kompozit Malzemeler.....	21
1.3.1. Teknelerde kullanılan elyaflar ve reçineler.....	27
1.3.2. Teknelerin üretim malzemeleri.....	30
1.4. Deniz Suyunun Özellikleri.....	32
1.5. Kompozit Malzemelerin Mekaniği.....	34
1.5.1. Kompozit malzemelerin gerilme analizi.....	35
1.5.1.1. Anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları.....	35
1.5.1.2. Ortotropik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları.....	37
1.5.1.3. Tabakalı kompozit malzemelerde gerilme analizi.....	44
1.6. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri	49
1.6.1. Maksimum gerilme teorisi	50
1.6.2. Maksimum şekil değiştirme teorisi	51
1.6.3. Tsai-Hill hasar kriteri	51
1.6.4. Tsai-Wu hasar kriteri	52
2. MATERYAL ve METOT.....	54
2.1. Problemin Tanımlanması.....	55
2.2. Kompozit Levhanın Hazırlanışı.....	56
2.2.1. Numunelerin hazırlanma aşamaları.....	57

2.3.	Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Tespiti.....	60
2.3.1.	Çekme mukavemetinin ölçülmesi.....	61
2.3.2.	Basma mukavemetinin ölçülmesi	63
2.3.3.	Kayma modülü ve mukavemetinin ölçülmesi	64
3.	BULGULAR.....	67
3.1.	İki Paralel Pim Bağlantılı Kompozit Levhalarda Deneysel Çalışma ve Sonuçları.....	67
3.1.1.	Deneysel sonuçlarda geometrik parametrelerin etkisi.....	67
3.1.1.1.	Kuru numunelerde geometrik parametrelerin hasar yüküne etkisi	67
3.1.1.2.	Deniz suyunda 3 ay bekletilen numunelerde geometrik parametrelerin hasar yüküne etkisi	76
3.1.1.3.	Deniz suyunda 6 ay bekletilen numunelerde geometrik parametrelerin hasar yüküne etkisi	83
3.1.2.	Deniz suyunun malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisi.....	91
3.1.2.1.	Deniz suyunun Poisson oranına etkisi	92
3.1.2.2.	Deniz suyunun malzemenin mukavemet değerleri üzerinde etkisi	93
3.1.2.3.	Deniz suyunun malzemenin modül değerleri üzerinde etkisi	96
3.1.3.	Deniz suyunun hasar yükleri üzerine etkisi.....	99
3.1.4.	Deniz suyunun hasar tipleri üzerine etkisi	114
3.1.5.	Hasar tiplerinin karşılaştırılması	149
3.2.	Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizinin Sayısal Çözümü.....	154
3.2.1.	Tabakalı kompozit malzemelerde hasar analizi.....	156
3.2.1.1.	Sonlu elemanlar modelinin hazırlanması.....	156
3.2.1.2.	Sayısal analiz çalışmasında sonlu eleman sayısı	160
3.2.2.	Pim bağlantılı tabakalı kompozitlerde ilerlemeli hasar analizi.....	163
3.2.3.	Pim bağlantılı kompozit levhalarda ilerlemeli hasar analizi sonuçları	165
3.2.3.1.	Kuru numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonuçları	167
3.2.3.2.	3 ay deniz suyunda bırakılan numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonuçları	176
3.2.3.3.	6 ay deniz suyunda bırakılan numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonuçları	185
3.2.4.	İlerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen hasar tipleri.....	194

3.2.5.	Sayısal sonuçlarda geometrik parametrelerin etkisi.....	197
3.2.5.1.	Sayısal sonuçlarda kuru numuneler üzerinde geometrik parametrelerin etkisi	198
3.2.5.2.	Sayısal sonuçlarda deniz suyunda 3 ay bekletilen numuneler üzerinde geometrik parametrelerin etkisi	205
3.2.5.3.	Sayısal sonuçlarda deniz suyunda 6 ay bekletilen numuneler üzerinde geometrik parametrelerin etkisi	213
3.3.	Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması.....	220
3.3.1.	Deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması	220
3.3.2.	Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar tiplerinin karşılaştırılması...	234
3.3.3.	Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar tiplerinin fotoğrafları	236
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	249
5.	ÖNERİLER.....	254
	KAYNAKLAR.....	255
	ÖZGEÇMİŞ.....	262

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, iki paralel pim bağlantılı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalarda, farklı çevre şartlarının, hasar tipleri, maksimum hasar yükleri ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu amaçla çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada kuru haldeki levhalar çekme testine tabi tutulmuştur. İkinci aşamada 3 ay ve üçüncü aşamada ise 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen levhalar çekme testine tabi tutularak kuru haldeki levha sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Değişik geometrik parametrelerdeki kompozit levhalar, hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Bu parametreler; levha üst kısmından delik merkezine olan mesafenin delik çapına oranı (E/D), iki delik merkezi arasındaki mesafenin delik çapına oranı (K/D), delik merkezinden levhanın uzun kenarı arasındaki mesafenin delik çapına oranı (M/D) ve levhanın genişliğinin delik çapına oranı (W/D) olarak belirlenmiştir. Çalışmada, E/D oranı; 2, 3, 4, 5, K/D oranı; 2, 3, 4, M/D oranı; 1, 2, 3, 4 ve W/D oranı; 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 olarak belirlenmiştir.

Sayısal çalışma, ANSYS 11.0 programında ilerlemeli hasar analizi metodu kullanılarak yapılmıştır. İlerlemeli hasar analizinde hasar kriteri olarak Tsai-Wu kriteri kullanılmış, hasar tipleri ve hasar yükleri elde edilmiştir.

Deniz suyu etkisindeki cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalarda, kuru haldeki kompozit levhalara nazaran, hasar yük değerlerinin ve mekanik özelliklerinin düştüğü, dolayısıyla mukavemetinin azaldığı yönünde bir etkinin olduğu ortaya çıkmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmada elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Pimli Bağlantı, Prepreg, Hasar Analizi, Deniz Suyu, Sonlu Elemanlar Metodu, Çevresel Şartlar, Mekanik Analiz, Tabakalı Kompozitler.

SUMMARY

Failure Analysis of Pinned Joint Laminated Composite Materials

The aim of study was to investigate the effects of different environmental conditions on the failure mode, maximum failure load and mechanical properties of two parallel pinned joint of glass fiber reinforced woven epoxy composite plates. Therefore, the study carried out in three stages. In the first stage, dry composite plates were exposed to tensile test. In the second stage, composite plates kept in sea water for 3 months and third stage composite plates kept in sea water for 6 months were exposed to tensile test. The obtained test results were compared with the dry composite plates.

For the different geometrical parameters of composite plates were investigated both experimentally and numerically. The edge distance-to-upper hole diameter (E/D), the two hole-to-hole centre diameter (K/D), the distance from the upper or the lower edge of the specimen to the centre of the hole-to-hole diameter (M/D), and the width of the specimen-to-hole diameter (W/D) ratios were selected as parameters. This study, E/D , K/D , M/D , W/D were determined from 2 to 5, 2 to 4, 1 to 4, and 4 to 12, respectively.

The numerical study was performed by using progressive failure analysis method with ANSYS 11.0 finite element program. Tsai-Wu failure criterion was used in the progressive failure analysis method and were obtained failure modes, failure loads.

The effect of sea water decreased of failure load values, and mechanical properties values of two parallel pinned joint of glass fiber reinforced woven epoxy composite plates. Therefore, it was resulted that the sea water reduced the strenght of composite plate. Experimental and numerical results of the study were found to be compatible with each other.

Key Words: Pinned Joint, Prepreg, Failure Analysis, Sea Water, Finite Element Method, Environmental Conditions, Mechanical Analysis, Laminated Composite.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tek yönlü takviyeli plaka	39
Şekil 1.2. Tabakalarda koordinat sisteminin gösterimi.....	42
Şekil 1.3. Plaka koordinat sistemi.....	45
Şekil 1.4. xz düzlemindeki deformasyonun geometrisi	45
Şekil 1.5. Düzlem plakaya etki eden kuvvetler.....	47
Şekil 1.6. Düzlem plakaya etki eden momentler.	48
Şekil 1.7. N tabakalı plakanın geometrisi.....	48
Şekil 2.1. İki paralel delikli kompozit levhanın geometrisi.....	55
Şekil 2.2. Pim bağlantıları için üç temel hasar tipi	56
Şekil 2.3. Cam fiber takviyeli dokuma epoksi prepreg kompozit levhayı oluşturan tabakalar.....	57
Şekil 2.4. Instron 1114 model çekme test cihazı.....	59
Şekil 2.5. İki paralel delikli pim bağlantılı numuneler için hazırlanan test aparatı.....	59
Şekil 2.6. Çekme testinde kullanılan aparat ve bağlantı şekli.....	60
Şekil 2.7. Çekme mukavemetinin bulunması için hazırlanan test numunesinin geometrisi.....	62
Şekil 2.8. Elastisite modülü ve Poisson oranının tespitinin yapıldığı test düzeneği.....	63
Şekil 2.9. Basma mukavemetinin bulunması için hazırlanan test numunesinin geometrisi.....	64
Şekil 2.10. Basma mukavemetinin bulunmasında numuneleri cihaza bağlamak için kullanılan yardımcı aparatlar.....	64
Şekil 2.11. Kayma testi için numune geometrisi	65
Şekil 2.12. Arcan test aparatları	65
Şekil 2.13. Strain indikatörü.....	66
Şekil 3.1. $M/D=1$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	68
Şekil 3.2. $M/D=2$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	69
Şekil 3.3. $M/D=3$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	70
Şekil 3.4. $M/D=4$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	70
Şekil 3.5. $E/D=2$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	71
Şekil 3.6. $E/D=3$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	72
Şekil 3.7. $E/D=4$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	73
Şekil 3.8. $E/D=5$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	73
Şekil 3.9. $K/D=2$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	74
Şekil 3.10. $K/D=3$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	75

Şekil 3.11. $K/D=4$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	75
Şekil 3.12. $M/D=1$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	76
Şekil 3.13. $M/D=2$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	77
Şekil 3.14. $M/D=3$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	78
Şekil 3.15. $M/D=4$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	78
Şekil 3.16. $E/D=2$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	79
Şekil 3.17. $E/D=3$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	80
Şekil 3.18. $E/D=4$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	80
Şekil 3.19. $E/D=5$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	81
Şekil 3.20. $K/D=2$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	82
Şekil 3.21. $K/D=3$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	82
Şekil 3.22. $K/D=4$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	83
Şekil 3.23. $M/D=1$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	84
Şekil 3.24. $M/D=2$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	85
Şekil 3.25. $M/D=3$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	85
Şekil 3.26. $M/D=4$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	86
Şekil 3.27. $E/D=2$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	87
Şekil 3.28. $E/D=3$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	87
Şekil 3.29. $E/D=4$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	88
Şekil 3.30. $E/D=5$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	89
Şekil 3.31. $K/D=2$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	90
Şekil 3.32. $K/D=3$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	90
Şekil 3.33. $K/D=4$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi.....	91
Şekil 3.34. Kuru halde ve deniz suyu içerisine konulan numunelerin Poisson oranı değerleri.....	92
Şekil 3.35. Deney sonrası elde edilen çekme mukavemet değerleri.....	94
Şekil 3.36. Deney sonrası elde edilen basma mukavemet değerleri.....	94
Şekil 3.37. Deney sonrası elde edilen kayma mukavemet değerleri.....	95
Şekil 3.38. Mukavemet değerleri açısından karşılaştırma.....	96
Şekil 3.39. Elastisite modül değerlerinin karşılaştırılması.....	97
Şekil 3.40. Kayma modül değerlerinin karşılaştırılması.....	98
Şekil 3.41. Malzemenin modül değerler açısından karşılaştırılması.....	99
Şekil 3.42. $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$ ve $E/D=2, 3, 4, 5$ numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	100
Şekil 3.43. $W/D=5$, $K/D=3$, $M/D=1$ ve $E/D=2, 3, 4, 5$ numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	102

Şekil 3.44. W/D=6, K/D=4, M/D=1 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	103
Şekil 3.45. W/D=6, K/D=2, M/D=2 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	104
Şekil 3.46. W/D=7, K/D=3, M/D=2 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	105
Şekil 3.47. W/D=8, K/D=4, M/D=2 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	106
Şekil 3.48. W/D=8, K/D=2, M/D=3 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	107
Şekil 3.49. W/D=9, K/D=3, M/D=3 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	109
Şekil 3.50. W/D=10, K/D=4, M/D=3 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	110
Şekil 3.51. W/D=10, K/D=2, M/D=4 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	111
Şekil 3.52. W/D=11, K/D=3, M/D=4 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	112
Şekil 3.53. W/D=12, K/D=4, M/D=4 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	113
Şekil 3.54. Kuru halde W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	114
Şekil 3.55. Kuru halde W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	115
Şekil 3.56. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları	115
Şekil 3.57. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10,15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği	115
Şekil 3.58. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	116
Şekil 3.59. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	116
Şekil 3.60. Kuru halde W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	117
Şekil 3.61. Kuru halde W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	117

Şekil 3.62. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	118
Şekil 3.63. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10,15, 20,25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	118
Şekil 3.64. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	119
Şekil 3.65. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	119
Şekil 3.66. Kuru halde W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10,15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	120
Şekil 3.67. Kuru halde W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10,15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	120
Şekil 3.68. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10,15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	121
Şekil 3.69. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10,15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	121
Şekil 3.70. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	122
Şekil 3.71. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10,15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	122
Şekil 3.72. Kuru halde W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	123
Şekil 3.73. Kuru halde W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	123
Şekil 3.74. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	124
Şekil 3.75. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	124
Şekil 3.76. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	125
Şekil 3.77. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	125
Şekil 3.78. Kuru halde W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	126
Şekil 3.79. Kuru halde W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	126

Şekil 3.80. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	127
Şekil 3.81. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	127
Şekil 3.82. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	128
Şekil 3.83. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	128
Şekil 3.84. Kuru halde W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	129
Şekil 3.85. Kuru halde W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	129
Şekil 3.86. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	130
Şekil 3.87. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	130
Şekil 3.88. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	131
Şekil 3.89. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	131
Şekil 3.90. Kuru halde W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	132
Şekil 3.91. Kuru halde W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	132
Şekil 3.92. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	133
Şekil 3.93. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	133
Şekil 3.94. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	134
Şekil 3.95. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiği.....	134
Şekil 3.96. Kuru halde W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	135
Şekil 3.97. Kuru halde W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm	

ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	135
Şekil 3.98. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	136
Şekil 3.99. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	136
Şekil 3.100. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	137
Şekil 3.101. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	137
Şekil 3.102. Kuru halde W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	138
Şekil 3.103. Kuru halde W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	138
Şekil 3.104. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	139
Şekil 3.105. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	139
Şekil 3.106. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	140
Şekil 3.107. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	140
Şekil 3.108. Kuru halde W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	141
Şekil 3.109. Kuru halde W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	141
Şekil 3.110. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	142
Şekil 3.111. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	142
Şekil 3.112. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	143
Şekil 3.113. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	143
Şekil 3.114. Kuru halde W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	144

Şekil 3.115. Kuru halde W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	144
Şekil 3.116. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	145
Şekil 3.117. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	145
Şekil 3.118. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	146
Şekil 3.119. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	146
Şekil 3.120. Kuru halde W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	147
Şekil 3.121. Kuru halde W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	147
Şekil 3.122. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları.....	148
Şekil 3.123. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	148
Şekil 3.124. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğraflar.....	149
Şekil 3.125. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği.....	149
Şekil 3.126. Hasar ilerleme algoritması	156
Şekil 3.127. Katı modelin sonlu elemanlara bölünmesi için kullanılan Shell 181 elemanı	158
Şekil 3.128. Kompozit levhanın sonlu elemanlara bölme işlemi.....	158
Şekil 3.129. Sonlu eleman modelinde levhaya radyal sınır şartı uygulanması.....	159
Şekil 3.130. Sonlu eleman modelinde levhanın sınır ve yükleme koşulları.....	159
Şekil 3.131. Pim ile plaka arasındaki bağlantının modellendiği üç farklı durum	160
Şekil 3.132. 100 MPa gerilme değeri ile yüklenme durumu için en büyük x yönündeki gerilmelerine karşılık eleman sayısı değişimi.....	161
Şekil 3.133. 100 MPa gerilme değeri ile yüklenme durumu için en büyük y yönündeki gerilmelerine karşılık eleman sayısı değişimi.....	161
Şekil 3.134. 100 MPa gerilme değeri ile yüklenme durumu için en büyük kayma gerilmelerine karşılık eleman sayısı değişimi.....	162
Şekil 3.135. Hasar durumu grafiğinde renkler.....	164

Şekil 3.136. W/D=4, K/D=2, M/D=1, E/D=2 boyutlarındaki kompozit levhada hasar başlangıcı ve ilerlemesi.....	166
Şekil 3.137. W/D=4, K/D=2, M/D=1 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları	167
Şekil 3.138. W/D=5, K/D=3, M/D=1 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	168
Şekil 3.139. W/D=30, K/D=4, M/D=1 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	169
Şekil 3.140. W/D=30, K/D=2, M/D=2 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	169
Şekil 3.141. W/D=7, K/D=3, M/D=2 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	170
Şekil 3.142. W/D=8, K/D=4, M/D=2 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	171
Şekil 3.143. W/D=8, K/D=2, M/D=3 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	172
Şekil 3.144. W/D=9, K/D=3, M/D=3 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	172
Şekil 3.145. W/D=10, K/D=4, M/D=3 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	173
Şekil 3.146. W/D=10, K/D=2, M/D=4 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	174
Şekil 3.147. W/D=11, K/D=3, M/D=4 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	175
Şekil 3.148. W/D=12, K/D=4, M/D=4 için ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	175
Şekil 3.149. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=4, K/D=2, M/D=1 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	176
Şekil 3.150. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=5, K/D=3, M/D=1 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	177
Şekil 3.151. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=6, K/D=4, M/D=1 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	178
Şekil 3.152. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=6, K/D=2, M/D=2 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	179
Şekil 3.153. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=7, K/D=3, M/D=2 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	179
Şekil 3.154. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=8, K/D=4, M/D=2 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	180
Şekil 3.155. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=8, K/D=2, M/D=3 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	181
Şekil 3.156. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=9, K/D=3, M/D=3 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	182
Şekil 3.157. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=10, K/D=4, M/D=3 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	182
Şekil 3.158. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=10, K/D=2, M/D=4 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	183
Şekil 3.159. 3 ay deniz suyunda bekletilen W/D=11, K/D=3, M/D=4 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	184

Şekil 3.160. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=12$, $K/D=4$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	185
Şekil 3.161. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	186
Şekil 3.162. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=5$, $K/D=3$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları	186
Şekil 3.163. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=6$, $K/D=4$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	187
Şekil 3.164. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=6$, $K/D=2$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	188
Şekil 3.165. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=7$, $K/D=3$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	189
Şekil 3.166. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=8$, $K/D=4$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	189
Şekil 3.167. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=8$, $K/D=2$, $M/D=3$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	190
Şekil 3.168. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=9$, $K/D=3$, $M/D=3$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	191
Şekil 3.169. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=10$, $K/D=4$, $M/D=3$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları	192
Şekil 3.170. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=10$, $K/D=2$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları	192
Şekil 3.171. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=11$, $K/D=3$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	193
Şekil 3.172. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=12$, $K/D=4$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları.....	194
Şekil 3.173. $M/D=1$ için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	198
Şekil 3.174. $M/D=2$ için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	199
Şekil 3.175. $M/D=3$ için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	200
Şekil 3.176. $M/D=4$ için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	200
Şekil 3.177. $E/D=2$ için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	201
Şekil 3.178. $E/D=3$ için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	202
Şekil 3.179. $E/D=4$ için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	202
Şekil 3.180. $E/D=5$ için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	203
Şekil 3.181. $K/D=2$ için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	204
Şekil 3.182. $K/D=3$ için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	204

Şekil 3.183. K/D=4 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	205
Şekil 3.184. M/D=1 için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	206
Şekil 3.185. M/D=2 için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	207
Şekil 3.186. M/D=3 için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	207
Şekil 3.187. M/D=4 için E/D oranının hasar yüküne etkisi.....	208
Şekil 3.188. E/D=2 için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	209
Şekil 3.189. E/D=3 için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	209
Şekil 3.190. E/D=4 için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	210
Şekil 3.191. E/D=5 için M/D oranının hasar yüküne etkisi.....	210
Şekil 3.192. K/D=2 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	211
Şekil 3.193. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	212
Şekil 3.194. K/D=4 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	212
Şekil 3.195. M/D=1 için E/D oranının etkisi.....	213
Şekil 3.196. M/D=2 için E/D oranının etkisi.....	214
Şekil 3.197. M/D=3 için E/D oranının etkisi.....	214
Şekil 3.198. M/D=4 için E/D oranının etkisi.....	215
Şekil 3.199. E/D=2 için M/D oranının etkisi.....	216
Şekil 3.200. E/D=3 için M/D oranının etkisi.....	216
Şekil 3.201. E/D=4 için M/D oranının etkisi.....	217
Şekil 3.202. E/D=5 için M/D oranının etkisi.....	217
Şekil 3.203. K/D=2 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	218
Şekil 3.204. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	219
Şekil 3.205. K/D=4 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi.....	219
Şekil 3.206. W=20 mm, K=10 mm ve M=5 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	221
Şekil 3.207. W=25 mm, K=15 mm ve M=5 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	222
Şekil 3.208. W=30 mm, K=20 mm ve M=5 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	223
Şekil 3.209. W=30 mm, K=10 mm ve M=10 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	224
Şekil 3.210. W=35 mm, K=15 mm ve M=10 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	225
Şekil 3.211. W=40 mm, K=20 mm ve M=10 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	226

Şekil 3.212. W=40 mm, K=10 mm ve M=15 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	227
Şekil 3.213. W=45 mm, K=15 mm ve M=15 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması	228
Şekil 3.214. W=50 mm, K=20 mm ve M=15 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	229
Şekil 3.215. W=50 mm, K=10 mm ve M=20 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	230
Şekil 3.216. W=55 mm, K=15 mm ve M=20 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	231
Şekil 3.217. W= 60 mm, K=20 mm ve M=20 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve nümerik olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	232
Şekil 3.218. M/D=1, E/D=2, K/D=2, W/D=4 için kuru numunelerin karşılaştırılması	237
Şekil 3.219. M/D=1, E/D=5, K/D=2, W/D=4 için kuru numunelerin karşılaştırılması.....	237
Şekil 3.220. M/D=1, E/D=2, K/D=2, W/D=4 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	238
Şekil 3.221. M/D=1, E/D=5, K/D=2, W/D=4 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	238
Şekil 3.222. M/D=1, E/D=2, K/D=2, W/D=4 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	239
Şekil 3.223. M/D=1, E/D=5, K/D=2, W/D=4 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	239
Şekil 3.224. M/D=2, E/D=2, K/D=4, W/D=8 için kuru numunelerin karşılaştırılması.....	240
Şekil 3.225. M/D=2, E/D=5, K/D=4, W/D=8 için kuru numunelerin karşılaştırılması.....	240
Şekil 3.226. M/D=2, E/D=2, K/D=4, W/D=8 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	241
Şekil 3.227. M/D=2, E/D=5, K/D=4, W/D=8 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	241
Şekil 3.228. M/D=2, E/D=2, K/D=4, W/D=8 için 6 ay deniz suyuna konulan numunelerin karşılaştırılması	242
Şekil 3.229. M/D=2, E/D=5, K/D=4, W/D=8 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	242
Şekil 3.230. M/D=3, E/D=2, K/D=4, W/D=10 için kuru numunelerin karşılaştırılması	243

Şekil 3.231. M/D=3, E/D=5, K/D=4, W/D=10 için kuru numunelerin karşılaştırılması	243
Şekil 3.232. M/D=3, E/D=2, K/D=4, W/D=10 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	244
Şekil 3.233. M/D=3, E/D=5, K/D=4, W/D=10 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	244
Şekil 3.234. M/D=3, E/D=2, K/D=4, W/D=10 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	245
Şekil 3.235. M/D=3, E/D=5, K/D=4, W/D=10 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	245
Şekil 3.236. M/D=4, E/D=2, K/D=4, W/D=12 için kuru numunelerin karşılaştırılması	246
Şekil 3.237. M/D=4, E/D=5, K/D=4, W/D=12 için kuru numunelerin karşılaştırılması	246
Şekil 3.238. M/D=4, E/D=2, K/D=4, W/D=12 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	247
Şekil 3.239. M/D=4, E/D=5, K/D=4, W/D=12 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	247
Şekil 3.240. M/D=4, E/D=2, K/D=4, W/D=12 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	248
Şekil 3.241. M/D=4, E/D=5, K/D=4, W/D=12 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması	248

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Vietnam savaşı ve II. Dünya Savaşı arasında deniz araçlarında kompozit uygulamaları.....	22
Tablo 1.2. Sıcaklık ve tuz konsantrasyonuna bağlı çözünen oksijen miktarı (mg/l).....	33
Tablo 2.1. ASTM standartlarına göre numune boyutları.....	61
Tablo 3.1. Deney sürelerine göre Poisson oranları.....	92
Tablo 3.2. Deney sonucunda elde edilen mukavemet değerleri.....	93
Tablo 3.3. Elde edilen modül değerler.....	96
Tablo 3.4. Cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit plakanın mekanik özellikleri.....	99
Tablo 3.5. Deniz suyunun hasar tiplerine etkisi.....	153
Tablo 3.6. Sayısal çözümde kullanılan modellerin sonlu eleman sayılarının geometrik parametrelere göre değişimi tablosu.....	162
Tablo 3.7. Hasar analizi sonucu ortaya çıkan hasar tiplerindeki renklerin anlamı	164
Tablo 3.8. ANSYS ilerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen hasar tipleri	196
Tablo 3.9. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen hasar yükleri.....	233
Tablo 3.10. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar tiplerinin karşılaştırılması	235

SEMBOLLER LİSTESİ

$[C_{ij}]$	: Rijitlik matrisi	-
D	: Pim ve pim deliği çapı	[mm]
E_{11}	: Fibere paralel doğrultuda Elastisite modülü	[MPa]
E_{22}	: Fibere dik doğrultuda Elastisite modülü	[MPa]
E	: Levha kenarı ile pim deliği merkezi arasındaki mesafe	[mm]
G_{12}	: Kayma modülü	[MPa]
L	: Levhanın boyu	[mm]
M_x	: Birim uzunlukta bileşke moment	[Nmm]
N_x	: Birim uzunlukta bileşke kuvvet	[N]
S_{12}	: Kayma gerilmesi	[MPa]
$[S_{ij}]$	: Elastiklik matrisi	
t	: Levha kalınlığı	[mm]
u, v, w	: x, y, z kartezyen koordinatlarındaki yer değiştirmeler	[mm]
u_0	: x doğrultusundaki eğim; x,y doğrultusundaki yer değiştirmeler	[mm]
ν	: Poisson oranı	-
V_f	: Fiber hacim oranı	[%]
Y_φ	: Fibere dik doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
Y_b	: Fibere dik doğrultuda basma mukavemeti	[MPa]
X_φ	: Fibere paralel doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
X_b	: Fibere paralel doğrultuda basma mukavemeti	[MPa]
W	: Levha genişliği	[mm]
ϵ_j	: Şekil değiştirme tansörü	-
$[Q_{ij}]$	: Düzlem gerilme halinde rijitlik matrisi	
θ	: Fiber takviye açısı	[°]

1. GİRİŞ

Kimyasal bileşenleri farklı, birbirleri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemeyi, kullanım şartlarına uygun duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak birleştirilerek oluşturulan malzemeler kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır.

Havacılık, uzay, savunma, otomotiv, deniz araçları ve birçok mühendislik uygulamaları gibi endüstrilerde hızlı teknolojik gelişim ve artan rekabet, yüksek performansa sahip ürünlerin tasarlanmasında, hafif ve mukavemeti yüksek malzemelere ihtiyacı gerekli kılmıştır. Kompozitler, özgül ağırlıklarının düşük olması, rijitlik, yüksek mekanik özellikler, yüksek kimyasal direnç, korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu gibi özellikleri nedeniyle metal malzemelerin yerine tercih edilmektedir. Özellikle havacılık ve uzay sanayinde kullanılmak üzere, metallerden daha hafif ve daha yüksek mukavemeti olan kompozit malzemeler tasarlanmakta ve üretilmektedir.

Kompozitler, uzun yıllardan beri birçok alanda kullanılmakla birlikte, deniz araçlarının yapımında da yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemeler ilk olarak askeri devriye botlarının yapımında kullanılmıştır. 1980' lerin ortalarından beri deniz araçlarının yapısal performansının iyileştirilmesi ve maliyetlerinin azaltılması için kompozit malzeme kullanımı artmıştır. Deniz araçları uygulamalarında kullanılan kompozitler nisbeten iyi mekanik özellikleri ve fiyatlarından dolayı kanolarda, balık ağlarında, petrol gemilerinde, gemi direklerinde, deniz altı kubbeleri gibi birçok ekipmanlarda kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda sıvı iletim boruları, kıyıda uzak delme platformlarının gaz işletim ve depolama sistemleri için de kullanılmaktadırlar. Deniz araçlarında kullanılan kompozit malzemelerden (uzun süre su içerisinde bulunduklarından dolayı) daha iyi mukavemet ve mekanik özellikler beklenmektedir. Bu nedenle deniz suyu ile temas halinde bulunan kompozitlerde meydana gelen hasar, bozulma nedenleri ve dayanımları gibi konuların araştırılması deniz araçları uygulamaları açısından önem taşımaktadır.

Uygulamalarda kompozit yapıların veya yapıları oluşturan kompozit bileşenlerinin yük transferini sağlıklı bir şekilde iletmesi önemlidir. Bu amaçla kompozit yapılar yapıştırma ve mekanik bağlantı şekli ile bir araya getirilmektedirler. Mekanik bağlanma elemanlarından biri pim olup, pim bağlantılarının yapıştırma bağlantısına göre çeşitli avantajları vardır. Pim bağlantılı birleştirmelerde yapıyı oluşturan elemanlar kolaylıkla

değiştirilebilir, ancak bu durum yapıştırma bağlantısı için oldukça zordur. Pim bağlantılı yapılarda; bağlantı için pim deliği açılması işlemi, deliklerin etrafında gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Bu gerilme yığılmaları kompozit yapının mukavemetini önemli ölçüde zayıflatmaktadır. Malzeme üzerine uygulanan yükleme arttırıldıkça gerilme yığılmalarının neden olduğu çatlaklar levhanın kenarlarına doğru hızla ilerleyerek hasara sebep olmaktadır. Bu hasarlar yırtılma (net-tension), ezilme (bearing), kesme (shear-out) hasarları olarak ortaya çıkmaktadır. Bu hasarların ortaya çıkmasında birçok parametre etkili olmaktadır.

1.1. Literatür Araştırması

Kompozitlerin tasarımı, yükleme koşulları ve kullanıldığı alanlar oldukça önemlidir. Kompozitlerin kullanım yerlerinde maruz kalacakları etkiler ve ortaya çıkacak sonuçlar deneysel çalışmalarla birlikte uygulama öncesinde nümerik bir çalışma ile test edilerek, gerçeğe uygulanmaktadır. Pim bağlantılı kompozit yapıların sonlu elemanlar modelinin hazırlanması ve analizi konusu birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Pim bağlantılı kompozit malzemelerde mekanik davranışların analizi ile ilgili olarak yapılan literatürdeki çalışmalar incelenerek aşağıda özetlenmiştir.

Chang ve arkadaşları [1], kompozit bağlantıların dayanımları üzerinde çalışmışlardır. Geliştirdikleri bir bilgisayar programını farklı oryantasyon açıları ve farklı fiber malzeme ile takviyelendirilmiş mekanik bağlantıların hasar tiplerini ve maksimum yüklemeyi hesaplamak için kullanmışlardır.

Chang ve arkadaşları [2], bir veya daha fazla delik içeren kompozit tabakanın boyutları için bir model geliştirmişlerdir. Aynı zamanda maksimum hasar yükünü hesaplamak için delik çapı, deliklerin sayısını, tabaka boyutunun nasıl olacağını incelemişlerdir. Çalışmalarında sonlu eleman metodunu kullanarak bir ve iki pim delikli levhada Yamada-Sun Hasar kriteri ile hasar tipleri ve hasar gerilmelerini hesaplamışlardır.

Chang ve arkadaşları [3], bir veya iki pimli fiber takviyeli kompozit plakalarda hasar modu ve hasar gerilmesi tahmini için bir metod sunmuşlardır. Bu metod iki adımı içermekte olup, ilk adımda tabakadaki gerilme dağılımı sonlu eleman metodu kullanılarak hesaplanmıştır. İkinci adımda ise Yamada-Sun hasar kriteri kullanılarak hasar yükleri ve hasar tipleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Farklı geometri, farklı oryantasyonlar ve farklı malzeme özellikleri ile plakanın hasar tipi ve maksimum yükleri bir bilgisayar programı

geliştirilerek hesaplanmıştır. Çalışmalarında T300/1034-C grafit/epoksi kompozit malzeme kullanılmış, iki boyutlu gerilme analizi yapılmış ve sonuçlar deneylerle karşılaştırılmıştır.

Chang and Chang [4], civata bağlantılı kompozit levhalar için hasar ilerleme modeli geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada üç çeşit hasar tipi tespit etmişlerdir. Bunlar; kopma, yırtılma ve civata baskısı sonucunda meydana gelen delik iç yüzeylerindeki ezilmedir. Deneysel incelemeler sonucunda levhanın kopmasının ve yırtılmasının iki boyutlu olduğu, ezilme şeklinin ise üç boyutlu olduğu belirtilmiştir. Çalışmalarında ilk iki hasar türü incelenmiştir.

Camanho ve Matthews [5], pim ve civata bağlantılı kompozit levhalar üzerinde yaptıkları çalışmalarında elde ettikleri sonuçları şöyle özetlemişlerdir; pim bağlantılı levhalar için yapılan analizlerde sürtünmenin, pim-delik arasındaki boşluğun ve temas yüzeyinin dikkate alınmasının ve yatak gerilmesinin üç boyutlu analizler ile hesaplanmasının gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

Oh. J. ve arkadaşları [6], tarafından çekme yüklemesi altında cam-epoksi ve karbon-epoksi birleşiminden oluşan hibrid kompozit malzemeler için en uygun civatalı/pimli bağlantılar araştırılmıştır. Pim bağlantıları için göz önüne alınan dizayn parametreleri, tabakalandırma açısı, tabaka dizilimi, cam-epoksi, karbon-epoksi oranı, rondelanın dış çapı ve kelepçe basıncı olarak belirtilmiştir. Numunelerdeki kırılma yüzeylerinin incelenmesinde, deliklerin yüklenen dış kenarı üzerinde ve rondela yoluyla zorlanan kenar bölge üzerinde yoğun hasar olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, hibrid kompozit malzemelerin tabakalar arası dizilimini değerlendirmek için, civatalı bağlantıların üç boyutlu gerilme analizi, sonlu eleman programı kullanılarak yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Wu ve Hahn [7], VARTM yoluyla üretilen E-cam/vinylester kompozitin dayanım gerilmelerini araştırmışlardır. VARTM yoluyla farklı dokuma ve tabakalı iki cam kompozit üretilmiştir. Çalışma analitik ve deneysel olarak yapılmış olup, deneysel bölümde kompozitlerin yatak hasar davranışları tespit edilmiştir. Geometrik parametrelerin etkileri, hasar modları ve yatak gerilmeleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan E/D oranı ve tabaka kalınlığının dayanım gerilmesine etkisinin büyük olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan W/D oranı yoluyla hasar modu belirlenmiştir. Deneysel ve analitik veriler karşılaştırılmıştır.

Aktaş [8], pim bağlantılı karbon-epoksi kompozitlerde hasar analizini incelemiştir. Çalışmada, farklı doğrultulara sahip, delikli bir karbon epoksi kompozit plakanın yırtılma

mukavemeti ve yırtılma modu incelenmiştir. Plakanın uç kısmının ve genişliğinin deliğin çapına oranı sırasıyla 1-5 ve 2-4 olarak değiştirilmiştir. Plakanın deliği rijit bir pim yardımıyla değişken yayılı yüke maruz bırakılmıştır. Yırtılma mukavemeti ve tipi nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Nümerik hesaplamada sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. İki boyutlu dört düğümlü bir izoparametrik sonlu eleman seçilerek, sonlu eleman modeli ve yırtılma analizi geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir. Çalışmada Tsai-Hill ve Fiber Tensile-Compressive yırtılma kriteri kullanılmış.

Aktaş ve arkadaşları [9], mekanik bağlantılı karbon fiber takviyeli epoksi kompozit plakanın hasar analizini araştırmışlardır. Deneysel ve sayısal olarak yapılan çalışmada plakanın hasar yükleri ve hasar tipleri incelenmiştir.

Camanho ve Matthews [10], tarafından mekanik bağlantılı karbon fiber takviyeli plastiklerin dayanımlarını ve hasar ilerlemelerini belirlemek için üç boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Analizlerde Hashin' in üç boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır. Hasar ilerleme modellemesinde, kompozit malzemenin Elastisite ve Kayma modülü, kompozit malzemede oluşan hasarın ilerleme durumuna göre sonlu eleman analizlerinde azaltılarak uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli ABAQUS yazılımı ile oluşturulmuştur.

Tong [11], üniform olmayan rondela-cıvata açıklığı ile pim bağlantılı kompozitlerin yatak hasarını incelemiştir. Çalışmasında çeşitli yanal kısıtlamalar ile cıvata bağlantılı kompozitlerin yatak hasar davranışları üzerinde rondela ve civatanın göreceli durumlarının etkisini araştırmıştır. Cıvata deliği ile rondela açıklığının pozitif ve negatif durumu ile uygun çap durumlarına ait iki durumu göz önüne almıştır. Deneysel sonuçlar, başlangıç hasar yüklemelerinin göreceli duruma etki edebildiğini ancak son yükleme durumunun etki etmediğini göstermiştir.

Dano ve arkadaşları [12], kompozit plakalardaki mekanik bağlantılı birleştirmelerde hasar ve gerilme analizi yapmışlardır. Çalışmalarında pim bağlantılı kompozit plakaların davranışını tespit etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Model, lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisini, büyük deformasyon teorisini, ilerleyen hasar ve pim-delik ara yüzeyindeki kontak önemini kapsamaktadır. İlerleyen hasarın tahmini için, analizde Hashin ve Maksimum Hasar Kriteri kullanılmış. Çalışmalarında hasar kriteri, yük-pim yer değiştirme eğrisi ve dayanım üzerinde lineer olmayan kayma davranışlarının etkili olduğunu belirlemişlerdir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin lineer olduğu zaman Hashin kriterinden ziyade hasar kriteri olarak Maksimum

Gerilme Kriterinin kullanımının daha gerçekçi sonuçlar verdiğini, lineer olmadığında ise farklı hasar analizlerindeki sonuçların birbirine yaklaştıkları belirtilmiştir. Oluşturdukları bu model ile pim bağlantılı tabakalı kompozitlerin hasar gerilmelerinin tespiti için verimli olduğu belirtilmiştir.

Okutan ve arkadaşları [13], pim bağlantılı dokuma cam fiber takviyeli epoksi tabakaların hasar gerilmeleri üzerinde çeşitli geometrik parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Cam/epoksi kompozitler üretilerek pim yoluyla yükleme yapılmıştır. Tek delikli pim yüklemeli numuneler E/D, W/D oranlarını değerlendirmek için çekme testine tabi tutulmuştur. Numuneler üzerinde çatlak ilerlemesi ve hasar tipleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, W ve E boyutlarının artması ile pim bağlantılı dokuma cam fiber takviyeli epoksi tabakaların en son yükleme kapasitelerinin arttığını göstermişlerdir.

McCarthy ve arkadaşları [14], tarafından cıvata/pim bağlantılı kompozitlerin gerilim ve sertlikleri üzerinde cıvata-delik açıklığının etkileri araştırılmış. Konfigrasyon olarak tek cıvata/pim olarak seçilmiş, gerilme kriteri ve cıvata-delik açıklık etkileri incelenmiştir.

İçten ve Karakuzu [15], pim yüklemeli karbon-epoksi dokuma kompozit tabakalarda ilerleyen hasar analizini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, rastgele diziliimli pim bağlantılı karbon-epoksi kompozit tabakanın hasar modu ve hasar gerilmeleri ile ilgili araştırma sunulmuştur. Çalışmalarında, standart testler ile ölçülmüş malzemenin özelliklerinden bağlantının özelliklerinin tespiti yapılmıştır. Farklı geometriler, farklı malzeme özellikleri, farklı fiber diziliimli tabakanın hasarının ilerlemesi, hasar modu ve hasar yükünü hesaplamak için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Hasar analizinde Hashin ve Hoffman hasar kriteri kullanılmıştır. E/D ve W/D oranları arttıkça zaman dayanım gerilmesinin en yüksek değere ulaştığı, E/D oranı 4 ve 5 olduğu zaman dayanım gerilmesi birbirine yakın ve hasar modu ezilme olarak tespit edilmiştir. E/D=1 olduğunda dayanım mukavemeti küçük ve hasar modu kesme veya yırtılma, W/D=2 olduğunda genellikle hasar modunun yırtılma olduğu belirtilmiştir. W/D oranının artarken hasar modu kesme veya ezilme olarak değiştiği belirtilmiştir.

Okutan [16], çalışmasında tek delikli pim bağlantılı E-cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerde hasar gerilmeleri üzerinde geometrik parametrelerin etkisini, deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalar $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ ve $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ diziliimli tabakalı kompozit numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelerin mekanik özellikleri ve gerilmelerini deneysel olarak elde etmiştir. Deneysel sonuçlar, bir sonlu eleman programı

yardımla hesaplanan numerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. E/D oranı 1’den 5’e ve W/D oranı 2’den 5’e kadar değişik değerler için hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, pim bağlantılı kompozit plakalarda tabaka dizilimi ve kompozitlerin geometrisinin önemli olduğu belirtilmiştir.

Whitworth ve arkadaşları [17], tarafından pim bağlantılı kompozitlerde hasar analizi yapılmıştır. Analiz; delik bağlantısı etrafında gerilme dağılımını değerlendirmek için iki boyutlu sonlu eleman analizi ve Chang-Scott-Springer karakteristik eğri modeli kullanımını içermektedir. Yamada-Sun hasar kriteri kullanılarak, hasar bağlantıları değerlendirilmiştir.

Okutan ve Karakuzu [18], tabakalı kompozitlerde pim bağlantılarının gerilmelerini incelemişlerdir. Çalışmada, iki farklı dizilime sahip E-cam/Epoksi kompozitler üzerinde çekme testi uygulaması yapılmıştır. Her dizilim oryantasyonu için 20 farklı geometri seçilmiştir. İlk ve son hasarı oluşturan yüklemeyi bulmak için testler yapılmış ve hasar modları elde edilmiştir. Sonlu eleman yöntemi ile sayısal analizi de yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

İçten ve Sayman [19], pim yüklemeli alüminyum-cam-epoksi sandviç kompozit plakaların hasar analizini yapmışlardır. Çalışmalarında, bir pim yoluyla yüklenilmiş, dairesel delikli alüminyum-cam-epoksi sandviç kompozit plakada hasar modu ve hasar yüklemelerini araştırmışlardır. Hasar modu ve hasar gerilmeleri üzerinde fiber oryantasyonu ve bağlanma geometrisinin etkisini değerlendirmek için parametrik çalışmalar deneysel olarak uygulanmıştır. Plakanın E/D ve W/D oranları sırasıyla 1’den 5’e ve 2’den 5’e değiştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, E/D ve W/D oranlarının artması ile ilk hasar yüklemesi ve son hasar yüklemesinin arttığını göstermiştir. Aynı zamanda deneysel sonuçlar, bu oranların 4’e eşit veya 4’den büyük olması halinde numunelerin tamamının yataklama gerilmesi içerdiğini göstermiştir.

Kelly ve Hallström [20], tarafından mekanik bağlanan bağlantıların yatak gerilme dizaynına göre civata- delik açıklığının etkisi araştırılmıştır. Çalışma, karbon fiber/epoksi tabakaların dayanım gerilmelerinde civata-delik açıklığının etkisi incelenmiştir. W/D, E/D, t/D oranlarının dayanım gerilmesi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Üç boyutlu lineer olmayan sonlu eleman modeli, deliğe bitişik tabakalardaki gerilme alanı üzerinde civata-delik etkilerini araştırmak için kullanılmıştır.

Aktaş ve Dirikolu [21, 22], pim bağlantılı karbon-epoksi plakaların gerilme karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ ve

[90°/45°/-45°/0°]_s dizilimli pim bağlantılı karbon epoksi kompozit plakaların dayanımları araştırılmıştır. Deneyler ASTM D953 standardına göre sayısal analiz ise sonlu eleman metodu ile yapılmıştır. E/D, W/D oranları sistematik olarak analiz sırasında değiştirilmiştir. Analiz sonuçları [0°/45°/-45°/90°]_s dizilimine sahip numunelerde ezilme hasar tipinin ortaya çıktığı, ikinci dizilime sahip numunelerde birinci dizilime göre daha güçlü olduğu ve sonuç olarak; her iki dizilime sahip numunelerde E/D, W/D oranlarının 4' e eşit veya 4' den büyük olduğu zaman dayanım gerilmelerinin en yüksek limitte olduğu belirtilmiştir.

Xiao ve Ishikawa [23, 24], cıvata/pim bağlantılı kompozitlerin hasar davranışları ve yatak gerilmelerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, karbon fiber takviyeli plastik içerikli polimerin iki farklı tipi seçilmiş ve dayanımları üzerinde reçine özelliklerinin etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca cıvata/pim bağlantılı kompozitin hasar davranışı ve yatak gerilmelerini belirlemek için sayısal modelleme yapılmıştır. Cıvata/pim bağlantılı kompozitin karakteristiklerinin cevaplanması ve yatak hasarlarının simülasyonu için bir analitik model geliştirmişlerdir. ABAQUS, sonlu eleman kullanımı ile model yapılmıştır. Analitik model, liner olmayan malzeme davranışı, deformasyon, ilerleyen hasar ve pim/delik sınırlarında temas koşulları göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Çalışmada, hasar kriteri olarak Hashin ve Yamada-Sun kriterleri kullanılmıştır.

Camanho ve Lambert [25], çalışmalarında tabakalı kompozitlerde mekanik bağlantıların hasar modu, son hasar, hasar başlangıcını tahmin etmek için bir dizayn metodolojisi sunmuşlardır. Her plakadaki gerilme dağılımı sayısal metot kullanılarak elde edilmiştir. Bağlantıların elastik sınırı, hasar kriterine göre gerilme dağılımları ve tabaka mukavemeti kullanılarak tahmin edilmiştir. Son hasar ve hasar tipi ise ortalama gerilme modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu metodun tek eksenli veya çift eksenli yükleme altında pim veya cıvata bağlantılarında uygulanabileceği belirtilmiştir.

Karakuzu ve arkadaşları [26], tarafından pim bağlantılı cam/vinyilester kompozit tabakalarda hasar analizi yapılmıştır. Çalışmada rijit pim tarafından çekme yüküne bağlı dairesel delikli cam-vinyilester kompozit plakanın hasar yükleri, hasar modları ve dayanım gerilmeleri incelenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmada, hasar analizi olarak Hashin kriteri kullanılmıştır.

Khashaba ve arkadaşları [27], kompozit yapılarda civatalı eklemlerin performansı üzerinde rondela boyutu ve sıkma torku etkisini araştırmışlardır. Çalışmada cam fiber takviyeli epoksi (Glass Fiber Reinforced Epoxy:GFRE) kompozitler kullanılmış.

Çalışmada tabakalar $[0^\circ/\mp 45^\circ/90^\circ]_s$ dizilimli, sıkma torku 0, 5, 10, 15 Nm, rondela dış çapı 14, 18, 22, 27 mm parametreleri olarak seçilmiştir. Çalışma hem deneysel hem sayısal olarak yapılmıştır.

İçten ve arkadaşları [28], pim bağlantılı dokuma kevlar fiber takviyeli epoksi kompozitlerin hasar analizini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Araştırma, mekanik bağlantılı dokuma kevlar epoksi kompozit plakaların hasar yükü ve hasar modunu belirlemek için yapılmıştır. Bağlantıların gerilmesini, hasar başlangıcını ve ilerlemesini tahmin etmek için iki boyutlu sonlu eleman kodu geliştirilmiştir. Hasar analizi içinde Hashin, Hoffman, Maksimum Gerilme kriteri kullanılmıştır. Deneyler hasar modu ve hasar yüklemelerini bulmak için yapılmıştır. Aynı zamanda analizde bağlanma geometrisinin etkileri değerlendirilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak, uyumlu oldukları gösterilmiştir.

Karakuzu ve arkadaşları [29], iki paralel dairesel delikli tabakalı cam/vinylester kompozit plakalardaki hasar yüklerini, dayanım gerilmelerini ve hasar modlarını araştırmışlar. Dairesel delikler iki rijit pim tarafından çekme kuvveti etkisindedir. Plakanın davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. E/D, M/D, K/D oranları değişim parametresi olarak seçilmiştir. Nümerik çalışma sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılmış, hasar modu ve hasar yükleri Hashin hasar kriteri kullanılarak LUSAS 13.6 programı ile belirlenmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir.

Şen ve arkadaşları [30], cam fiber takviyeli epoksi tabakalı kompozit plakalarda cıvatalı bağlantıların yatak gerilmeleri ve hasar modlarını belirlemek için bir hasar araştırması yapmışlardır. E/D ve W/D olmak üzere iki farklı geometrik parametre göz önüne alınmıştır. Bu amaçla E/D oranı 1'den 5'e, W/D oranı ise 2'den 5'e seçilmiştir. Tabakalı plakalar, malzeme parametrelerinin etkisini belirlediğinden dolayı, simetrik olarak $[0^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ]_s$, $[0^\circ/0^\circ/45^\circ/45^\circ]_s$ ve $[0^\circ/0^\circ/30^\circ/30^\circ]_s$ üç farklı dizilimde seçilmiştir. Çalışmanın asıl amacı çeşitli ön gerilmeler altında hasar değişimlerini gözlemlemek olduğundan, ön yükleme momentleri 0, 3 ve 6 Nm olarak uygulanmıştır. Deneyler aynı zamanda, cıvatanın çapı ve cıvata deliği sırasıyla 5 ve 6 mm olduğundan dolayı, bir açıklık altında yapılmıştır. Sonuçlar hasar modları ve yatak gerilmelerinin önyüklemelerin artması yoluyla etkilendiği göz önüne sermiştir. Aynı zamanda cıvata bağlantılı kompozitin malzeme ve geometrik parametreleri değiştiği zaman, hasar davranışları ve yatak gerilmesi değerlerinin tamamen etkilendiği gösterilmiştir.

Whitworth ve arkadaşları [31], pim bağlantılı kompozitlerde hasar gerilmelerini belirlemek için yaptıkları çalışmalarında AS4/3501-6 Grafit/Epoksi kompozit tabakalar kullanmışlardır. Yatak gerilmeleri W/D ve E/D parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Delik etrafındaki gerilme dağılımını belirlemek için 2 boyutlu gerilme analizinde Yamada-Sun hasar kriteri kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu kanıtlanmıştır.

Karakuzu ve arkadaşları [32], seri iki pim tarafından yüklü tabakalı kompozit plakaların hasar davranışını incelemiştir. Çalışmalarında, deneysel ve sayısal olarak seri iki pim bağlantılı dokuma-cam-vinylester kompozit plakalarda hasar modları ve hasar yükleri üzerinde M/D, W/D, E/D gibi geometrik parametrelerin etkilerini araştırmışlardır. Sayısal çalışmalarında hasar modları ve hasar yüklerini belirlemek için Hashin Hasar Kriteri kullanılmıştır. Analiz LUSAS sonlu eleman programı ile yapılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar, E/D, W/D, M/D oranlarının artması ile pim bağlantılı dokuma cam-vinylester tabakaların en son yükleme kapasitelerinde artış olduğunu göstermiştir.

Thoppul ve arkadaşları [33], tarafından polimer matriks kompozit yapılarda çözülebilir bağlantıların mekaniği hakkında bir araştırma makalesi sunulmuştur. Literatürde yapılan çalışmalar, mekanik testler için standartlar, mekanik dizayn şartları, hasar modları, pim ve cıvata bağlantılarında çevresel etkiler vb. konularda yapılan inceleme sonuçları aktarılmıştır.

Aluko ve Whitworth [34], tarafından pim bağlantılı kompozitlerde gerilme dağılımlarını değerlendirmek için bir analiz yapılmıştır. Çalışmalarında karbon fiber takviyeli plastik levhaların mekanik özellikleri kullanılmış ve gerilme dağılımlarının analizi için sürtünme katsayısı 0.0, 0.2 ve 0.4 olarak alınmıştır. Yapılan analizde delik etrafındaki gerilme dağılımında, sürtünme katsayı değerlerinin artması ile maksimum gerilmelerin değiştiği ortaya çıkmıştır.

Ataş ve arkadaşları [35], iki rijit pim yardımıyla çekme testine tabi tutulmuş, iki paralel delikli cam-polyester kompozit plakanın hasar tipleri ve hasar yüklerini elde etmek için çalışma yapmışlardır. Kompozit plakada pim yükleme davranışları deneysel ve nümerik olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Kishore ve arkadaşları [36], çoklu pim bağlantılı cam fiber epoksi kompozit tabakaların hasar yükleri ve hasar tiplerini araştırmışlardır. Üç ve dört pim bağlantılı olarak yapılan çalışmada geometrik parametre olarak E/D, P/D (pim deliği merkezi arasındaki mesafenin delik çapına oranı), S/D (pim deliği merkezinin yanal kenara olan mesafesinin

delik çapına oranı) oranları seçilmiştir. Sayısal alışmada Tsai-Wu Hasar Kriteri kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlarda hasar modlarının benzer olduğu, %10'dan daha az bir değerle elde edildiği belirtilmiştir. P/D oranı 6' a eşit veya büyük olduğunda hasar ilerlemesinin olmadığı ancak 6' dan küçük olduğunda hem  hem de dört delikli pim bağlantısında hasarın yayıldığı tespit edilmiştir. S/D, E/D oranlarının yüksek olması ile hasar tipinin ezilme olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir.

Ataş [37], küçük dokuma açıları ile oluşturulmuş pim bağlantılı dokuma kompozitlerin yatak gerilmeleri üzerine deneysel çalışma yapmıştır. Dört farklı dizilime sahip plakada, geometrik boyutlar W/D=3,4 ve E/D=1, 2, 3 olarak seçilmiştir. Aynı oryantasyonlara sahip, küçük açılarla oluşturulmuş pim bağlantılı dokuma kompozitlerde küçük yük taşıma kapasitelerinin ve istenmeyen hasar tiplerinin elde edildiği belirtilmiştir.

Kıral [38], pim bağlantılarında hasar karakterleri üzerinde pim çapı ve plaka geometrisinin etkisini anlamak amacıyla deneysel ve sayısal çalışma yapmıştır. Çalışma tek delikli pim bağlantılı cam fiber epoksi kompozit plakada, E/D, W/D parametreleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik alışmada ANSYS kullanılarak üç boyutlu sonlu eleman modeli yaratılmıştır. E/D ve W/D' nin farklı oranlarında temas ve açıklık etkisini belirlemek için lineer olmayan kontak analiz yapılmıştır. Aynı zamanda elektron mikroskobu kullanılarak hasarlar incelenmiştir. Yapılan çalışmalarla dayanım gerilmesi, hasar yükleri ve hasar modu tahmin edilmiştir. Bütün pim yüklemeli konfigrasyonlarda temaslı bağlantının daha faydalı olduğu belirtilmiştir.

Karakuzu ve arkadaşları [39],  pim bağlantılı $[0^{\circ}/90^{\circ}/\mp 45^{\circ}]_s$ dizilimli cam-epoksi tabakalı kompozit plakaların hasar davranışları üzerinde delik etkisini incelemişlerdir. Üç farklı delik mesafelerinde parametreler E/D=1, 2, 3, 4, 5, F/D= 2, 4, 6, G/D=3, 4, 5 olarak seçilmiş ve bunların hasar modu ve hasar yükleri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada birinci ve ikinci deliğin hasar modları bütün numunelerde aynı olmasına rağmen zaman zaman üçüncü delikte hasar modunda farklılıklara rastlanmıştır. E/D=1 olan numunelerde birinci ve ikinci delikte yapılarda pek istenmeyen kesme, diğer numunelerde ise ezilme hasar tipi oluştuğu belirtilmiştir.

Bazı araştırmacılar da deniz araçlarında kullanılan kompozit malzemeler üzerinde çevresel etkileri incelemişlerdir.

Haque ve arkadaşları [40], kevlar 49/epoxy, grafit/epoxy, tek fiber ve kevlar 49-grafit/epoxy hibrit kompozitlerin çekme özellikleri üzerinde sıcaklık ve nem etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışmada; değişen

hidrotermal şartlarda malzeme üzerinde çekme gerilmesi, Elastisite modülü, Poisson oranındaki değişimler sunulmuştur.

Davies ve arkadaşları [41], cam takviyeli kompozitlerin deniz suyu içerisinde hasar davranışları ve hasar modellenmesi ile ilgili araştırma yapmışlardır. Çalışmada $[0^\circ/90^\circ]$ dizilimli cam fiber takviyeli kompozitlerin ve bunların dört matriks reçinesinin ıslak yaşlandırma deney sonuçları sunulmuştur. Reçineler ve kompozitler; 18 ay boyunca; 20 °C deniz suyunda, 50 °C deniz suyu ve 50 °C arıtma suyun içerisinde bırakılmıştır. Çekme testleri yaşlandırmadan önce ve sonra yapılmıştır. Matriks özelliklerinde bozulma ve ağırlık değişimi, reçinenin ise yaşlandırma sonucu özellikleri değerlendirilmiştir.

Gellert ve Turley [42], deniz uygulamaları için cam fiber takviyeli polimer tabakalı kompozit plakaların deniz suyu içerisinde yaşlanma etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmalarında matriks reçine ile kaplanmış dört tabakalı cam fiber takviyeli polimer (Glass Reinforced Polymer: GRP) malzemeler, laboratuvar şartlarında hazırlanan deniz suyu içerisinde yaşlandırılmaya bırakılmıştır. Yükleme etkisi altında temiz reçine kalıplaması ve polyester, fenolik, vinylester GRP için su alma davranışları karşılaştırılmıştır. Ayrıca GRP için kaybedilen mekanik özellikler belirlenmiştir. Fenolik GRP’ de hem ara yüzeyde hem de matriksde su emilimi ile ilgili düzensiz su alma davranışları ortaya çıkmıştır. Polyester ve vinylester tabakaları tarafından alınan suyun, başlangıçta fiber taşıyıcı etkisinden baskı yoluyla etkilendiği daha sonra da ara yüzey etkilerinin artmalarından ortaya çıktığı belirlenmiştir. Eğilme gerilmesinin fenolik GRP için %25 kadar, su ile doymuş vinylester GRP ve polyester için %15-21’ e kadar düştüğü görülmüştür. Suda kalma yoluyla yalnızca fenolik tabakalardaki bozulma şiddetlenirken, en son gerilmenin %20’si yüklenmiş ve gerilmedeki kayıp ilerlemesinin %36 olduğu görülmüştür. Tabakalar arası kayma gerilmelerinin, tamamen doymuş GRP’ ler için %12 ile %21 arasında değişen oranlarda düştüğü görülmüştür.

Mouritz ve arkadaşları [43], denizaltı ve gemilerde kullanılan kompozit yapılar hakkında bir çalışma yapmışlardır. Fiber takviyeli polimer kompozitlerin gemilerde ve denizaltı uygulamalarında kullanımları anlatılmıştır. Geleneksel gemi yapım malzemelerinin yerine kullanılan kompozit malzemelerden elde edilen yararlar her uygulama alanı için belirtilmiştir. Çalışmada gemiler ve denizaltılar için kompozit yapıların gelişmesindeki son ilerlemeler ele alınmıştır.

Wu ve arkadaşları [44], tarafından E-cam/vinylester kompozit üzerinde deniz suyunun kısa süreli etkileri incelenmiştir. İyonsızlaştırılmış yapay deniz suyuna konulan E-

cam/vinylester kompozitin mekanik tepkileri karakterize edilmiştir. Deniz suyu etkisinin çekme performansına etkisi incelenmiştir.

Kootsookos ve Mouritz [45], cam ve karbon polimer kompozitlerinin deniz suyuna dayanıklılıklarını araştırmışlardır. Cam ve karbon fiber ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin dayanımları üzerinde deniz suyunun etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deniz yapılarında kullanılan karbon/vinylester, cam/vinylester, karbon/polyester, cam/polyester malzemeleri deneysel çalışmada kullanılmış. İki yılı aşkın bir süre içerisinde 30°C’ deki deniz suyuna konulan bu kompozitlerde önemli ölçüde nem emiliminin gerçekleştiği, reçine matriks ve fiber matriks bölgelerinin bozulduğu gözlenmiştir. Çalışmada yeni nesil karbon/polyester ve karbon/vinylester’ den yapılan deniz kompozitlere karşı cam/vinylester ve cam/polyesterden yapılan geleneksel deniz kompozit malzemelerin deniz suyuna dayanım özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmalarında polyester esaslı kompozitlerin deniz suyundaki kimyasal dayanımlarının vinylester esaslı kompozitlerden daha az olduğu görülmüştür. Vinylester esaslı kompozitlerde bazı kimyasal bozulmalar oluşmuş ancak bu bozulma polyester matriks tabakalarında görüldenden bir derece daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Vinylester esaslı kompozitlerin eğilme özellikleri çok iyi dayanıma sahip olmasına rağmen, bozulmaları polyester malzemelerin özellikleri ile benzer durumda olduğu görülmüştür. Ayrıca cam fiber ile takviyelendirilmiş kompozitlerin karbon fiber kompozitlerinden daha fazla nem absorbe ettiği tespit edilmiştir.

Mouritz ve arkadaşları [46], polyester ve vinylester içerikli kompozitlerin deniz suyuna dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışmada, cam ve karbon fiber kompozitlerin deniz suyunda dayanımları karşılaştırılmıştır.

Gu ve Hongxia [47], cam/polyester kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde su emiliminin etkisini incelemişlerdir. Doymamış polyester ve cam fiber kullanılarak VARI tekniği ile tabakalar oluşturulmuştur. Kompozitler çeşitli periyodlar için yaklaşık 30°C sıcaklıkta suya konulduktan sonra, numuneler çekme testine tabii tutularak, hasar modları gözlenmiştir. Kompozitlerin suya konulup çıkarıldıktan sonra deneylerde uygulanan çekme gerilmesinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Kolat ve arkadaşları [48], denizlerde kullanılan bazı sandviç sistemlerin çatlak arayüzeyleri üzerine maruz kalan deniz suyunun etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında tahta, kontrplak, poliüretan gibi çeşitli çekirdek malzemeleri içeren sandviç sistemlerin kırılma tokluğunu deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında tahta, kontrplak ve

poliüretan gibi çekirdek malzemeler ile oluşan bu sistemlerin kırılma tokluğunun çok düşük olduğu ancak hasır şekli ile yapılmış bu sistemlerin kırılma tokluğunun oldukça yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca deniz suyunun kırılma sertliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Maurin ve arkadaşları [49], düşük stren yayan reçinelerin deniz suyunda yaşlanmaları ve bunların mekanik davranışları üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında vinylester reçineler ve standart polyesterler ile beraber, düşük stren içeren polyester ve onların cam ile takviyelendirilmiş kompozitlerin mekanik özellikleri ıslak yaşlandırma uygulaması ile belirlenmiştir. Çalışma; 20°, 40°, 60°C sıcaklıklarda dokuz ay için doğal deniz suyu içinde yaşlanma süreleri irdelenmiş ve sunulmuştur. Düşük stren içeren reçinelerin standart reçinelerden daha yavaş gerilim kaybına sahip oldukları ancak dokuz ay sonra benzer kayıpların olduğu tespit edilmiştir.

Gu ve Hongxia [50], su emiliminden sonra cam/polyester kompozitlerin tabakalar halindeki dizilim davranışlarını incelenmişlerdir. Çalışmada; doymamış polyester matriks ve takviye olarak da dokuma kumaş halinde cam fiber kullanılmıştır. İki tabaka olarak yapılan üretim, VARI metodu ile yapılmıştır. Numuneler 7, 14, 21 günü içeren çeşitli periyotlar için su içerisine konulmuştur. Çevresel sıcaklık su uygulaması boyunca yaklaşık 29°C olarak korunmuştur. Numuneler sudan çıkarıldıktan sonra tabakalardaki özellikler incelenmiştir. Cam/polyester kompozitin suya konulduğunda malzemenin kütle ağırlığının arttığını ancak su emilim zamanının uzaması ile su içinde çözölen ve ayrılan bazı elementlerden dolayı, kütle ağırlığının azaldığını tespit etmişlerdir.

Gu [51], deniz suyu uygulamasına konulan cam/polyester kompozitlerin dinamik mekanik analizlerini incelemiştir. Cam fiber takviyeli doymamış polyester matriks kompozitler VARI tekniği ile dört tabakalı olarak üretilip, numuneler çeşitli periyotlar için deniz suyu uygulamasına konulmuştur. Deniz suyunda kalma zamanının artması ile çekme gerilmesi eğiliminin azaldığını tespit etmiştir. Dinamik mekanik analiz tekniği ile deniz suyuna konulan numunelerin matriks ve ara yüzey bozulmasını araştırmıştır.

Siriruk ve arkadaşları [52], polimer köpükler ve sandviç kompozitlerin, mekanik özellikleri ve çevresel etkiler ile ilgili çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında düşük yoğunluklu PVC köpük ve karbon fiber takviyeli vinylester reçine kompozit yüzeylerinde deniz suyu etkisiyle mekanik özelliklerindeki bozulmalar araştırılmıştır.

Silva ve arkadaşları [53], tarafından sentetik fiber (E-cam) ve doğal fiber (curaua) oluşumu bir hibrid kompozit geliştirilmiştir. Bu kompozit üzerinde su emiliminden dolayı

mekanik özelliklerinin bozulması değerlendirilmiştir. Kompozit numuneler dokuz ay süresinde hem deniz suyunda hem de damıtma suyunda bekletilmiştir. Süre sonunda doyma eğrilerini oluşturarak, üç nokta eğme ve çekme testleri sonucuna göre mekanik özellikleri değerlendirmişlerdir. Mekanik testlerden sonra test edilen numunelerin kırılma karakteristiklerini elde etmişlerdir.

Aktaş ve Uzun [54], pim bağlantılı cam fiber kompozit malzemeler üzerinde deniz suyu etkisini araştırmışlardır. Çalışmada dokuma cam fiber kompozitlerin dayanım gerilme davranışları üzerinde deniz suyu etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler boyunca E/D ve W/D sistematik olarak değiştirilmiş. Deney numuneleri 1, 2, 4 aylık periyotlarda deniz suyuna konulmuştur. Hasar modları bütün konfigrasyonlarda aynı olarak elde edilmiştir.

Gu [55], doymamış cam fiber polyester kompozitlerin deniz suyu içerisindeki davranışlarını incelemiştir. Cam fiber takviyeli doymamış polyester tabakalar VARI tekniği ile üretilerek, çeşitli periyotlar arasında deniz suyunun içerisine bırakılmıştır. Çalışmada deniz suyunun cam fiber takviyeli kompozitler üzerindeki bozulma etkisi, çekme dayanımı incelenmiştir.

Aldajah ve arkadaşları [56], musluk suyu ve deniz suyunun cam fiber takviyeli polimer matriks kompozit tabakaların dayanımları üzerindeki etkisini incelemişler. Çalışmalarında sekiz tabakalı antisimetrik ve simetrik dizilime sahip cam fiber takviyeli polimer matriks tabakaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde deniz suyu ve musluk suyunun etkisini araştırmışlardır. Tabakaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimini değerlendirmek için üç noktalı eğilme test metodu ve elektron mikroskobu (SEM) taraması metodu kullanılmış. 2000 saat için deniz suyuna ve musluk suyuna maruz kalan tabakalardaki etkiler incelenmiştir.

Murthy ve arkadaşları [57], tarafından cam/epoksi, cam/vinylester, karbon/epoksi ve karbon/vinylester kompozitlerin deniz suyu içerisindeki dayanımları araştırılmıştır. Deniz suyunun çekme gerilmesi, kayma gerilmesi gibi mekanik özellikler ve su alma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Kanlıoğlu [58], çevre koşullarının pim bağlantılı kompozit plakaların hasar davranışına etkisini araştırmıştır. Çalışmada, deniz suyunun cam epoksi dokunmuş tabakalı kompozitlerin yatak gerilme davranışları üzerindeki etkisini incelemiştir. Numunenin uç kısmının delik çapına oranı ve genişliğin delik çapına oranı deneyler süresince sistematik olarak değiştirilmiştir. Çalışmada, numunenin uç kısmının delik çapına oranı 1'den 5'e

kadar, genişliğinin delik çapına oranı ise 3 ve 4 olarak seçilmiştir. Numune plakasının deliği bir pim yardımıyla değişken yayılı yüke maruz bırakılmıştır. Numunelerin hasar tipleri ve maksimum hasar yükleri deneysel olarak bulunmuş. Deneysel çalışma cam lifi-epoksi kompozitin içerisine deniz suyunu emmesi için 1, 3, 6, 9 aylık süreler için, deniz suyu içerisinde tutulmuş ve her periyod için hasar tipleri ve maksimum hasar yükleri elde edilmiştir.

Gören ve Sayman [59], ön gerilme altında kompozit plakaların nem ve sıcaklığın etkisi ile civatalı bağlantılardaki hasar analizini araştırmışlardır. Çalışma, ön yüklemeli momentler altında civatalı cam fiber takviyeli tabakalardaki deneysel araştırmaları içermektedir. Kompozit tabakalar $[90^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/-30^{\circ}]_s$ olarak seçilmiştir. Gerilmeler ve hasar modları üzerinde ön gerilme momentlerinin etkisini karşılaştırmak için, ön gerilme momentleri 2, 4, 6 Nm olarak seçilmiştir. Bazı numuneler 7 gün için 70 °C’ de saf sıcak suyun içerisine konulmuş ve ön gerilme momentleri altında dayanım kuvvetleri ölçülmüştür. Sıcak su içerisinde bekletilen numunelerin dayanım gerilmelerinin kuru şartlardaki numunelere göre %5.4’ ten daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Karakuzu ve arkadaşları [60], tarafından dört pim tarafından yüklenmiş cam-epoksi plakalarda hasar davranışlarını belirlemek için deneysel çalışma yapılmıştır. $[0^{\circ}/90^{\circ}/\mp 45^{\circ}]_s$ dizilimli plakada geometrik parametre olarak E/D=2, 3, 4, F/D=2, 4, 6 ve G/D=2, 4, 6, 8 olarak seçilmiştir (F/D boyuna delikler arasındaki mesafenin delik çapına oranı ve G/D ise enine delikler arasındaki mesafenin delik çapına oranıdır). E/D=2 hariç diğer numunelerdeki hasar yük ve tiplerinin benzer olduğu belirtilmiştir.

Kaptı ve arkadaşları [61], farklı şartlar altında pim bağlantılı karbon-epoksi tabakalı kompozitlerde sayısal ve deneysel olarak hasar analizini incelemişlerdir. Çalışmalarında pim bağlantılı karbon-epoksi tabakalarda nem ve ön yüklemeli moment etkilerinin hasar modu ve dayanım gerilmesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel olarak E/D ve W/D iki farklı geometrik parametre göz önüne alınmıştır. E/D oranı 1’den 4’e, W/D oranı ise 2’den 4’e değişken olarak seçilmiştir. Test sonuçları önyüklemeli moment yoluyla hasar yüklemelerini direkt etkilediğini göstermiştir. Ayrıca test sonuçları, ıslak numunelerin ön yüklemesiz yapılan testlerdeki hasar yüklerinin aynı kalırken, ön yüklemeli numunelerin hasar yüklerini arttırdığını göstermiştir. ANSYS kullanılarak numunelerin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. İlk hasar yüklerini belirlemek için Tsai-Wu Hasar Kriteri kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Özen ve Sayman [62], iki seri delikli pim ve civatalı kompozitlerde hasar yüklemelerini araştırmışlardır. Çalışmalarında; iki seri rijit pim tarafından çekme yüküne tabi tutulan cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit prepreglerin; dayanım gerilme davranışları ve ilk hasar yükleri deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneyler E/D, K/D, W/D parametreleri esas alınarak yapılmıştır. İlk hasar yükleri için sayısal ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda deneysel araştırmalar deniz suyu ve ön yüklemeli momentlerin, bağlantıların dayanım gerilmesi üzerindeki etkisini görmek için ortaya konulmuştur. Bu amaç için numuneler su emilimi olmaksızın 3 ve 6 Nm önyüklemeli moment altında test edilmiştir. Diğer numuneler 24 saat süre ile deniz suyu içerisine konulmuştur. Daha sonra aynı deneyler su emilimi olan numuneler için de uygulanmıştır. Önyükleme momenti olmaksızın deniz suyu içerisine konulan test numunelerinin hasar yüklerinde bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Önyüklemeli momentler altındaki test numuneleri, emilim olmayan test numuneleri gibi hemen hemen aynı dayanım gerilmesini gösterdikleri belirtilmiştir.

Karakuzu ve arkadaşları [63], $[0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ]_s$ dizilimli cam epoksi tabakalı kompozit plakanın hasar davranışı üzerinde delik etkisini araştırmışlardır. Üretilen tabakalı kompozit plakada üç pim deliği yer almaktadır. Üç pim deliği arasındaki mesafeler farklı alınmış ve bunların hasar tipi ve hasar yükleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Parametreler (E/D=1, 2, 3, 4, 5), (F/D=2, 4, 6) ve (G/D= 3, 4, 5) olarak seçilmiştir. E/D=1 için birinci ve ikinci delikte yapılarda istenmeyen hasar tipi olan kesmenin (shear-out) meydana geldiği ancak diğer numunelerde ezilme (bearing) hasar tipinin olduğu belirtilmiştir.

Karakuzu ve İçten [64], dört pim delikli cam-epoksi tabakalı kompozit levhanın hasar davranışları üzerinde çalışma yapmışlar. $[0^\circ/90^\circ/\mp 45^\circ]_s$ dizilimli kompozit plakanın hasar tipi ve hasar yükü deneysel olarak araştırılmıştır. E/D, F/D ve G/D oranları sırasıyla 2, 3, 4; 2, 4, 6 ve 2, 4, 6, 8 olarak seçilmiştir. Yapılan çalışmada; E/D=2 olan numuneler hariç diğer tüm numunelerin hasar tipleri ve hasar yüklerinin benzer davranışlar gösterdiği belirtilmiştir.

Totry ve arkadaşları [65], tarafından karbon fiber takviyeli epoksi kompozit plakalarda ASTM standartlarına göre düzlem içi kayma davranışları üzerinde fiber, matriks ve ara yüzey özelliklerinin etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada pim bağlantılı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar üzerinde çevre koşullarının etkisi hem deneysel hem de sayısal olarak çeşitli parametrelerde incelenmiştir. Bu parametreler; plaka üst kısmından delik merkezine olan

mesafenin delik çapına oranı (E/D), iki delik merkezi arasındaki mesafenin delik çapına oranı (K/D), delik merkezinden plakanın uzun kenarı arasındaki mesafenin delik çapına oranı (M/D) ve plakanın genişliğinin delik çapına oranı (W/D) olarak belirlenmiştir. Deneysel alışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada belirli geometrik parametrelerde üretilen plakalar kuru halde çekme testine tabi tutulmuşlardır. İkinci aşamada üç ay süre ile deniz suyunda bekletilen numuneler süre bitiminde aynı teste tabi tutulmuştur. Üçüncü aşamada ise altı ay süre ile deniz suyunda bekletilen numuneler süre bitiminde çekme testine tabi tutulmuştur. Aynı zamanda her üç aşamada malzemenin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Sayısal çalışmada ise numunelerin sonlu eleman modelleri ANSYS 11.0 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ANSYS programında, ilerlemeli hasar analizi metodu kullanılmıştır. Hasar analizinde, hasar kriteri olarak Tsai-Wu kriteri kullanılmıştır. Sayısal alışma da; deneysel çalışmada olduğu gibi her üç aşama için yapılmıştır.

Çalışmada; cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar üzerinde, deniz suyunun malzemenin mekanik özellikleri, maksimum hasar yükleri ve hasar tipleri üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

1.2. Kompozit Yapılarda Bağlantılar

Geleneksel metal yapılara göre kompozit malzemeler birçok avantajlarından dolayı değişik alanlarda kullanılmaktadırlar. Bu uygulamalarda, yüklerin transferi, taşınması ve artırılması gibi görevler üstlenmektedir. Kompozit yapılarda değişik bağlantı şekilleri mevcuttur.

Bağlantıların amacı, yapılarda elemanların birinden diğerine yük transferini sağlamaktır. Fiber takviyeli kompozit yapılarda bağlantı dizaynının özel bir öneme sahip olmasının iki nedeni vardır. Bunlar kompozit malzemelerin sünek metallerin karakteristik özelliklerini taşınamaması ve kompozit yapıda bağlantıların genellikle en zayıf alanda yapılmasıdır [66].

Bu kısımda tabakalı kompozit malzemelerin bağlantı biçimleri kısaca anlatılmaktadır.

1.2.1. Tabakalı kompozit malzemelerin birleştirilmesi

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki farklı malzemeden oluşmaktadırlar. Tabakalı kompozit malzemelerin, metalik malzemelere göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Tabakalı kompozit malzeme üzerine etki eden yükleri farklı katmanlarında sahip olduğu farklı takviye açılarından dolayı daha kolay taşır.
- Bağlı olarak düşük bir tokluk değerine sahiptirler.
- Farklı tabaka dizilimleri ile gerilme yığılmalarına karşı oldukça mukavemetlidirler.
- Korozyona karşı dayanıklıdır.
- Isı, elektrik ve ses yalıtımı için uygun malzemelerdir.
- Isı iletim katsayıları düşüktür [67].

Kompozit malzemelerin yapı veya makine elemanlarından bir konstrüksiyon oluşturmak için bu elemanların birbirlerine bağlanmaları gereklidir. Bu bağlanma işlemi birleştirme olarak gerçekleşmektedir. Yapılardaki birleştirmelerin çoğu, kompozit-kompozit arasında veya kompozit-metal malzemeler arasında olabilmektedir. Yapıların veya elemanların birleştirme işlemlerinde, hasar kaynağı ve üretim probleminin bir nedeni olarak ağırlığın yaratacağı hasardan dolayı dizayn işleminde bunlardan kaçınmak zorunludur. Ancak yapıların onarılması veya yeniden denetlenmesi ihtiyacı, ulaşım veya üretimdeki güvenilirlik, malzeme boyutu üzerindeki sınırlamalardan dolayı mutlaka (ya da çoğunlukla) konstrüksiyonlar elemanların birleştirilmelerinden oluşmaktadır.

Temel olarak kompozit malzemelerde bağlantının iki türü vardır [68]. Tabakalı kompozitler için temel bağlantılar ya mekanik ya da yapıştırma bağlantıdır. Mekanik bağlantılar cıvata, perçin veya pim elemanı yardımıyla, yapıştırma bağlantıları ise yapıştırıcı kullanımıyla gerçekleştirilir [66].

1-Yapıştırırmalı bağlantılar: Bu bağlantı türünde üretim sırasında bağlantı şekli yoluyla veya uygun yapıştırma ile ön hazırlık aşamasından geçirilmiş tabakalar ile beraber yapıştırma yapılır. Bu bağlantıda deliğe gerek yoktur, yapıştırma yapıya fazla ağırlık katmaz, sıcaklık, nem ve diğer çevre şartlarından etkilenebilir. Bu bağlantı türünde bağlantı kalitesini kontrol etmek oldukça zordur [66].

2-Mekanik bağlı bağlantılar: Bu çalışmada mekanik bağlı bağlantı biçimi kullanıldığından dolayı bu bağlantı türü hakkında aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

1.2.1.1. Mekanik bağlı bağlantılar

Bu bağlantılarda, kontrol veya bakım/onarımı için bağlantının kaldırılması gerekebilir. Birçok araştırmacı; hasar tipleri üzerinde rondela, sürtünme, bağlantı tipi, tabaka dizilimi vb. etkilerini araştırmak için çoğunlukla tek yönlü prepreg malzemeden üretilmiş kompozit tabakalar için bağlantı davranışını incelemişlerdir [68].

Mekanik bağlı bağlantılar çoğunlukla pim, perçin ve cıvata vb. elemanlar yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bu bağlantı tipinde temel olarak çekme, kopma, yırtılma hasarı (net-tension), kayma-kesme hasarı (shear-out) ve ezilme-yatak hasarı (bearing) olmak üzere üç çeşit hasar tipi vardır.

Bu bağlantılarda yırtılma (net-tension) ve kesme (shear-out) istenmeyen hasar tipleridirler [26, 28, 68]. Ayrıca mekanik bağlantıların avantaj ve dezavantajları da aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Mekanik bağlantıların avantajları;

- Mekanik bağlantılarda; mekanik bağlantı şekli yapının kolaylıkla montaj ve demontajına imkan tanımaktadır. Bu özelliğinden dolayı hasar gören parçalar rahatlıkla yenisiyle değiştirilebilmektedir.
- Mekanik bağlantılar ortam sıcaklığının aşırı yükselmesinden veya düşmesinden çok fazla etkilenmezler.
- Mekanik bağlantılarda yüzeyin hazırlanmasına gerek yoktur. Mekanik bağlantıda bağlantının kalitesini kontrol etmek kolaydır.
- Birleştirme işlemi hızlı olarak ve çok fazla teknik bilgi gerektirmeden yapılabilir.
- İşçiliği ve uygulama malzemeleri oldukça ucuz ve yaygındır.

Mekanik bağlantıların dezavantajları;

- Bağlantı elemanı yapıya ek bir ağırlık katmaktadır.
- Bağlantı elemanı korozyon problemi yaratabilmektedir.
- Bağlantı için yapı üzerinde delik açılmasıdır. Metallerde delik etrafında oluşan gerilme yığılması malzemenin sünek yapısından dolayı lokal plastik gerilmeye neden olmakta bu da statik yüklemde önemli bir durum teşkil etmemektedir. Ancak takviyeli kompozit levhaların bağlantısında ise malzemenin gevrek ve anizotropik olmasından dolayı delik civarındaki gerilme yığılması yapının mukavemetini ciddi şekilde azaltmaktadır.

- Ulaşılması güç olan tamirat gerektirmeyecek yerlerde kullanılması maliyeti yükseltmektedir [66].

Mekanik (çözülebilir) bağlantılı kompozit levhalarda oluşması muhtemel hasar tipleri Şekil 2.2’ de verilmiştir. Bu hasar tipleri çeşitli parametrelere bağlı olarak açıklanmaktadır. Bu parametrelerden;

a) Kompozit malzeme bileşenlerinin etkisi: Takviye malzemesinin türü ve yapısı (tekyönlü, örgülü, kırılmış, rastgele dağılımlı vb.), reçine tipi, fiber oryantasyonu, tabaka dizilimi vb.

b) Bağlantı parametrelerinin etkisi: Bağlantı tipi, bağlantı boyutu, delik büyüklüğü ve toleransları, rondela boyutu vb.

c) Geometrik parametrelerin etkisi: Plaka genişliği (W), plaka genişliğinin delik çapına oranı (W/D), kenar mesafesi (E), bağlantı elemanının montajının yapılacağı deliğin plakanın kısa kenarına olan mesafesinin oranı (E/D), plaka uzunluğu ve plaka kalınlığı, delik çapı.

d) Dizayn (tasarım) tipinin etkisi: Yükleme tipi, yükleme yönü, bağlantı tipi, geometrisi (delik, kenar mesafesi vb.), farklı bağlantı elemanları kullanılmış olması (civata, perçin veya pim), çekme, basma veya kayma zorlanmaları, yayılı yükleme, moment etkisi gibi konstrüktif zorunluluklardan kaynaklanan etkiler, çevre ve hasar kriterleri [69].

Bunlara ek olarak, pim bağlantılı numunelerin gerilmelerini tahmin etmek için statik gerilmeler tanımlanmaktadır. Bu gerilmeler aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

Yırtılma gerilmesi (Net-tension);

$$(\sigma_t)_{\max} = \frac{P_{\max}}{(W - D).t}$$

Ezilme gerilmesi (Bearing);

$$(\sigma_b)_{\max} = \frac{P_{\max}}{D.t}$$

Kayma/Kesme gerilmesi (Shear-out);

$$(\tau_s)_{\max} = \frac{P_{\max}}{2.E.t}$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu eşitliklerde, $P_{\max}$ levhanın maksimum hasar yükü, W levha genişliği, D delik çapı, t ise levha kalınlığını, E ise delik kenar mesafesini belirtmektedir [69].

Mekanik bağlantı uygulamalarında temel üç hasar tipi görülmektedir. Güvenli bir tasarım açısından; ezilme hasarı, kesme ve yırtılma hasarından ziyade daha çok istenen bir hasar tipidir. Bununla birlikte E/D ve W/D oranları çok büyük olmadıkça, bir ezilme hasarı nadiren elde edilmektedir. Eğer $E/D > 3$ ve $W/D > 6$ dan kaçınılması halinde ise yırtılma ve kesme hasarı oluşmaktadır [66].

1.3. Deniz Araçlarında Kullanılan Kompozit Malzemeler

1980' lerin ortalarından beri deniz araçlarının yapısal performansının ilerletilmesi ve maliyetlerinin azaltılması için yapılan çalışmalar kompozit malzeme kullanımını artırmıştır. Günümüzde geniş ölçüde deniz araçlarının yapımında fiber takviyeli polimer kompozitler kullanılmaktadır. Bu gelişme operasyonel performansın gelişmesinin (dizilim, teknoloji, dayanım, yük taşıma kapasitesinin artırılması) yanı sıra denizaltı ve savaş gemilerinin maliyetlerinin azaltılmasına yöneliktir. Bu maliyetler benzin tüketim fiyatları, bakım maliyetleri vb. dir.

Büyük askeri devriye botları, hovercraft, mayına karşı tedbir gemileri ve denizaltılara karşı silahlı savaş gemilerini içeren bu uygulamaların tümünde kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Kompozitlerin potansiyel olarak kullanıldığı diğer yeni araçlar ise süper yapılar, ilerlemiş direk sistemleri, su geçirmez bölmeler, güverteler, dümenler, hareket şaftları ve savaş gemileri için dümenlerdir.

Kompozitlerin denizaltındaki uygulamaları kontrol yüzeylerini, hareket mekanizmalarını ve direk sistemlerini içermektedir. Aynı zamanda donanma ve deniz kuvvetlerinde valfler, pompalar, borular, güverteler gibi temel araçlarda, ısı değiştirgeçlerinde, makinalar gibi elemanlar ve iç ekipmanlar için kompozitlerin kullanılmasının mümkün olduğu keşfedilmiştir.

Kompozitler, donanma ve deniz kuvvetleri araç uygulamaları için değişiklik gösterirken, bu malzemeler yalnızca küçük botlar ve özel olmayan gemi yapımında da kullanılmıştır.

Kompozitler ilk olarak II. Dünya Savaşından sonra ABD donanmasındaki küçük personel botlarının yapımında kullanılmıştır. Bu botlar sağlam, güçlü, dayanıklı ve kolay tamir edilebilecek şekildeydi ve bu uygulama daha sonra 1940 ortaları ile 1960 arasında ABD donanma gemilerinin diğer tiplerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Vietnam

savaşına kadar kompozit malzemenin yer aldığı 3000' in üzerinde tekne kullanıldığı gibi, personel botları, askeri devriye botlarının yüzlercesinde de kullanılmıştır. ABD Donanmasında aynı zamanda küçük gemiler için güverte evlerinde, iletişim için tekne direklerinde, tahrip ediciler için borularda ve denizaltı korumalarında kompozit malzeme kullanılmıştır.

Aşağıda Tablo 1.1' de Vietnam savaşı başlayıncaya kadar kompozit malzemelerin deniz araçlarında kullanımı listelenmiştir.

Tablo 1.1. Vietnam savaşı ve II. Dünya Savaşı arasında deniz araçlarında kompozit uygulamaları

* Mayın temizleyiciler (15.5 m uzunluğunda)	* Nehir askeri botları (9.5 m)
* İskele gemisi (15.2 m)	* Pilot botları
* Personel botu (7.9 m)	* Denizaltı kubbesi
* Denizaltı yüzgeçleri	* Küçük gemiler için güverte evleri
* Direkler ve direk kılıfları	* Anten gövdeleri
* Dümenler	* Borular
* Tanklar (su, yağ, petrol)	* Tayfa barınakları
* Torpido boruları	* Halat korumaları
* Kaplamalarda	* Denizaltı basınçsız kaplamalarda

1950' ler boyunca diğer donanmalar, denizaltıları ve gemilerinde kompozit yapıları kurmaya başlamışlar. Kraliyet donanması ve Fransız donanması daha iyi bir akustik sağlamak için denizaltıların kubbe başlarında çelik yerine kompozit kullanmaya, benzer şekilde gemilerin yüzeyindeki gözetleme antenleri ve iletişimin korunması için de kompozit malzemeler kullanmaya başlamışlardır.

1970' lere kadar mayın temizleme (avlama) gemileri, İngiliz Kraliyet donanması, Norveç donanması, Alman donanması, İsveç kraliyet donanması için yapılmıştır. Bu periyot oldukça büyük deniz araçlarında kompozitlerin kullanılmaya başlanmasına işaretler [43].

Kompozitlerin kullanıldığı deniz araçları ve ekipmanları aşağıda kısaca anlatılmaktadır.

Askeri devriye botları: Kompozitler yaklaşık 40 yıldır askeri devriye botlarının yapımı için kullanılmaktadır. İlk olarak 1960' lı yıllarda Vietnam Savaşında kullanılmak üzere Amerika Donanması için GRP askeri devriye botlarında kullanılmıştır. 1970 ve 1980 arasında küçük askeri devriye botlarında kompozit malzeme kullanımına başlanmış ve dereceli olarak artarak bugünlere kadar gelinmiştir. GRP askeri devriye botlarında (birçoğu 10 ton ve 10 m uzunluğundan daha az askeri devriye araçlarında) kullanılmıştır. Ancak nadiren de gemi teknesi direğinin daha az sert olmasından dolayı yaklaşık 20 m' den daha uzun askeri devriye botlarında da kullanılmıştır. Askeri devriye botları için gemi teknesi 25 m' den daha uzun olup, genellikle çelik veya alüminyum alaşımları kullanılarak yapılmıştır.

1980'lerin sonunda İsveç Donanmasının 30 m uzunluğundaki gemilerinde sandviç kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bu kompozitler karbon, cam, kevlar, fiber-vinylester dokuma ve köpükten oluşmaktaydı. Bu malzemelerle arzu edilen özelliklerin iyi bir şekilde ayarlanması sağlanmış ve daha düşük ağırlık, korozyon direnci ve su altındaki şok yüklemelere karşı da iyi bir hasar direnci elde edilmiştir.

Mayından gelecek tehlikelere karşı korunan gemiler: MCMV (Mine Counter Measure Vessel) olarak bilinen bu gemiler deniz mayınlarının tahrip edilmesi ve yerlerinin belirlenmesi için dizayn edilen gemilerdir. Geleneksel olarak bu gemiler magnetik olmayan özelliklerden dolayı ağaçtan yapılırlar. Yüksek nitelikli gemi kaburgası yapmak için ağaç ihtiyacı artmaya başlamış ve 1951'de bal peteği sandviç kompozit kullanılmıştır. Bununla birlikte üretim niteliği, mekanik performans ve kompozitin su direnci zayıf etkiye sahiptir. Daha sonra bu kompozit mayın gemileri için kullanılmıştır.

Mayın tarama gemilerinde kompozitin kullanımının gelişimi ve dizaynı ABD' de 1960 ve 1970 yılları arasında devam etmiştir. İlk kez MCMV' de 1973 yılında kompozit kullanımı başarılı bir şekilde yapılmıştır. MCMV' de kompozitin kullanımı; su altı şoklarına dirençli ve dayanımı sağlanmış, gemilerin kaburga dizaynında kullanılmıştır. Ayrıca yangın performans özelliği, akustik şoklama ve magnetik etkilerle beraber iyi bir özellik sağlanmıştır. Yaygın olarak MCMV' de en çok kullanılan bu gemi iskeleti, tek çerçeveli, çerçevesiz ve GRP sandviç olarak bilinmektedir.

Korvetler (Deniz altılara karşı silahlı savaş gemisi): Kompozit malzemelerden yapılan en uzun gemilerdir. Bu korvetler Visby tipi poly köpük kaplama, cam fiber polimer tabaka

ve hibrid karbon örtüsüne sahip sandviç kompozit panellerden yapılmaktadır. Karbon fiberler cam fiberlerden en az 5 kat daha pahalı olup, büyük gemilerdeki kompozit yapılarda kullanımı sınırlıdır.

Deniz otobüsleri: 1970' lerden beri deniz otobüslerinde küçük miktarda kompozitler kullanılmaktadır. Son zamanlarda süper yapılarda ve tekne gövdesinde kompozitlerin kullanımı artmıştır. Örneğin 1998' de Sri Lanka' da 18.8 m uzunluğunda deniz otobüsü Kevlar takviyeli kompozitten yapılmıştır. İsveç' te 20 m uzunluğundaki bir deniz otobüsünün tekne gövdesi sandviç kompozitten yapılmıştır. Deniz otobüslerinde geleneksel olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının yerine, daha hafif, hasar toleransı gelişmiş kompozitler kullanılmaktadır.

Kompozit direkler (Gemi direği): İlk olarak; 1960' da ABD Donanmasındaki çelik direkler yerine GRP direkler kullanılmıştır. Çelik direkler korozyon eğilimini ve radar işaretlerini artırmaktadır. Kompozit direk aynı boyuttaki alüminyum direkten %20-50 daha hafiftir. Bunlar hasar direncine ve korozyon direncine karşı daha uygundur.

Pervaneler: Gemiler ve denizaltılar için pervaneler geleneksel olarak Nikel-Alüminyum-Bronz (NAB)' dan yapılmaktadır. Bu malzeme pervane kanatları gibi karışık şekil içeren makineler için pahalıdır. NAB pervane kanatlarında çatlak hasarına eğilimli ve nisbeten titreşimden kaynaklı ses problemlerine yol açabilirler. Bunların yerine zamanla kompozitler, titanyum alaşımları vb. yer almıştır. Kompozitler pervane kanatlarında büyük hidrodinamik ve merkezci yüklemelere dayanımlı kompozitler fiber dizilimi ile dizayn edilmektedir. Burada kompozit kullanımı yararı yük taşıyan fiberler sayesinde pervane kanatlarına farklı yönlerde minimum gerilmenin iletilmesini sağlar.

Sonuç olarak, pervane kanatlarının performansı fiberlerin dizilimi yoluyla optimum olabilirler.

Şaftlar: Savaş gemileri ve denizaltılar için kompozit şaftların kullanımı son yıllarda ilerlemiştir. Şaftlar karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozitten yapılmaktadır. Şaftlar; aynı boyuttaki çelik şaftlardan %25-80 daha hafiftir. Kompozit şaftlar, korozyon, yük, hasar dayanımı ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir.

Gemilerdeki ekipmanlarda da kompozit kullanımı gittikçe artmıştır. Kompozitler; bacalar, güverteler, motor elemanları, borular, havalandırma sistemleri, bölme kapıları, dümenler gibi gemi parçalarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda pompalar, ısı değiştirgeçleri, dizel motorlar için mekanik elemanları da içermektedir. Bunlar aşağıda sıralanmıştır.

Bacalar: Büyük savaş gemileri için egzoz bacalarında kompozitlerin kullanımı artmaktadır. Ağırlık ve maliyetten dolayı son birkaç yıldır MCMV üzerindeki bacalarda kompozitler başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Özellikle büyük savaş gemilerinin bacalarında sandviç kompozitler kullanılmaktadır. Geleneksel olarak kullanılan malzemelerin yerine kompozit kullanımı ağırlık, ısı izolasyon avantajları, maliyet açısından %20-50 kazanım sağlamıştır.

Gemi bölmeleri, güverteler, kapılar ve ambar kapakları: Gemi bölmelerinde; çelik yapılardan ziyade daha iyi ses yalıtımı, yangın durumunda bitişik odalarda düşük ısı geçişi içeren faydalar kompozit kullanımını yaygınlaştırmıştır. Kompozit gemi bölmelerinin bir dezavantajı çelik gemi bölmelerine kıyasla kurulumu %20-90 daha pahalıdır. Benzer olarak kompozit güverte maliyeti de çelik güvertelere göre %30-45 daha pahalıdır. Maliyet azaltılınca kadar, muhtemelen gemi bölmeleri ve güvertelerin kompozit malzemeden yapımı çok daha büyük deniz araçlarında yaygın olacaktır.

Koruyucu duvar ve kaplamaları: Birçok donanmada şarapnel ve yüksek hızlı tahrip edici silahlara karşı koruma sağlayan kompozitten yapılmış duvarlar kullanılmıştır. Buradaki duvar kaplama ve zırhları kevlerden yapılmaktadır.

Dümenler: Metal dümenlerden ziyade kompozit dümenler %20 daha ucuz ve %50 daha hafiftir.

Makine ve motor parçaları: Amerikan Donanmasında ilk kez GRP' den yapılmış kaplama dişli örtüsü olarak değerlendirilerek gemi motorlarında kompozitin kullanımı olarak araştırılmıştır. Bu kompozitler geleneksel çelikten daha fazla korozyon direnci ve %90 daha hafifliğe sahiptir. Son zamanlarda motor odalarındaki çok sayıda elemanın yapımında kompozitten faydalanılmıştır. Cam takviyeli fenolik kompozitler, gemi dizel

motorlarının zincir dişlilerinde ve ara çarkta, kasnak, yağ pompası, su pompası ve dirsek kaplamasında kullanılmaktadır. Metallerin yerine kompozitlerin kullanımının yararı, %40-70 ağırlık kazanımı, kırılma direnci, düşük elektromanyetik alana sahip olmalarıdır. Ayrıca kompozit pompaların hidrolik performansı aynı boyuttaki bronz pompalardan daha iyidir.

Motor ve temel ekipmanlar: Tipik büyük bir gemi 1500' ün üzerinde çelik ekipmana sahip olup, toplam ağırlığı 700-800 tondur. Birçok araştırmacı ağırlık azalımı için temel kompozitlerin performansı ve yeterliliğini gösteren güvenli çalışmalar yapmıştır. Kell ve Rockwel [43], 1.2 m x 0.97 m boyutlarındaki cam takviyeli polyester kompozitin, aynı boyuttaki çelik ekipmandan %58 daha hafif olduğunu göstermişlerdir. Diğer önemli bir bulgu ise kompozitten yapılan su pompaları, aynı boyuttaki çelik pompalardan %50 daha ucuz ve %40 daha hafif olduğudur. Ayrıca kompozitten yapılan bu pompanın su altı şoklarına, yükleme ve hasar direncine karşı uygun olduğu gösterilmiştir.

Isı değiştirgeçleri: Gemilerdeki ısı değiştirgeçleri deniz suyunun korozyon hasarına karşı dirençli olup, ABD donanmasında bu ısı değiştirgeçleri karbon fiber kompozit kullanılarak yapılmıştır.

Borular (Boru tesisatı): Gemilerde en erken kompozit kullanım alanlarından biri boru tesisatıdır. Geleneksel pirinç boruların yerine kullanılan kompozit boru sistemi, korozyona dirençli, hafif ve ucuzdur. Bununla birlikte kompozit boru sisteminde; sıcak su geçişinde sızdırmalar ve hızlı bozulmalardan dolayı çok başarılı olunmamıştır.

Havalandırma kanalları: ABD Donanmasında havalandırma kanallarında kompozit kullanımı, düşük maliyeti, ağırlık kazanımını, korozyonun azaltılmasını ve ısı izolasyonunu sağlamıştır.

Güverte ızgaraları: Geleneksel çelik ızgaralarının yerine kompozit kullanımı korozyonun elimine edilmesini sağlamıştır [43].

1.3.1. Teknelerde kullanılan elyaflar ve reçineler

Günümüzde kompozit malzeme uzay, deniz, kara, inşaat ve daha pek çok alanda kullanılan mucizevi bir materyaldir. Tekne üretiminde kullanılan en yaygın kompozit; elyaf ve reçinenin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Elyaf lar yönleri doğrultusunda mukavemet sağlamaktadırlar. Bu basit yapıda bile o kadar çok çeşitli malzemeler kullanmak mümkündür ki, sonuçta sonsuz kombinasyonlar ortaya çıkabilmektedir. Elyaf ana maddeden elde edilmiş ipliklerin kumaş gibi dokunmuş halidir. Bu elyaf iplikleri kullanım alanına göre farklı kalınlıklarda bulunurlar ve ürünün fiyatını etkileyen temel nokta bu iplik kalınlığıdır. Her zaman ince iplikten dokunmuş olan elyaflar daha pahalıdır, buna karşılık sonuçta her zaman daha kaliteli olurlar. Çünkü kalın iplikli elyaflar reçineyi daha zor emerken, daha sert oldukları için yüzeye de daha zor yapışırlar. Bu nedenle aynı kaliteyi elde etmek için aynı elyaftan kalın iplikli olanına daha çok reçine yedirilmesi gerekebilir.

Bunun dışında dokuma denilen yekpare kumaşların mümkün olduğunca ek yapılmadan lamine edilmesi, eğer kopukluk varsa yapının büyüklüğüne göre belli bir oranda elyafların üst üste bindirilmesi gerekmektedir. Yalnız her zaman en ince iplikten dokunmuş elyaf kullanmak gerekli değildir, yapının büyüklüğü, tabakalandırma sistemine göre bu durum farklılık gösterir.

Elyaf lar: En yaygın elyaf cam elyaftır, bunun dışında Aramid, Karbon, PBO, Dyneema (yada spectra) ve Bazalt malzemelerden de elyaf üretilmektedir. Tekne üretiminde ise bunlardan Aramid, Bazalt ve Karbon sıklıkla kullanılmaktadır.

Cam elyaf günümüzde tekmeden, otomotiv parçasına, kaydıraktan, vitrin mankenine ve su deposuna kadar birçok son üründe kullanılır. Teknelerde ise en sık kullanılan elyaftır. Fiyatının uygunluğu, her yerde bulunabilmesi ve ağırlığına göre mekanik değerleri oldukça üstün bir malzemedir. Kompozit tekne üreticilerinin %95' i cam elyaf kullanmaktadır.

Aramid ilk olarak Dupont tarafından Nomex ismiyle piyasaya çıkmış sentetik bir malzemedir. Özellikle ısıya karşı yüksek mukavemet gösterir ve bu yüzden yanmaz ürünlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun dışında cama göre çok daha yüksek kopma mukavemetine sahiptir ve darbe emici özelliği vardır. Geçmişte camdan sonra en yaygın olarak kullanılan malzeme olmuştur. Bugün de eskisi kadar yoğun olmasa da özel noktalarda halen kullanılmaktadır. Fiyat olarak camdan pahalı karbondan ucuzdur. ($\approx$ dokunmuş elyaf kilosu 18-20 Eurodur.)

Bazalt ise volkanik bir taş olan bazaltın lif haline getirilerek dokunması sonucu ortaya çıkan bir malzemedir. Kullanımı çok yaygın olmamakla beraber fiyatına göre mükemmel mekanik değerlere sahip bir malzemedir.

Karbon elyaf ağırlığına göre mükemmel teknik değerlere sahip bir malzemedir. Karbon lifleri Akrilik ipliklerinin defalarca 600-700°C sıcaklıklara kadar ısıtılıp, soğumasıyla ortaya çıkarlar. Üretilen karbon ipliklerinin özellikleri neredeyse mükemmeldir. Ancak fiyatı da bu özelliklerine paralellik gösterir (40-300 Euro/kg). Karbon kompozit bir malzeme aynı mukavemet değerleri için cam kompozitten %40 hafiftir. Yani 1 cm kalınlığındaki ve 10 kg ağırlığındaki cam kompozite göre karbon 0.6 cm ve 6 kg' dır. Bunun dışında karbon cama göre çok daha sert bir malzemedir ve esneme yapmaz. Bu durumda yelkendeki gücün kayıpsız tekneye aktarılabilmesi sağlanır. Ağırlık kazancını, kullanılan reçine için de geçerli olduğunu düşünerek 10 tonluk bir gövdenin kabaca 6 tona inebileceğini düşünmek iki malzeme arasındaki farkı daha çok ortaya çıkarmaktadır. Karbon elyafında birçok farklı tip bulunmaktadır. Bu tipler farklı mukavemet özelliklere ve farklı fiyatlara sahiptirler.

Standart modüllü karbon: Bu tip karbon en ucuz fiyatlı olanıdır, genelde karbon tekneler bu tip karbondan üretilirler.

Orta modüllü karbon: Bu karbon standart olandan daha yüksek mekanik değerlere sahiptir, ağırlık daha önemli olduğundan ve yüksek mukavemete gerek duyulduğu elemanlarda kullanılırlar.

Yüksek modüllü karbon: Bu elyaf tipi daha yeni havacılık ve uzay endüstrisinden çıkıp daha basit kompozitler için kullanılmaya başlamıştır. Bugün TP52, VOR70 teknelerinin direkleri bu karbondan üretilmektedir.

Ultra yüksek modüllü karbon: Bu karbonun henüz denizcilik endüstrisinde kullanımı yoktur, aşırı yüksek fiyata sahiptir, sadece uzay mekikleri ve uçaklarda kullanılmaktadır. Sonuç olarak elyaflar, uygulandığı nokta, üretilen ürün ve bütçe açısından değerlendirilerek seçilmektedir ve her biri özelliğine uygun kullanım alanı bulmuştur.

Reçineler: Reçineler, kompozit malzemenin ana çimentosudur. Kompozit malzeme dahilindeki sandviç ve elyaf katmanı bir arada tutan ve bunları yüzeye yapıştıran malzemedir.

Kompozit tekne üretiminde üç tip reçine kullanılmaktadır.

a)Polyester

b)Vinylester

c) Epoksi

Bu reçineler ayrıca teknenin dış katmanını oluşturan Jelkot' un ve dolgu macunlarının da ana hammaddesini oluşturmaktadırlar.

a) Polyester reçine: Polyesterin keşfi 1. Dünya Savaşı dönemlerine dayanmaktadır. İlk kompozit teknelerin üretiminde ve günümüzde de birçok tersanede kullanılan reçinedir. Farklı viskozitelerde el yatırması yada infüzyon tipi üretim için çeşitleri bulunmaktadır. Fiyatı uygun, uygulaması kolay bir malzemedir. Fakat yeni nesil reçinelere göre birçok eksik yönü bulunmaktadır. Mekanik değerleri ve yapışma özellikleri düşüktür. Ayrıca sıcağa dayanıklılığı da diğer reçinelere göre düşüktür ve diğer reçinelere göre çok fazla su absorbe eder. Polyester uzun dönemde içine suyu geçiren bir malzemedir. Bu nedenle polyester teknelerde Ozmosa (bir sıvının yarı geçirgen bir tabakadan geçmesi) çok sık rastlanır. Ayrıca sertleşme anında aşırı ısınma yaparak uygulandığı bir önceki katmanda bozukluklara (çekme ve çukur) yol açabilir ve ürün kalıptan çıktıktan sonra şeklini kaybedebilir. Bu yüzden polyester ürünler montaj anına kadar kalıbında bekletilmelidir. Tek komponentli bir reçinedir. Kobalt ve mek peroksit karışımıyla sertleşir, sonradan ısıtılmaya ihtiyacı yoktur.

b) Vinylester reçine: Vinylester reçine ise epoksi ve polyesterin arasında epoksi bazlı bir reçine türüdür. Tüm özellikleri polyesterden daha iyidir ve ozmosa karşı çok iyi mukavemet sağlar. Uygulamasında polyesterle aynı sertleştiriciler kullanılması açısından benzerlikler gösterir. Yapışma ve çekme özellikleri polyester'den çok daha iyi epoksiden düşüktür. Buna karşılık form kaybı gibi bir durum vinylesterde söz konusu değildir.

Günümüzde vinylester, epoksiye göre uygun fiyatıyla önemli bir pazar payına sahip olmuştur ve birçok üretici polyester'den vinylestere geçiş yapmaktadır. (X-Yachtlar ve birçokları ozmosa karşı dış iki katman vinylester, diğer katlar polyester olacak şekilde üretim yaparlar.) Kullanımı daha zordur. Malzemenin mutlak değerlerine sahip olabilmesi için belli süreler için yüksek sıcaklıklarda bekletilmesi (post-cure) gerekir.

c) Epoksi reçine: Mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir. Farklı viskozitelerde farklı üretim modelleri için üretilirler. Çift komponentli bir reçinedir ve sertleştirici komponenti uygulama tipine göre seçilebilir. Minimum ısınma ve çekme yapar. Bu sayede

dış katmanı en az etkileyen reçinedir. Mükemmel yapışma özelliğine sahiptir. Uzun yıllar boyu kullanımda kompozitin delamine olmasını engeller ve en az su geçiren reçinedir.

Epoksi bu avantajlarına karşılık bazı dezavantajlara sahiptir. En önemlisi belki de fiyatıdır. Vinylester polyester'in iki katı, epoksi ise vinylesterin üç katı ortalama bir fiyata sahiptir. Hassas bir malzemedir. Katalogda belirtilen minimum sıcaklıkta kullanılması gerekir yoksa malzeme kıvamından dolayı uygulaması imkansız hale gelir. Polyester jelkotlu yüzeylerde sorun yaratır. Mutlaka vinylester yada epoksi jelkot kullanılması gerekir. Uygulamadan sonra ise karmaşık bir yüksek sıcaklıklarda bekletme işlemine tabi tutulması gerekir. Aksi halde katalog değerlerine ulaşamaz. Bu yüksek sıcaklıklarda bekletme işlemi en yaygın epoksilerde bile oda sıcaklığından başlayıp her 5 dakikada 2° artacak şekilde ve en sonda da 2-3 saat 70°C' de kalacak şekildedir, bu işlem için kurulması gereken ısıtıcı sistemler ve ek işçilik üretimde maliyet artışı anlamına gelir. Fakat bugün bütün kaliteli tekneler, AC tekneleri, VOR70 tekneleri, TP52 ve daha birçokları kıyaslama yapmaksızın epoksiyi tercih etmektedirler.

Sonuç olarak üç reçine de tekne yapımında kullanılmakta, tercih ve maliyetlere göre farklı yelpazelerde konumlanmaktadır [70].

1.3.2. Teknelerin üretim malzemeleri

Tekne üretiminde kullanılan malzemelerden bazıları aşağıda kısaca anlatılmıştır.

a) Sandviç malzemeler: Kompozit bir ürün sandviç ve monolitik (masif) olmak üzere ikiye ayrılır. Monolitik yapılar karbon, aramid, cam olmak üzere sadece elyaf ve reçine katlarından oluşurlar. Sandviç kompozitte ise iç ve dış elyaf katmanları arasında sandviç malzemesi bulunur.

Sandviç malzemenin avantajı, kompozitin kalınlığı artırılarak form direncinin kullanılmasıdır. Sandviç kompozitler monolitik yapılara göre aynı mukavemet değerlerinde daha hafif, rijit ve darbe anında delinmeye daha mukavimdir. Sandviç malzemeler uygulama tipine, ürünün kullanımına, kullanılan diğer malzemelere göre farklılık gösterirler. Sandviç yapılar çok çeşitli malzemelerle farklı kombinasyonlarla uygulanabilirler.

b) Ahşap sandviçler: Bu gruba kontraplak ve Balsa örnek verilir. Fakat sandviç yapının en önemli özelliği olan hafiflik için en uygun ahşap Balsa ağacından yapılan çekirdektir. Balsa ağacı oldukça düşük yoğunluğa sahip (250 kg/m^3) ve çok rijit bir malzemedir. Doğal bir malzemedir ve oldukça fazla kullanılan bir seçenektir. Olumsuz yanı ise daha düşük yoğunluklarda bir seçeneği olmamasıdır. Ayrıca bir darbe anında ahşap su emeceği için tamir esnasında çok geniş bir alanı tamir etmek gerekir.

c) Köpük sandviçler: Köpük sandviçlerde en sık kullanılan malzeme PVC köpüktür. Sıcağa mukavimdir, nispeten makul fiyat ve farklı yoğunlukta çeşitleri vardır. PET köpükler polietilenden üretilirler. Aynı mukavemetteki PVC köpüğe göre daha ağırdır. SAN köpükler yine PVC köpük benzeri bir sandviç malzemedir. Köpük çekirdekler en sık kullanılan sandviç malzemedir. İnfüzyon uygulaması için delikli ve kanallı olanları mevcuttur. Kaplanacak alanın şeklinde PVC köpük üretmek de mümkündür. Bu sayede boşluksuz ve mükemmel bir kaplama yapılabilmektedir.

d) Balpeteği sandviçler: Balpeteği, şekil itibarıyla ezilmeye çok mukavimdir. Bu şekilde üretilen birçok çekirdek malzeme vardır. Bunlar plastik, alüminyum ve Aramid' dir. Plastik balpetekleri daha çok yapısal olmayan hafif paneller üretmekte kullanılır. Alüminyum petekler ise ağırlığına göre oldukça yüksek mukavemetlidir ve düşük maliyete sahiptir. Sandviç materyallerin en önemlisi ise Nomex yani Aramid balpeteğidir. Bu malzeme kevlar kağıttan üretilir, sadece prepreg uygulamalarında kullanılır. Çok hafif ve ezilmeye karşı çok mukavim bir malzemedir. Fiyatı çok yüksektir. Buna karşılık Karbon/Nomex bir yapı en hafif, rijit ve sağlam kompozittir. Aynı zamanda işlenmesi en zahmetli olanıdır. Karbon/Nomex'ten üretilen teknenin içinde bile normal bir tekneye göre çok daha fazla ses çıkar. Karbon/Nomex teknelerin tek dezavantajı, çok sert oldukları için zaman içerisinde tabaka ayrılma olayının gerçekleşme ihtimalinin olmasıdır.

Sonuç olarak sandviç malzemeler, kompozitin kalitesini ve malzeme maliyetini artırır fakat sandviç bir kompozit için monolitik eş bir yapıya göre daha az miktarda malzeme kullanılır. Böylece işçilikten tasarruf edilir. Günümüzde çekirdek malzemelerin fiyatı düştükçe, kompozitlerde özellikle teknelerde çok daha fazla kullanılmaya başlanmıştır [70].

1.4. Deniz Suyunun Özellikleri

Deniz suyu özgül direncinin düşük olması ve yüksek oranda klorür içermesi nedeniyle temas etmiş olduğu çelik yapılar için önemli derecede aşındırıcı bir maddedir. Yüzey bölgelerde dolgun halde oksijen bulunur. Deniz suyunun Ph' ı 8 civarındadır. Bu Ph değerinde katodik reaksiyon oksijen mevcudiyetinde gerçekleşeceği için yüzey bölgeler korozyon için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Özellikle gemiler hareket halinde iken sürekli yüzeye çözülmüş oksijen teması kolaylaşacağından ve sürekli dalgalar etkisiyle ıslanma ve kuruma etkisine maruz kalacağı için korozyon çok önemli bir ortam oluşturmaktadır.

Deniz suyunun bileşenleri ve oranları:

Bileşen	Oran
Klorür	19000 mg/l
Sodyum	10500 mg/l
Magnezyum	1270 mg
Kükürt	880 (2640 sülfat) mg/l
Kalsiyum	400 mg/l
Potasyum	380 mg/l
Bromür	65 mg/l
Karbon	28 (140 bikarbonat)mg/l
Stronisyum	13 mg/l
Bor	5 mg/l
TOPLAM	34.4 g/l

Tuz konsantrasyonu coğrafi bölgelere göre farklılık göstermektedir. Tropikal bölgelerde ve kapalı denizlerde tuz konsantrasyonu daha yüksektir. Açık denizlerde 32-36 g/l arasında değişmektedir.

Bu değerler Akdeniz'de 39 g/l, Karadeniz'de 17-20 g/l arasındadır. Deniz suyunun dörtte üçünü sodyum klorür oluşturmaktadır. Klorür iyonu pasifliği bozucu etkisi nedeniyle korozyon hızını artırıcı yönde rol oynamaktadır. Kalsiyum ve Magnezyum gibi iki değerlikli iyonlar metal yüzeyinde karbonat, sülfat ve silikat halinde çökerek bir kabuk oluştururlar. Bu çökme olayı katod reaksiyonu sonucu oluşan hidroksil iyonlarının etkisiyle hızlanmaktadır. Bu kabuğun bileşimi çevresel koşullara bağlıdır. Ancak büyük bir

çoğunluğu karbonat şeklindedir. Metal yüzeyindeki kabuk, yüzeye oksijen difüzyonunu güçleştirerek, korozyon hızının zamanla azalmasına neden olmaktadır.

Deniz suyunun sıcaklığı bölgeler ve mevsimlere göre 5-25°C arasında değişmektedir. Sıcaklık arttıkça deniz suyunun dayanımı azalmaktadır. Bu durum sıcak denizlerde korozyon hızının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan sıcaklığın artması ile de kabuklaşma hızında artış meydana gelmektedir. Ayrıca sıcaklık ile su içinde oksijen çözünümü ters orantılıdır. Sıcaklık arttıkça çözünen oksijen miktarında azalış görülmektedir. Bu iki parametreden hangisinin hakim olduğu malzeme kalitesi ve çevre koşullarına bağlıdır [71].

Tablo 1.2. Sıcaklık ve tuz konsantrasyonuna bağlı çözünen oksijen miktarı (mg/l) [71].

Sıcaklık (°C)	Çözünmüş Tuz Konsantrasyonu (g/l)				
	0	9	18	27	36
0	14.6	13.7	12.8	11.9	11.0
5	12.8	12.0	11.2	10.5	9.7
10	11.3	11.3	10.0	9.4	8.7
15	10.2	9.7	9.0	8.5	7.9
20	9.2	8.7	8.2	7.8	7.2
25	8.4	7.9	7.5	7.0	6.6

Ege Denizi'nin tuzluluk oranı Akdeniz'e yakındır. Denizin çoğu yerinde deniz suyunda erimiş tuz oranı %3.8' in üstündedir. Deniz suyu sıcaklıkları yazın Ağustos ayında ortalama 24 °C derece civarındadır [72].

Malzemelerin su ve deniz suyu emilimi ile ilgili bilgiler aşağıda kısaca belirtilmiştir.

Su emilimi: Çok uzun vadeli performans ölçümleri; bir malzemenin nem emme eğilimine özellikle hidrolize karşı hassas olmasına bağlıdır. Yüksek oranda su emilimi fiber-matriks bağlarını şişirmeye neden olabilir. Bu durumda hidrolitik polimer bozulması ve çok su girişi fırsatının sağlanması, kompozit malzemede rijitlik ve dayanım kaybı ile sonuçlanabilir [73].

Deniz suyu emilimi: Deniz suyu, taze veya damıtılmış su ile karşılaştırıldığında metal tuzlarından ve hidroliz teşvik eden bir katalizör olmalarından dolayı, çevresel bozulmaya daha çok eğilimlidir. Bunun yanında uzun süreli performans kararı için birçok faktör etkili olabilir. Genel olarak ticari reçineler polimer omurgası içinde ester bağlantılarını içermektedir bu da zaman içerisinde hidroliz reçine dayanımını azaltmaktadır. Ek olarak hidroliz olayında; deniz suyu reçine-elyaf hatalarına neden olduğundan dolayı kompozit içerisine nüfuz ederek, malzemenin dayanım ve rijitliğinin düşmesine neden olmaktadır [73].

1.5. Kompozit Malzemelerin Mekanik

Kompozit yapıların mukavemetlerinin belirlenmesi ve gerilme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir. Tabakalı kompozitlerin mekanik davranışlarının bilinmesi, fiber-takviyeli tabakaların anlaşılması açısından da önemlidir. Bu anlamda izotropik malzemeler kadar anizotropik ve ortotropik malzemeler içinde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları önemlidir.

Bu kısımda kompozit malzemelerde gerilme analizi incelenerek, kompozit malzemelerdeki hasar kriterleri ele alınmıştır.

1.5.1. Kompozit malzemelerin gerilme analizi

1.5.1.1. Anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları

Bütün doğrultulardaki özellikleri birbirinden farklı olan malzemeler anizotropik malzemeler olarak bilinir. Bu malzemelerin en genel halidir. Anizotropik malzemeler için genelleştirilmiş Hooke Kanunu gerilme-şekil değiştirme bağıntısı;

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, \dots, 6 \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada σ_i gerilme bileşeni, C_{ij} rijitlik matrisi ve ε_j ise şekil değiştirme tansörüdür. Normal ve açılmal şekil değiştirme bileşenleri;

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.2)$$

$$\gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{31} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada u, v, w fonksiyonları sırası ile x, y, z doğrultusundaki deplasmanlardır. 36 bağımsız elemana (sabite) sahip olan rijitlik matrisi elastik malzemeler için birbirinden bağımsız otuzaltıdan daha az sabit ile ifade edilebilir. Bunun için şekil değiştirme enerji yoğunluğu fonksiyonunu ele almak gerekir. Elastik potansiyeli mevcut elastik malzemelerde $d\varepsilon_i$ kadar şekil değişikliği meydana getirdiğinde, bu şekil değişimi elastik malzemenin birim hacim elemanı içinde dW kadar bir şekil değiştirme enerjisinin meydana gelmesine sebep olur. Birim hacim elemanı için şekil değiştirme enerjisi;

$$dW = \sigma_i d\varepsilon_i \quad (1.4)$$

$$dW = C_{ij} \varepsilon_j d\varepsilon_i \quad (1.5)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadenin integrali alındığında ;

$$W = \frac{1}{2} C_{ji} \varepsilon_i \varepsilon_j \quad (1.6)$$

elde edilir. Burada $C_{ij}=C_{ji}$ ' dir. Genelleştirilmiş Hooke Kanunu üç boyutlu bir cisim için (1.1) denklemi yardımıyla şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.7)$$

Triklinik malzemeler için elastiklik matrisi 21 bağımsız sabit içerir. Tek bir simetri düzlemine sahip x_1 ve x_2 olan malzemelerde rijitlik matrisi 13 bağımsız elemanla ifade edilebilir. Bu tür malzemeler “monoklinik malzemeler” adı ile anılırlar. Monoklinik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ifadesi (1.8) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.8)$$

Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakalarda tüm elyafların birbirine paralel olduğu kabul edilirse, bu tür malzemelerin ortotropik malzeme olduğu söylenebilir. Ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç eksenle simetrik malzeme özelliği mevcuttur. 9 bağımsız eleman ile tanımlanırlar. Bu malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.9)$$

şeklinde ifade edilmektedir [67, 74]. x , y simetri düzlemine sahip bir malzemede rijitlik matrisi 5 bağımsız sabit içerir. Bu malzemeye “transversely izotropik” malzeme denir ve (1.10) nolu eşitlik ile ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.10)$$

Eğer malzemede sonsuz sayıda simetri düzlemi mevcut ise rijitlik matrisi, iki bağımsız sabitle ifade edilebilir. Bu duruma uyan malzemelere ise “izotropik malzemeler” denir ve (1.11) nolu eşitlik ile tanımlanır [67].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.11)$$

1.5.1.2. Ortotropik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları

Ortotropik elastik malzemede mühendislik sabitlerinin bulunabilmesi için; bilinen bir yük veya gerilme yardımıyla gerçekleştirilen basit çekme ve kayma deneyleri yapılır. Yapılan deneylerin sonuçları değerlendirildiğinde malzemenin “E” Elastisite modülü ile “G” Kayma modülü tespit edilebilir. Ayrıca deney sonuçları “S_{ij}” Elastiklik matrisinin ve “C_{ij}” Rijitlik matrisinin elemanlarının E ve G’ ler cinsinden tanımlanmasını sağlar. [S_{ij}] elastiklik matrisi, [C_{ij}] rijitlik matrisinin tersidir Ortotropik bir malzeme için elastiklik matrisi;

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

şeklinde ifade edilir. Ortotropik bir malzeme için rijitlik matrisi elemanları mühendislik sabitleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta}, & C_{12} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} \\ C_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta}, & C_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \\ C_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta}, & C_{33} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \\ C_{44} &= G_{23}, & C_{55} &= G_{31}, & C_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Burada Δ ;

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \quad (1.14)$$

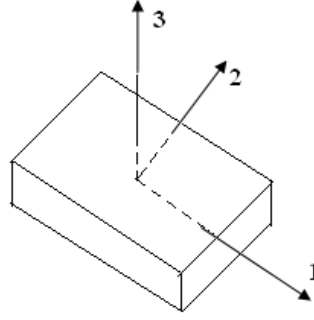
eşitliği ile ifade edilir.

Herhangi bir elastik malzemede düzlem halini ifade etmek için üç eksenli gerilme hali ile ilgili tanımlarda ve denklemlerde üçüncü düzlemle ilgili gerilmelerin sıfır alınması gerekli ve yeterlidir.

İnce cidarlı ortotropik kompozit levhalarda eğer düzlem dışında kuvvet uygulanmıyorsa, düzlemsel gerilme durumu söz konusudur. Şekil 1.1' de görüldüğü gibi 1-2 düzlemi ile düzlem gerilme durumu tanımlanabilir ve yukarıdaki bağıntılarda;

$$\sigma_3 = 0, \quad \tau_{23} = 0, \quad \tau_{31} = 0 \quad (1.15)$$

değerleri göz önüne alınırsa, ortotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 1.1. Tek yönlü takviyeli plaka

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

□

(1.16) □

Elastiklik matrisi elemanları mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilirse;

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\ S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \\ S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Bağıntı (1.16)'daki şekil değiştirme-gerilme ifadesine benzer şekilde, gerilme-şekil değiştirme ifadesi ise Q_{ij} matrisi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.18)$$

Burada Q_{ij} rijitlik matrisidir. Rijitlik matrisi elemanları, elastik matrisi $[S_{ij}]$ elemanları cinsinden,

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{12} &= \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{22} &= \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{66} &= \frac{1}{S_{66}} \end{aligned} \quad (1.19)$$

şeklinde yazılabilir. Bu rijitlik matrisi elemanları ayrıca, mühendislik sabitleri cinsinden ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (1.20)$$

Rijitlik matrisi elemanları ortotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için dört bağımsız mühendislik sabiti ile ifade edilir. İzotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için şekil değiştirme-gerilme bağıntısı,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.21)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E} \\ S_{12} &= -\frac{\nu}{E} \end{aligned} \quad (1.22)$$

şeklindedir. Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ise;

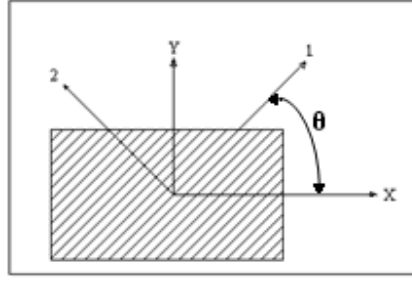
$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.23)$$

şeklinde yazılır. Burada matris elemanları Q_{ij} 'ler;

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E}{1-\nu^2} \\ Q_{12} &= \frac{\nu E}{1-\nu^2} \\ Q_{66} &= \frac{E}{2(1+\nu)} = G \end{aligned} \quad (1.24)$$

şeklinde ifade edilir [67].

Fiber takviye açısının gerilme – şekil değiştirme bağıntılarına etkisi: Tabakalarda kullanılan koordinat sisteminde 1 nolu yön takviye elemanının (elyaf) yönünü, 2 nolu yön ise takviye elemanına dik olan yönü gösterir. x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi açılı tabakalarda çakışmaz.



Şekil 1.2. Tabakalarda koordinat sisteminin gösterimi

Bu durumda x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki bağıntı dönüşüm matrisi ile aşağıda belirtildiği gibi sağlanır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.25)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.26)$$

Burada $[T]$ dönüşüm matrisi şu şekilde ifade edilmektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2nm \\ n^2 & m^2 & -2nm \\ -nm & nm & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2nm \\ n^2 & m^2 & 2nm \\ nm & -nm & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

Burada m ve n değerleri, $m=\cos \theta$ ve $n=\sin \theta$ şeklinde tanımlıdır.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Reuter matrisi $[R]$ dikkate alındığında şekil değiştirme bileşenleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.30)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.31)$$

x-y koordinat eksen takımında gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir [67].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q][R] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q][R][T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.32)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} [Q] & [R] & [T] & [R]^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.33)$$

Bu işlem zinciri içerisindeki $[R] [T] [R]^{-1}$ ifadesi $[T]$ matrisinin transpozesi olarak gösterilebilir.

$$[R] [T] [R]^{-1} = [T]^{-T} \quad (1.34)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.35)$$

$[T]^{-1} [Q] [T]^T = [\bar{Q}]$ matrisi ile gösterilir ve

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.36)$$

şeklinde gösterilir. Buradan ;

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + Q_{22}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 \\ \bar{Q}_{12} &= Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})nm^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n^3m \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + Q_{22}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})nm^3 \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{66}(n^4 + m^4) \end{aligned} \quad (1.37)$$

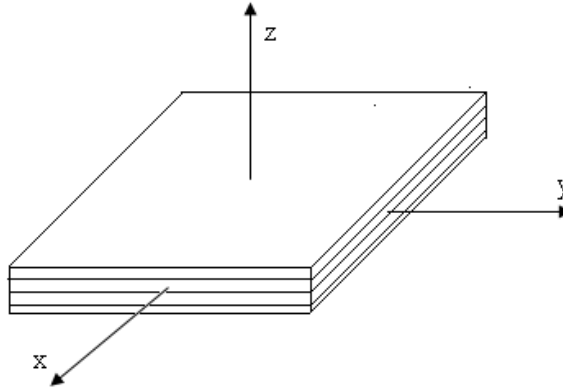
şeklinde elde edilmektedir [76].

1.5.1.3. Tabakalı kompozit malzemelerde gerilme analizi

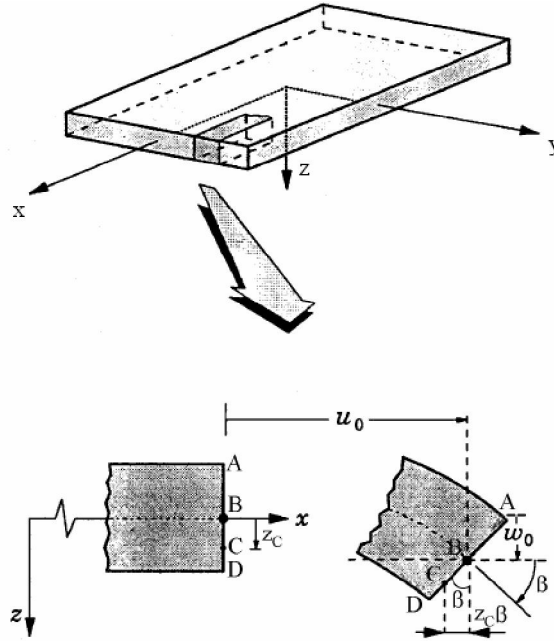
Tabakalı kompozit malzemelerin gerilme analizleri izotrop malzemeler için yazılmış olan klasik tabaka teorisi kullanılarak gerekli eşitliklerin kompozit malzemelere uyarlanması ile yapılmaktadır. Belirli veya keyfi oryantasyona göre dizilmiş tabakaların birleşimiyle bir plaka oluşmaktadır. Her bir tabakanın asal malzeme eksenleri 1,2, 3, x, y ve z eksenine göre keyfi olarak herhangi bir açı değerinde seçilebilir (Şekil 1.3). Kalınlık doğrultusundaki kayma şekil değiştirme bileşenleri;

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \text{ 'dır.} \quad (1.38)$$

Bunun yanı sıra şekil değiştirmelerden ϵ_z ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Sonuç olarak; plakada Kirchhoff deformasyon hipotezinin tanımlanmış olduğu görülmektedir. Bu hipoteze göre orta düzleme dik olan doğrultular deformasyon sonrasında da bu düzleme dik olarak kalmaktadır [67, 75].



Şekil 1.3. Plaka koordinat sistemi



Şekil 1.4. xz düzlemindeki deformasyonun geometrisi [67].

Şekil 1.4' den de görüldüğü gibi Kirchhoff hipotezine göre tabakanın kesit alanı x-z düzleminde yer almaktadır. Bu durumda B noktasının deforme olmuş ortadaki yüzeyden deformasyona

uğramamış olan noktaya olan x yönündeki yer değiştirmesi u_0 olarak alınacaktır. ABCD çizgisinin deformasyon sonrasında düz kalması durumunda x yönündeki yer değiştirmesi [67],

$$u_c = u_0 - z_c \beta \quad (1.39)$$

şeklinde yazılır. Eşitlikteki β parametresi deformasyon sonrasında ABCD olarak gösterilmiş olan çizgiye ait olan tabakanın orta yüzeyinin x doğrultusundaki eğimidir. Bu eğim aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (1.40)$$

β parametresi, benzer şekilde x ve y doğrultularındaki yer değiştirmeler için de ifade edilir ve buradan da, yer değiştirmeler ve şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi ifade edilirler.

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x}; \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (1.41)$$

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \Rightarrow \varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (1.42)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \Rightarrow \gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (1.43)$$

Tabakalardaki şekil değiştirme, matris şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.44)$$

Burada; orta yüzeydeki şekil değiştirmeler ve eğrilikler aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \text{ ve } \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (1.45)$$

Buradan tabakaya ait gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ise aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

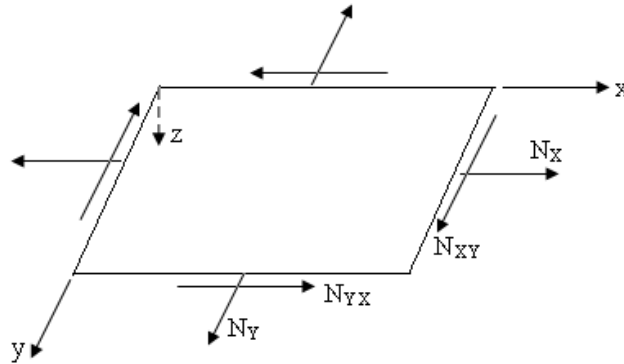
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.46)$$

Plaka üzerinde meydana gelen bileşke kuvvet ve momentler, her bir tabaka için global gerilmelerin integrali yoluyla veya plaka kalınlığı yoluyla elde edilmektedir.

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad (1.47)$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz$$

N_x ; birim uzunlukta bileşke kuvvet ve M_x birim uzunlukta bileşke moment olarak ifade edilmekte olup, Şekil 1.5 ve Şekil 1.6' da gösterilmektedir [67].

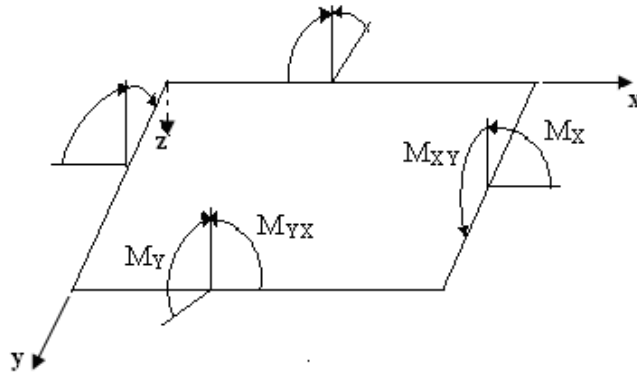


Şekil 1.5. Düzlem plakaya etki eden kuvvetler

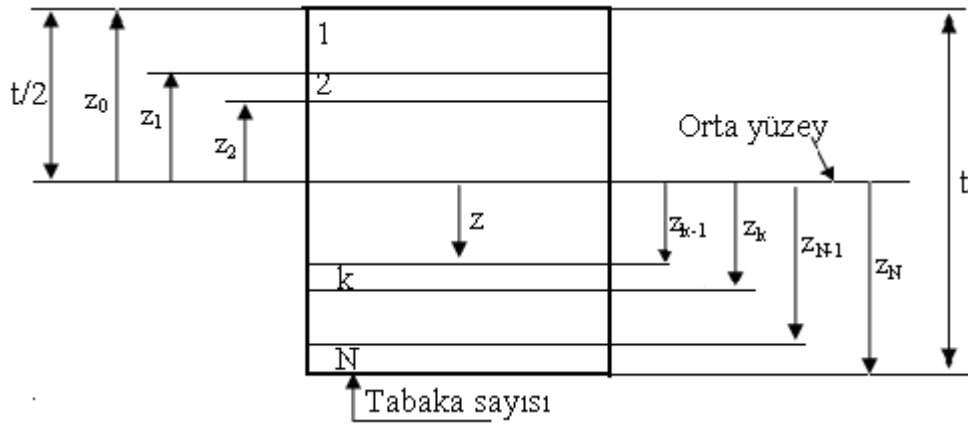
$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \quad (1.48)$$

ve

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \quad (1.49)$$



Şekil 1.6. Düzlem plakaya etki eden momentler



Şekil 1.7. N tabakalı plakanın geometrisi

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\} \quad (1.50)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\} \quad (1.51)$$

ε_x^0 , ε_y^0 , γ_{xy}^0 , K_x , K_y ve K_{xy} z terimine bağlı büyüklükler olmadığı için ifadenin dışına alınarak denklemler düzenlenirse tüm sisteme ait komple direngenlik matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.52)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.53)$$

Burada; A, B, D terimleri aşağıdaki eşitliklerde belirtilmiştir [67].

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \left(\bar{Q}_{ij} \right)_k (z_k - z_{k-1}) \quad (1.54)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left(\bar{Q}_{ij} \right)_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (1.55)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \left(\bar{Q}_{ij} \right)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (1.56)$$

1.6. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri

Bir malzemenin gerilmesi ve bunun sonucu olarak akması veya kırılması ile ilgili deneysel sonuçlar genellikle tek eksenli gerilme durumlarını içeren çalışmalarla tespit

edilirler. Fakat gerçek kullanma sahalarında malzemelerde bir üç eksenli gerilme durumunun veya en azından iki eksenli gerilme halinin mevcut olduğu görülmektedir. Kırılma teorilerinde malzemenin ortotropik olmasının yanında homojen bir yapıya sahip olması beklenir. Bunun yanında belli şartlar altında çalışan malzemelerin mukavemetini etkileyen önemli unsurlardan biri malzemelerin dayanım sınırıdır. Uygulanan yüklerin malzemenin dayanım sınırını aşması durumunda malzemede hasar meydana gelmektedir. Bu hasarın göz önüne alınarak emniyetli çalışma için gerekli şartların belirlenmesi önemlidir. Bunun için yapılan deneylerle malzemeye ait mekanik özellikler tespit edilerek mukavemet sınırları belirlenmektedir. Sayısal olarak hasar yüklerinin tespit edilmesi ve hasarın oluşum şeklini modelleyebilmek için çeşitli hasar teorileri öne sürülmüştür. Bu teorilerin esas amacı malzemenin hasara uğrayacağı gerilmelerin önceden tespit edilmesini sağlayarak yükleme sınırlarını tespit edebilmektir.

Hasar teorileri genellikle dört grupta toplanmaktadır [74].

- 1- Maksimum gerilme teorisi
- 2- Maksimum şekil değiştirme teorisi
- 3- Tsai-Hill hasar kriteri
- 4- Tsai-Wu hasar kriteri

1.6.1. Maksimum gerilme teorisi

Takviye eksenlerindeki gerilmeler o eksenlere ait olan akma gerilmelerinden karşılıklı olarak küçük olduğunda bu ortotropik malzeme üzerine uygulanan gerilmeleri taşıyabilir. Aksi taktirde malzeme üzerine uygulanan gerilmeler takviye istikametlerindeki akma gerilmelerinden herhangi birini geçecek şekilde olduğu zaman akma veya kırılma başlar. Yani malzemenin asal eksenleri doğrultusundaki gerilme bileşenlerinin, o doğrultudaki malzeme dayanım değerlerini aşması halinde hasar oluşmaktadır.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\geq X_t = \text{Çekme} \\ \sigma_2 &\geq Y_t \end{aligned} \quad (1.57)$$

$$|\tau_{12}| \geq S = \text{Kayma}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\leq X_c = \text{Basma} \\ \sigma_2 &\leq Y_c \end{aligned} \quad (1.58)$$

Burada 1 ve 2 eksenleri malzemenin takviye durumuna bağlı olarak asal takviye eksenlerini, X_t , Y_t çeşitli gerilmelere karşı bu eksenlerde meydana gelen çekme gerilme dayanımını (malzemeye ait); X_c , Y_c ’ de bu eksenlerdeki basma gerilme dayanımını ve S ise kayma dayanımını göstermektedir [67, 76].

1.6.2. Maksimum şekil değiştirme teorisi

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma şekil değiştirmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar oluşmaz [66, 73, 77].

$$\begin{aligned}
 -\varepsilon_1^C &< \varepsilon_1 < \varepsilon_1^T \\
 -\varepsilon_2^C &< \varepsilon_2 < \varepsilon_2^T \\
 -\varepsilon_3^C &< \varepsilon_3 < \varepsilon_3^T \\
 -\gamma_{12}^F &< \gamma_{12} < \gamma_{12}^F \\
 -\gamma_{23}^F &< \gamma_{23} < \gamma_{23}^F \\
 -\gamma_{13}^F &< \gamma_{13} < \gamma_{13}^F
 \end{aligned} \tag{1.59}$$

Burada; ε_1^C :1 yönündeki maksimum basma birim uzamasını, ε_1^T :1 yönündeki maksimum çekme birim uzamasını ve γ_{12}^F :1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısını ifade etmektedir.

1.6.3. Tsai-Hill hasar kriteri

Tsai-Hill Hasar teorisi, izotropik malzemeler için geliştirilmiş. Von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış seklidir.

$$\begin{aligned}
 (G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - \\
 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1
 \end{aligned} \tag{1.60}$$

Terimlerin hesaplanması için çeşitli gerilmelerin sistemde bulunma şartlarının sağlanması gereklidir [67, 74, 76].

$$\begin{aligned}
 2N &= \frac{1}{S^2} \\
 G + H &= \frac{1}{X^2} \\
 F + H &= \frac{1}{Y^2} \\
 F + G &= \frac{1}{Z^2} \\
 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \\
 2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \\
 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}
 \end{aligned} \tag{1.61}$$

1.6.4. Tsai-Wu hasar kriteri

Tsai-Wu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en çok kullanılan teorilerden biridir. Bu teoride anizotropik malzemeler için aşağıdaki eşitliği akma olarak tanımlanmıştır.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \geq 1 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \tag{1.62}$$

İki eksenli gerilme hali için bu eşitlik;

$$F_1 \sigma_{11} + F_2 \sigma_{22} + F_{11} \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + F_{66} \sigma_{12}^2 + 2F_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} \geq 1 \tag{1.63}$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlikteki F değerleri;

$$\begin{aligned}
F_1 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \\
F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c} \\
F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \\
F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c} \\
F_{66} &= \frac{1}{S^2}
\end{aligned} \tag{1.64}$$

şeklinde tanımlanırlar. Bu değerler (1.63) nolu eşitlikte yerine konulduğunda; F_{12} ‘de;

$$F_{12} = -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}} \tag{1.65}$$

veya

$$F_{12} = -\frac{1}{2\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}}$$

şeklinde tanımlanmaktadır [36].

2. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde imal edilen sekiz tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhaların mekanik özelliklerinin tespit edilmesi aşamasında yapılan çalışmalar, referans alınan standartlar ve deney prosesleri ile ilgili bilgiler aktarılmaktadır.

Bu çalışmada iki paralel pim bağlantılı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar üzerinde çevresel koşulların etkisini incelemek amacıyla hazırlanan numunelerde, maksimum hasar yükleri ve hasar tipleri çekme testi ile belirlenmiştir. İlk olarak kuru haldeki numuneler, sonra 3 ay ve daha sonrada 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numuneler için aynı testler yapılmıştır ve her üç durum için mekanik özellikler tespit edilmiştir. Deneyler aynı özellikli üç numune için tekrarlanmış olup, ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. Kompozit levhalarda testler farklı boyutlar için tekrarlanmıştır. Aynı zamanda maksimum hasar yükleri ve hasar tipleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak ANSYS 11.0 paket programında incelenmiştir.

Bilindiği gibi kompozit malzemelerin statik yükleme koşulları altında mekanik özelliklerinin tespit edilmesi metalik malzemelere göre her zaman önemli olmuştur. Test aşamalarının etkili ve güvenli yolla yapılması sonuçlar açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla bu çalışmada sekiz tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit prepreglerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için testler yapılmıştır. Bu testlerin birçoğu American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından belirlenen testlerdir.

Bu çalışma için hazırlanan kompozit levha dokuma şeklinde olduğu için $E_1=E_2$ ' dir. Bu çalışmalar ve deneysel tüm işlemler Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda üç adet gerilme karakteristikleri, yanında Elastisite modülü, Kayma modülü ve Poisson oranı elde edilmiştir.

X_t = 1- doğrultusunda çekme dayanımı

X_c = 1- doğrultusunda basma dayanımı

S_{12} = Kayma dayanımı

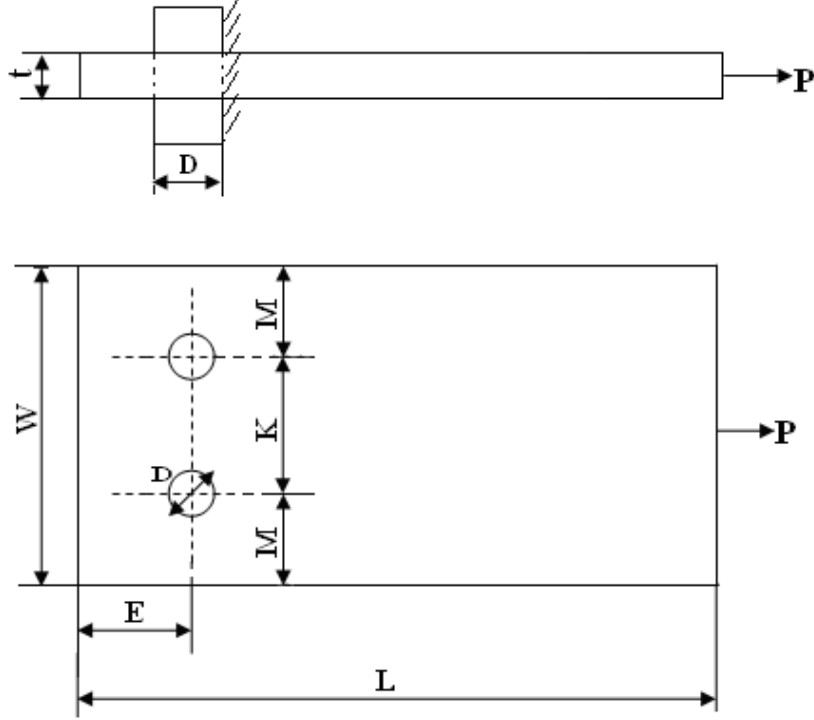
$E_1=E_2$ = Elastisite modülü

ν_{12} = Poisson oranı

G_{12} = Kayma modülü

2.1. Problemin Tanımlanması

İki paralel pim bağlantılı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levha numunesinin geometrisi Şekil 2.1’ de görülmektedir.



Şekil 2.1. İki paralel delikli kompozit levhanın geometrisi

Burada;

L = Levha uzunluğu, (95 mm),

D = Delik çapı, (5mm),

K = İki delik merkezi arasındaki mesafe (mm),

M = Delik merkezinden yanıl mesafe uzaklığı (mm),

W = Levha genişliği (mm),

t = Numune kalınlığı (mm),

P = Çekme Kuvveti (N) olarak tanımlanmıştır.

Pim deliği merkezinden levhanın üst kısmına olan mesafenin delik çapına oranı (E/D), iki paralel pim deliği merkezleri arasındaki mesafenin delik çapına oranı (K/D), pim deliği merkezinden levhanın yanıl kısma uzaklığının delik çapına oranı (M/D) ve levha genişliğinin delik çapına oranı (W/D) parametre olarak seçilmiştir.

Plaka için geometrik parametreler;

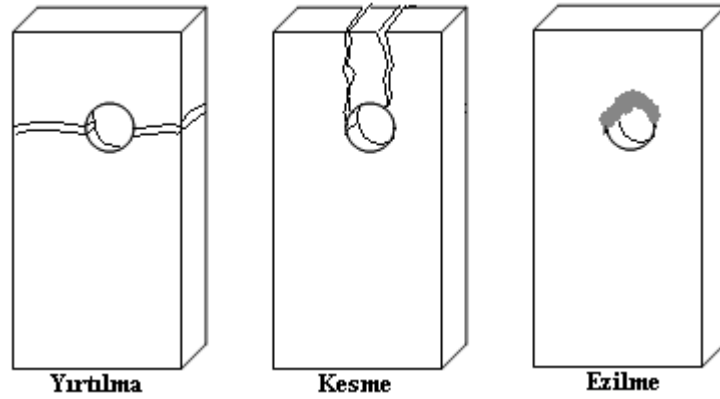
$E/D=2, 3, 4, 5,$

$K/D=2, 3, 4,$

$M/D=1, 2, 3, 4$ ve

$W/D= 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$ olarak belirlenmiştir.

Mekanik bağlantılarda çekme yüklemesi etkisinde genellikle üç temel hasar tipi gözlenmektedir. Bu hasar tipleri Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Yırtılma tahrip edici bir hasar tipi olup, tasarımcılar pim bağlantılarında en yüksek gerilmeye karşı daha çok ezilme hasar tipinin oluşmasını tercih ederler.



Şekil 2.2. Pim bağlantıları için üç temel hasar tipi [26, 28, 68].

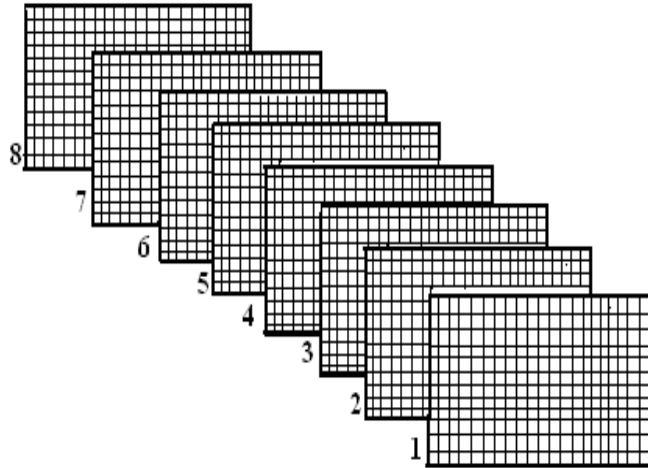
2.2. Kompozit Levhanın Hazırlanışı

Bu çalışmada paralel iki paralel pim bağlantılı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit prepegler kullanılmıştır.

Prepegler havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanlarında kullanılmaktadırlar. Prepeg (resin-impregnated fiber) reçine emdirilmiş takviye malzemelerine (fiber, kumaş, vb.) verilen addır. Bu malzemeler özel saklama koşullarında tutulurlar ve belli bir raf ömürleri vardır. Üretim esnasında ayrıca bir reçine emdirme işlemine gerek kalmaz. Prepeg' ler tek yönlü bant (unidirectional tape), örgülü kumaş (woven fabrics) veya bükülmüş iplik (roving) şeklinde üretilmektedir. Özellikle epoksi prepegler endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca termoset ve termoplastik özellikli prepegler de mevcuttur.

Günümüzde mevcut termoset reçineler arasında en yüksek performansa sahip olan reçine epoksilerdir. Mekanik performansları ve çevresel etkilere karşı dirençleri diğerlerinden daha yüksektir. Yapışma kabiliyetlerinin ve su etkisi ile bozulma dirençlerinin yüksek olması nedeni ile de özellikle yat, tekne gibi deniz araçlarında kullanılabilecek en ideal reçinelerdir [80].

Sekiz tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit prepreg levhalar İzmir / Türkiye İzoreel Kompozit İzole Malzemeler Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. firmasında üretilmiş ve 2.5 bar basınçta 150 °C’ de 3 saat süresince preslenmiştir. Presleme işleminden sonra levha kalınlığı 1.6 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar belirlenen ölçülerde kesilmiş ve çapı 5 mm olan pim deliği, matkap yardımıyla delinerek, deney numuneleri hazırlanmıştır. 8 tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhada (her tabakanın kalınlığı 0.2 mm’ dir), cam elyafın ağırlığı 210 g/m², reçine oranı (V_f); 0.57’ dir. Prepregin toplam ağırlığı 370 g/m²’ dir.



Şekil 2.3. Cam fiber takviyeli dokuma epoksi prepreg kompozit levhayı oluşturan tabakalar

2.2.1. Numunelerin hazırlanma aşamaları

Sekiz tabakanın uygun şartlarda bir araya getirilmesi ile elde edilen cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levha, E/D oranı; 2, 3, 4, 5, K/D oranı; 2, 3, 4, M/D oranı; 1, 2, 3, 4 ve W/D oranı 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 ölçülerinde kesilmiştir. Kesilen numuneler, birbirine paralel çapı 5 mm olan iki delik, matkap yardımıyla delinerek hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri üç aşamada incelenmiş olup, her grupta 144 adet numune yer almaktadır. İlk aşamada kuru haldeki numuneler olup, bunlar çekme

testine tabi tutulmuşlardır. İkinci aşamada, numuneler üç ay boyunca deniz suyu içerisine bırakılmış ve süre sonunda çekme testine tabi tutulmuşlardır. Üçüncü aşamada ise numuneler altı ay boyunca deniz suyu içerisine bırakılmış ve süre bitiminde numuneler çekme testine tabi tutulmuşlardır. Testler 20 °C oda sıcaklığında ve ASTM D953 referansı ile yapılmıştır. Numuneler çekme hızı 1 mm/dakika olan, Instron 1114 model çekme test cihazında test edilmiştir (Şekil 2.4). İki paralel delikli cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit numuneler için çekme testi sırasında kullanılan pimin çapı 5 mm' lik olup, paslanmaz çelik malzemeden yapılmıştır. Belirlenen geometrik ölçülerde hazırlanan her numuneden üç adet yapılmış olup, test sonrası ortalamaları alınarak sonuçlara yansıtılmıştır. Her aşamada (48x3) adet farklı geometrik ölçülere sahip, 144 adet numune hazırlanmıştır. Toplamda 144 x 3 = 432 adet numune hazırlanmış ve teste tabi tutulmuştur. Yataklama gerilmelerini elde etmek için;

$$\sigma_b = \frac{P_{\max}}{D.t} \quad (2.1)$$

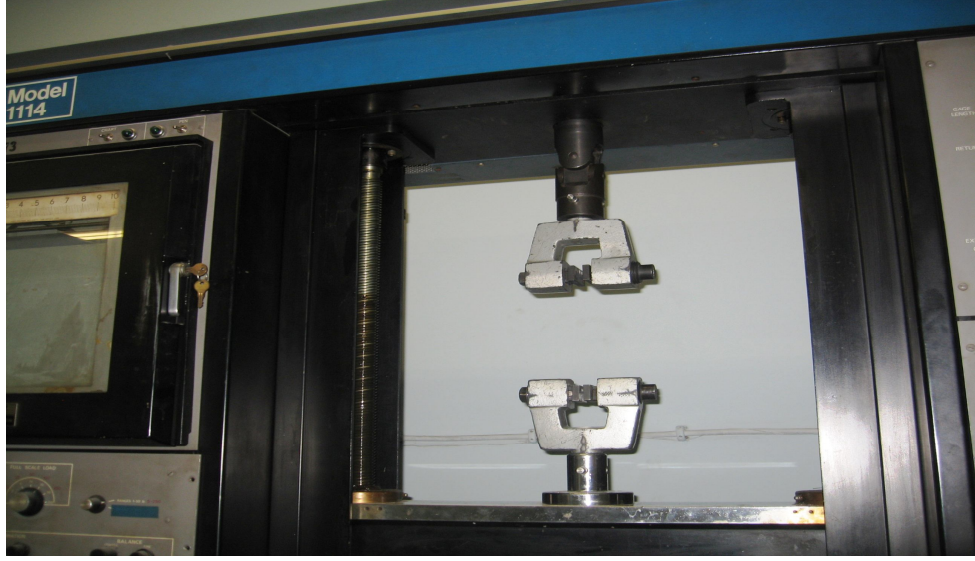
formülü ile hesaplama yapılmıştır. Burada;

$P_{\max}$ = hasar yükü

D = delik çapı

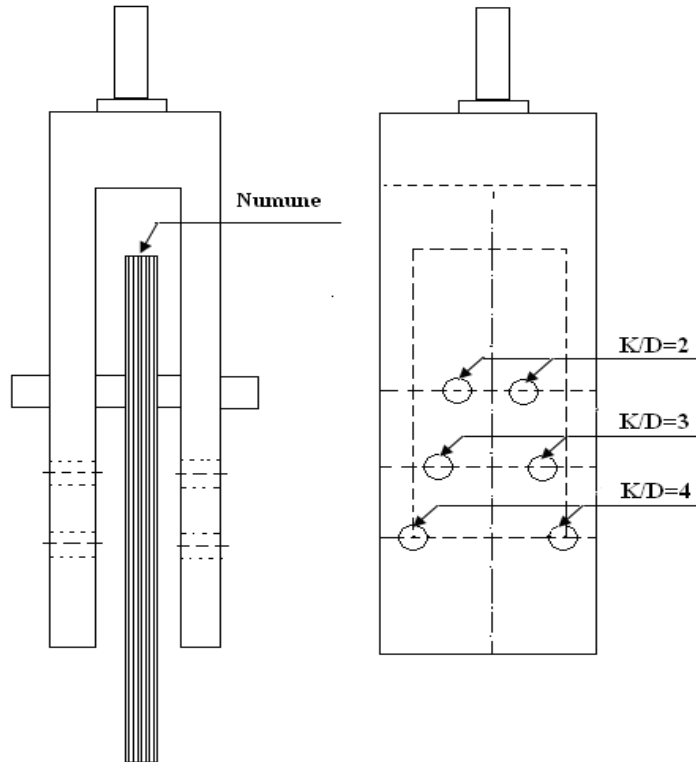
t = numune kalınlığı olarak belirtilmektedir.

Çekme testine tabi tutulmadan önce çeşitli geometrik boyutlarda hazırlanan numunelerin çekme cihazına bağlanması için ek bir aparat hazırlanmış ve kullanılmıştır. Bu aparat iki paralel delik merkezleri arasındaki mesafenin delik çapına oranı ($K/D= 2, 3, 4$) referans alınarak hazırlanmıştır. Bu aparatın çizim ve numune bağlantısı sırasıyla, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6' da gösterilmiştir.

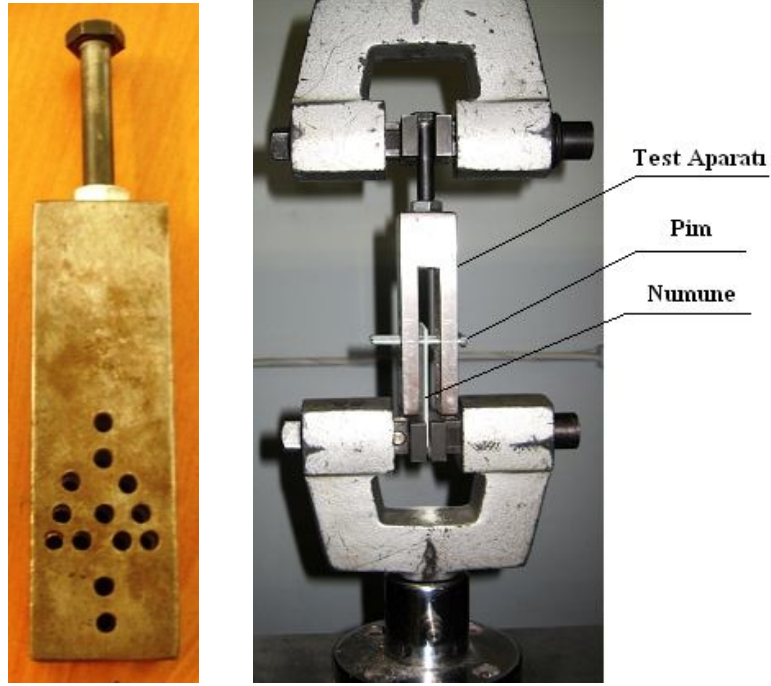


Şekil 2.4. Instron 1114 Model Çekme Test Cihazı

Bu çalışmanın deney düzeneği Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında hazırlanmış ve deneyler aynı yerde yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan deniz suyu İzmir Balçova-İnciraltı yerleşkesinden alınmıştır.



Şekil 2.5. İki paralel delikli pim bağlantılı numuneler için hazırlanan test aparatı

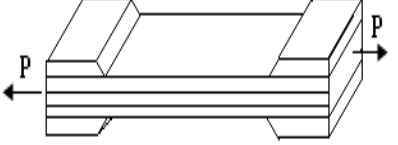
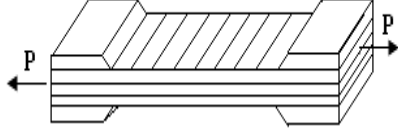
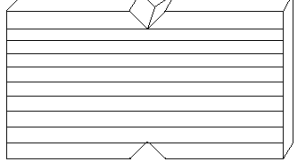
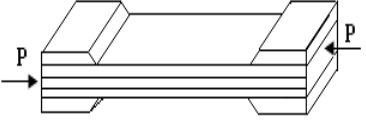
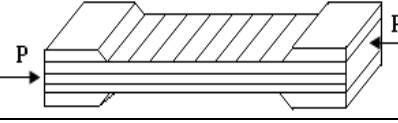


Şekil 2.6. Çekme testinde kullanılan aparat ve bağlantı şekli

2.3. Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Tespiti

Mekanik özelliklerin tespiti ve diğer deneysel çalışmalar için Instron marka 1114 model çekme test cihazı kullanılmıştır. Bu test cihazına bağlı bir bilgisayar yardımıyla veriler okunmaktadır. Statik deneyler için yükleme ve yer değiştirmeler bilgisayardan izlenebilmektedir. Şekil değiştirmeler ise strain-gauge kullanılarak ölçülmüştür. Her üç grup için mekanik özelliklerin tespit edilmesi için numuneler hazırlanmıştır. Bu hazırlanan numunelerin boyut ve geometrileri Tablo 2.1’ de [18, 69, 73] belirtilmiştir. Bu boyut ve geometriler referans alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.1. ASTM standartlarına göre numune boyutları

Özelliklerin belirlenmesi	Sembol	ASTM Test Metodu	Numune Geometrisi
Eksenel veya boyuna modül	E_1 (MPa)	ASTM 3039-76	
Eksenel poisson oranı	ν_{12} (-)		
Boyuna çekme gerilmesi	X_t (MPa)		
Enine modül	E_2 (MPa)	ASTM 3039-76	
Enine poisson oranı	ν_{12} (-)		
Enine çekme gerilmesi	Y_t (MPa)		
Kayma modülü	G_{12}	ASTM D 7078	
Kayma gerilmesi	S (MPa)		
Boyuna basma gerilmesi	X_c (MPa)	ASTM 3410-75	
Enine basma gerilmesi	Y_c (MPa)	ASTM 3410-75	

2.3.1. Çekme mukavemetinin ölçülmesi

Numunelerin mekanik özellikleri belirlenirken numune geometrileri ASTM standartlarına göre hazırlanmıştır. Çekme mukavemetinin belirlenmesi için hazırlanan numune geometrisi Şekil 2.7’ de görülmekte olup, ASTM 3039-76 test metoduna göre hazırlanmıştır. Her numuneden üçer tane yaptırılmıştır. Hazırlanan numune Instron 1114 model test cihazına bağlanmış ve 1 mm/dak hızla çekilmiştir. Çekme işlemi hasar

oluşuncaya kadar devam etmiş, hasarı oluşturan P çekme kuvvetleri kaydedilmiş ve X_t çekme mukavemeti aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

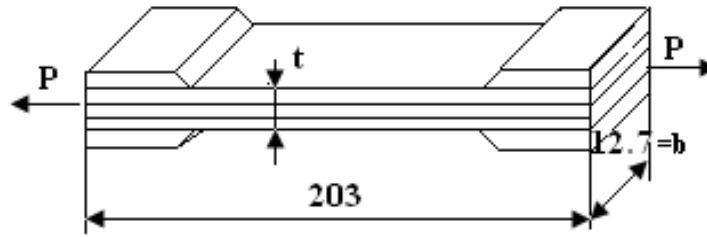
$$A = t.b \quad (2.2)$$

$$P_{ort} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (2.3)$$

$$X_t = \frac{P_{ort}}{A} \quad (2.4)$$

t = numune kalınlığı

b = numune eni



Şekil 2.7. Çekme mukavemetinin bulunması için hazırlanan test numunesinin geometrisi

Elastisite (E_1) modülünün bulunması için ASTM 3039-76 standardına göre hazırlanan numune üzerine iki adet strain-gauge özel yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. İndikatöre bağlanacak kablolar ile bu strain-gaugelerin bağlantısı yapılmış, numune iki özel çeneye yerleştirilerek ve Instron 1114 çekme cihazına bağlanılarak, teste tabi tutulmuştur (Şekil 2.8). Numune tek eksenli çekme yükü altında adım adım yüklenmiş ve uygulanan yük ve yer değiştirmeler dijital verilerden okunmuştur. Farklı noktalarda yapılan test uygulaması sırasında özel aralıklarla test makinası durdurulmuş, indikatörden okunan gerinim değerleri ile bilgisayar ekranından okunan kuvvet değerleri not edilerek, Elastisite modülü hesaplaması için kullanılmıştır. Elastisite modülü ve Poisson oranı hesaplaması için kullanılan eşitlik aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir.

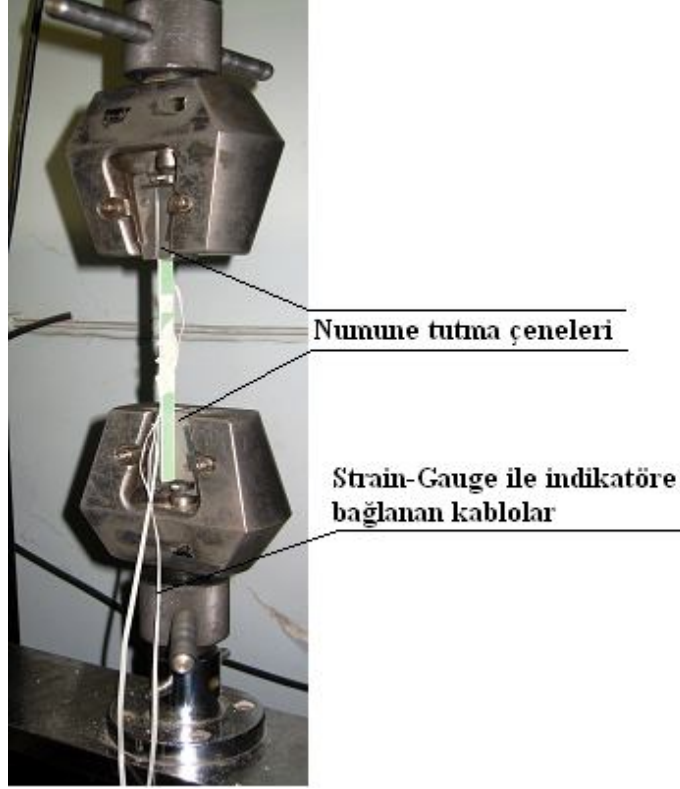
$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \Rightarrow E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (2.5)$$

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (2.6)$$

Burada;

A= Kesit alanı, mm²

P =Uygulanan Yük, N



Şekil 2.8. Elastisite modülü ve Poisson oranının tespitinin yapıldığı test düzeneği

2.3.2. Basma mukavemetinin ölçülmesi

Basma mukavemetinin belirlenmesi için hazırlanan numune geometrisi Şekil 2.9’ da görülmekte olup, ASTM 3410-75 test metoduna göre hazırlanmıştır. Malzemenin basma mukavemetinin bulunması sırasında burkulma olayının gerçekleşmesinin önüne geçmek testin sağlıklı yapılmasındaki zorluktur. Bu amaçla burkulmanın önüne geçmek amacıyla basma mukavemetini ölçmek için hazırlanan numuneler özel deney ekipmanlarına yerleştirilmiş (Şekil 2.10) ve test cihazına bağlanarak deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının ortalaması aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

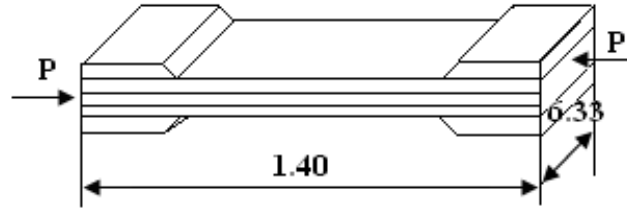
$$P_{ort} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (2.7)$$

$$A = t.b \quad (2.8)$$

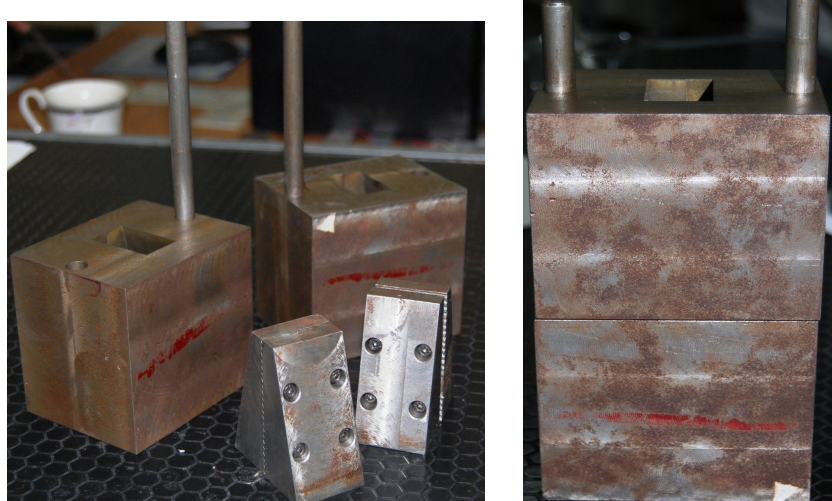
$$X_c = \frac{P_{ort}}{A} \quad (2.9)$$

t = numune kalınlığı

b = numune eni



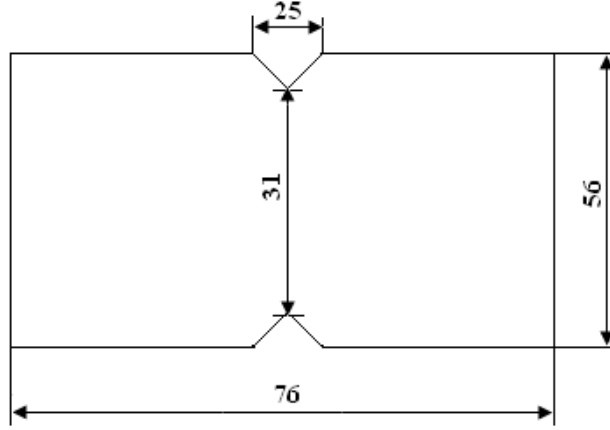
Şekil 2.9. Basma mukavemetinin bulunması için hazırlanan test numunesinin geometrisi



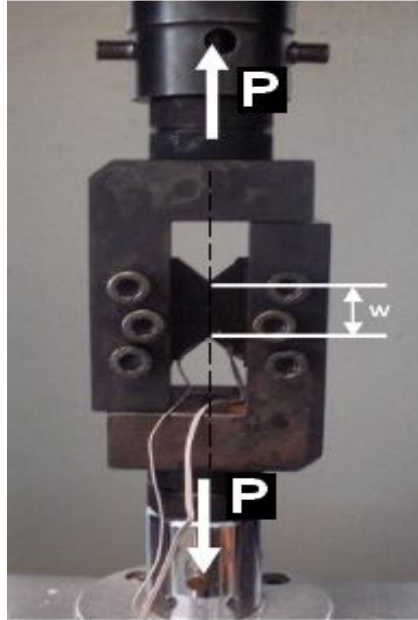
Şekil 2.10. Basma mukavemetinin bulunmasında numuneleri cihaza bağlamak için kullanılan yardımcı aparatlar

2.3.3. Kayma modülü ve mukavemetinin ölçülmesi

Kayma testi mekanik özelliklerin belirlenmesinde zor yapılan testlerden biridir. Kayma modülü ve mukavemetinin belirlenmesi için hazırlanan numune geometrisi Şekil 2.11’ de görülmekte olup, numuneler ASTM D7078 test metoduna göre hazırlanmıştır. Bu test için hazırlanan numuneler arcan test aparatlarına (Şekil 2.12) yerleştirmiş daha sonra Instron 1114 model çekme cihazına bağlanmıştır. Deneyde elde edilen verilerle kayma mukavemeti hesaplanmıştır.



Şekil 2.11. Kayma testi için numune geometrisi [65].



Şekil 2.12. Arcan test aparatları [61].

Kayma Modülü hesaplamasında yine Şekil 2.11' deki geometriye göre hazırlanan numunelere strain gaugeler özel yapıştırıcı ile yapıştırılmış. 10 kanallı olan ve aynı anda 10 tane strain gauge üzerinden ölçüm alınabilen strain indikatöre (Şekil 2.13) bu strain gaugelerin bağlantısı yapılarak, numune arcan test aparatına konulmuştur. Daha sonra bu aparat çekme cihazına bağlanmış ve adım adım yüklemeye tabi tutulmuştur. Farklı on nokta için test uygulaması sırasında spesifik aralıklarla test makinası durdurulmuş, indikatörden okunan gerinim değerleri ile bilgisayar ekranından okunan kuvvet değerleri not edilmiş, kayma modülü hesaplanması için kullanılmıştır. Kayma modülü hesaplaması için kullanılan eşitlik aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir.

$$P_{ort} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3)_{\max}}{3} \quad (2.10)$$

$$S_{12} = \frac{P_{ort}}{A}, \quad \tau = \frac{(P_{ort})_{linear}}{A} = G_{12} \cdot \gamma_{12} \quad (2.11)$$

$$\gamma_{12} = 2 \cdot \varepsilon \quad (2.12)$$

$$G_{12} = \frac{P}{2 \cdot A \cdot \varepsilon} \quad (2.13)$$

Burada;

P = Uygulanan yük, (N)

A = Numune kesit alanı, (mm²)

G₁₂= Kayma modülü, (MPa)

τ = Kayma gerilmesi, (MPa)

γ₁₂ = Kayma şekil değıştirmesi

S₁₂= Kayma mukavemeti, (MPa)



Şekil 2.13. Strain indikatörü

Her üç aşamada (kuru, 3 ay deniz suyu ve 6 ay deniz suyu) numunelerin mekanik özellikleri bu testler ve cihazlar yardımı ile elde edilmiştir.

3. BULGULAR

Bu bölümde iki paralel pim bağlantılı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar üzerinde çevresel koşulların etkisini incelemek amacıyla yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları anlatılmaktadır. Deneysel ve sayısal çalışmada, kompozit levha üzerinde geometrik parametrelerin etkisi, levhanın mekanik özellikleri, maksimum hasar yükleri ve hasar tipleri incelenmiştir. Aynı zamanda deniz suyunun bu belirtilen özellikler üzerindeki etkisi de incelenmiştir

3.1. İki Paralel Pim Bağlantılı Kompozit Levhalarda Deneysel Çalışma ve Sonuçları

Bu kısımda sekiz tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhanın deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Numuneler için geometrik parametreler; W/D oranı 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, K/D oranı 2, 3, 4, M/D oranı 1, 2, 3, 4 ve E/D oranı 2, 3, 4, 5 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma üç farklı ortamdaki numunelerle yapılmıştır. Kuru haldeki numuneler ile 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numuneler ayrı ayrı teste tabi tutulmuştur. Aynı özelliklere sahip üçer adet numunenin test sonucu ortalaması alınmıştır. 144 adet kuru, 144 adet 3 ay, 144 adette 6 ay deniz suyunda bekletilmiş numuneler olmak üzere 432 adet numune teste tabi tutulmuştur.

3.1.1. Deneysel sonuçlarda geometrik parametrelerin etkisi

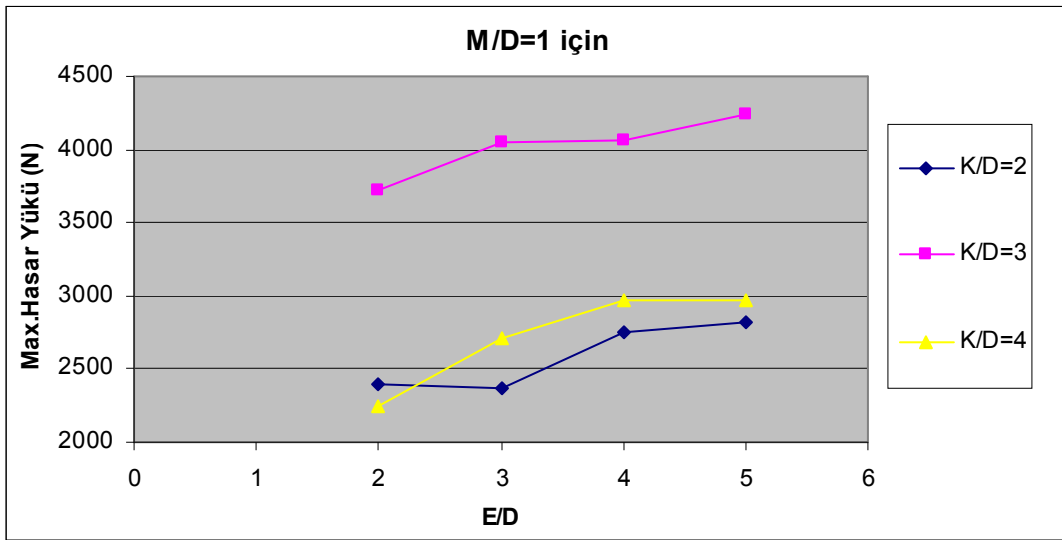
Pim bağlantılı iki paralel delikli sekiz tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar çekme testine tabi tutulmuştur. Her aşamada elde edilen sonuçlar grafiklere yansıtılmıştır. Bu çalışmada parametre olarak seçilen; W/D, E/D, M/D, K/D oranları arasında karşılaştırmalar yapılarak grafikler oluşturulmuştur.

3.1.1.1. Kuru numunelerde geometrik parametrelerin hasar yüküne etkisi

Kuru numunelerde M/D, K/D, E/D oranlarının kompozit levhanın hasar yüküne etkisi araştırılmış ve aşağıdaki şekillerde karşılaştırılması verilmiştir.

a) E/D oranının etkisi

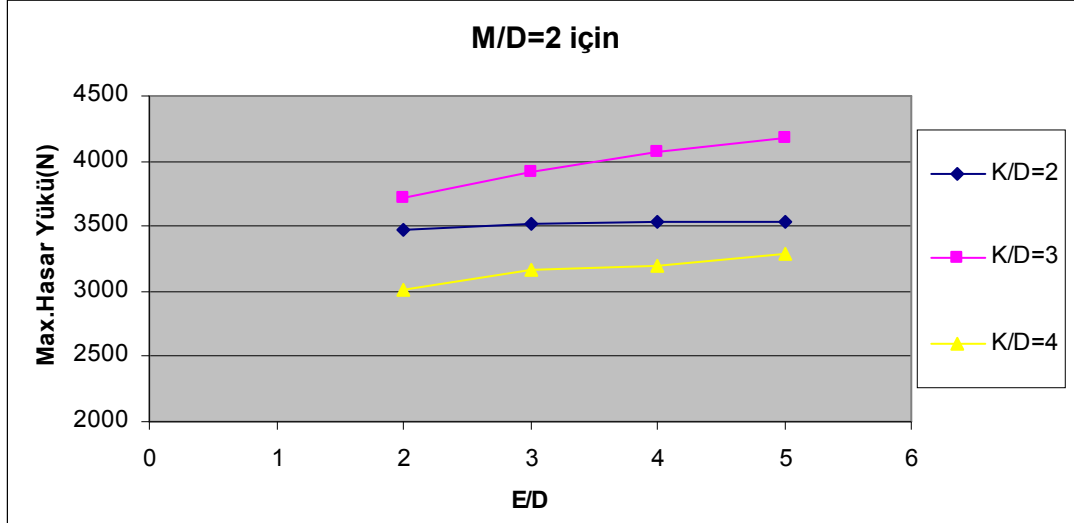
Şekil 3.1’ de $M/D=1$ için E/D oranlarına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken, E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2397 N elde edilirken, E/D= 5 ve K/D =2 olduğunda 2825 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=2 ve 5 için sırasıyla 3718 N ve 4244 N olarak elde edilmiştir. K/D =4 olduğunda E/D=2, 5 için ise sırasıyla 2247 ve 2972 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.1. $M/D=1$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.2’ de $M/D=2$ ve K/D oranı 2, 3, 4 olduğunda E/D’ ye bağlı olarak yüklerinin değişimi incelenmiştir. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3478 N elde edilirken, E/D=5 ve K/D=2 olduğunda 3541 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D = 2 ve 5 için sırasıyla 3721 N ve 4179 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5

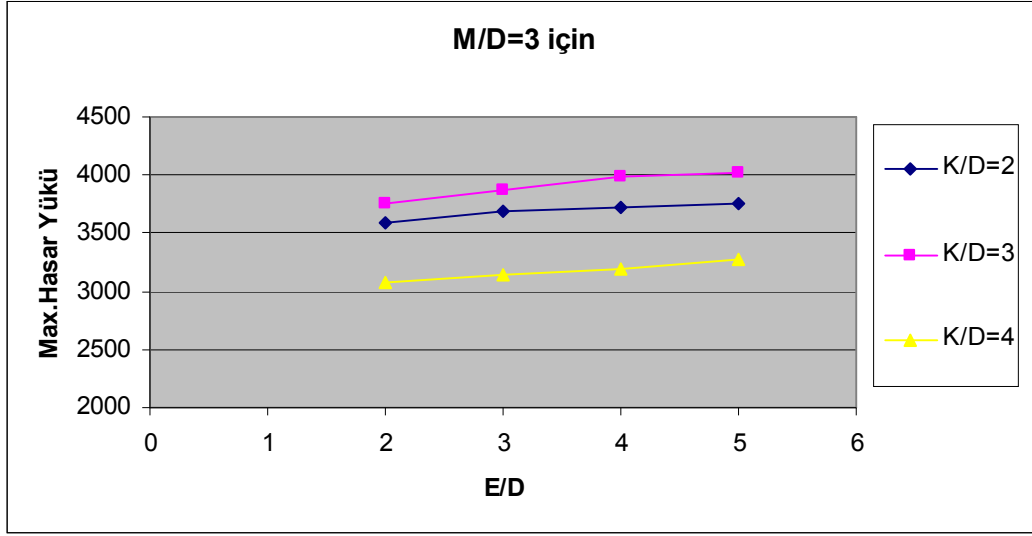
için ise sırasıyla 3009 N ve 3296 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.2. M/D=2 için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

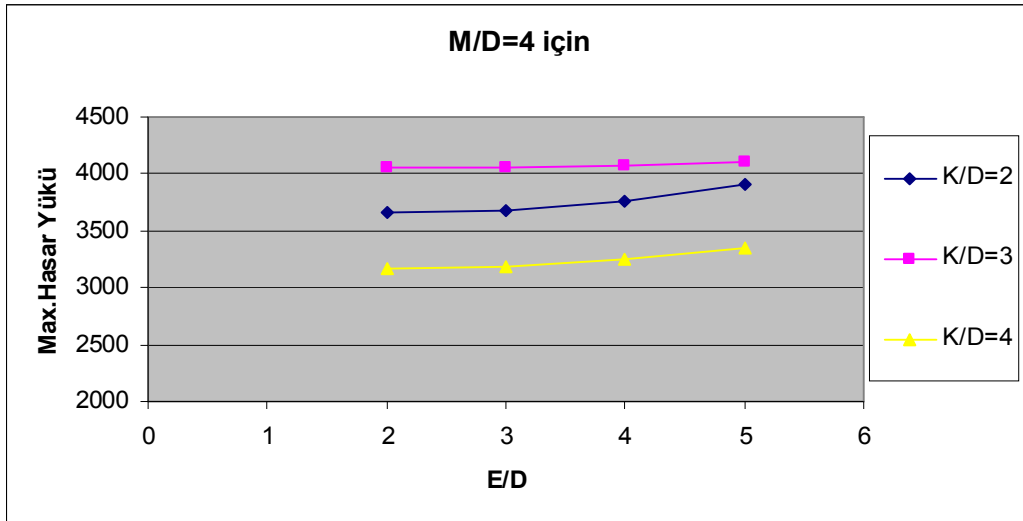
Şekil 3.3' de M/D=3 ve K/D oranı 2, 3, 4 olduğunda E/D' ye bağlı olarak maksimum hasar yüklerinin değişimi incelenmiştir. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3597 N elde edilirken, E/D= 5 ve K/D =2 olduğunda 3747 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=3 ve 5 için sırasıyla 3865 N ve 4022 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5 için ise sırasıyla 3071 N ve 3277 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.

Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.3. M/D=3 için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

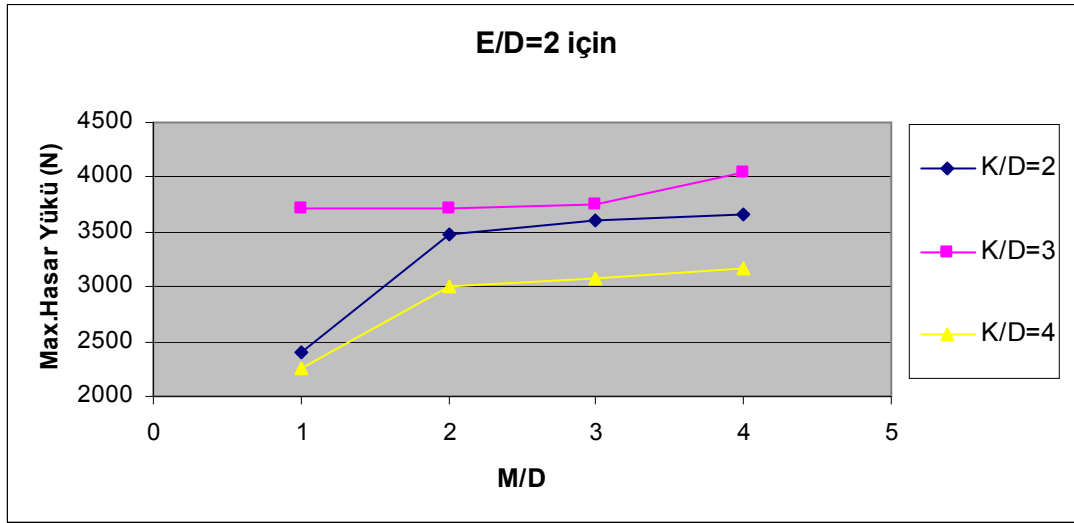
Şekil 3.4’ de M/D=4 ve K/D oranı 2, 3, 4 olduğunda E/D’ ye bağlı olarak maksimum hasar yüklerinin değişimi incelenmiştir. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3669 N elde edilirken, E/D=5 ve K/D=2 olduğunda 3904 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=2 ve 5 için sırasıyla 4048 N ve 4101 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5 için ise sırasıyla 3169 N ve 3355 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.4. M/D=4 için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

b) M/D oranının etkisi

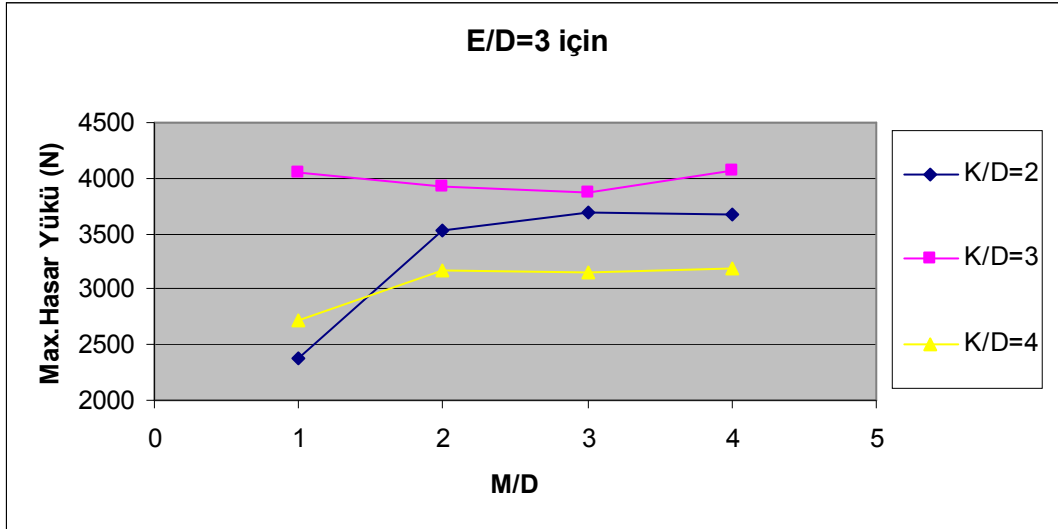
Şekil 3.5’ de $E/D=2$ olduğunda M/D oranlarına bağlı olarak maksimum hasar yüklerinin değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=4 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; M/D=1 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2397 N elde edilirken, M/D=4 ve K/D=2 olduğunda 3669 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de M/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda M/D=1 ve 4 için sırasıyla 3718 N ve 4048 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda M/D=1 ve 4 için ise sırasıyla 2247 N ve 3169 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte M/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.5. $E/D=2$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

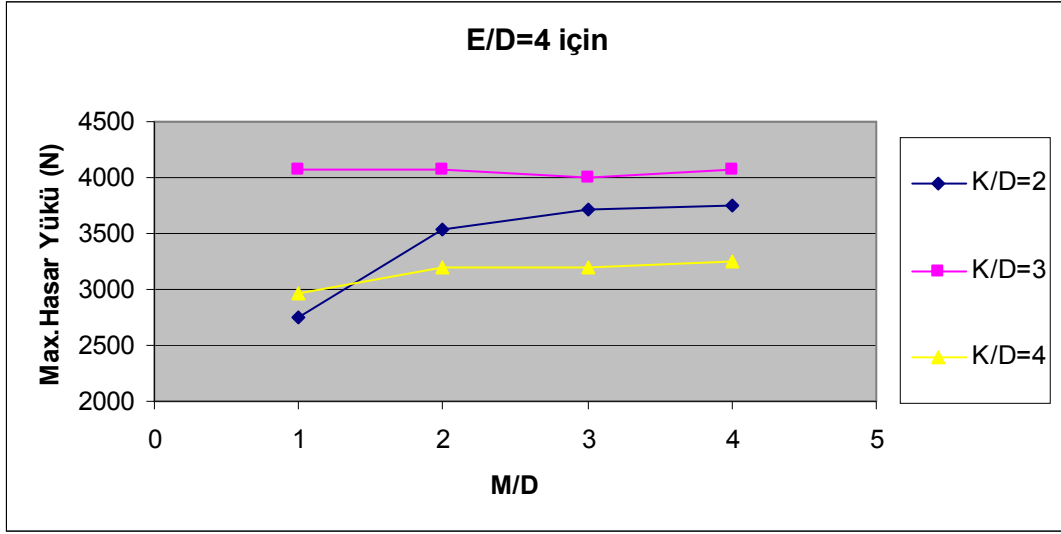
Şekil 3.6’ da $E/D=3$ olduğunda M/D oranlarına bağlı olarak maksimum hasar yüklerinin değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2371 N elde edilirken, M/D=4 ve K/D=2 olduğunda 3679 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de M/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda M/D=1 ve 4 için sırasıyla 4052 N ve 4061 N olarak elde edilmiştir. M/D=2 ve 3

oranlarında elde edilen hasar yüklerinin daha düşük olduğu, aralarındaki farkın çok az olduğu tespit edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için ise sırasıyla 2717 N ve 3179 N' luk maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



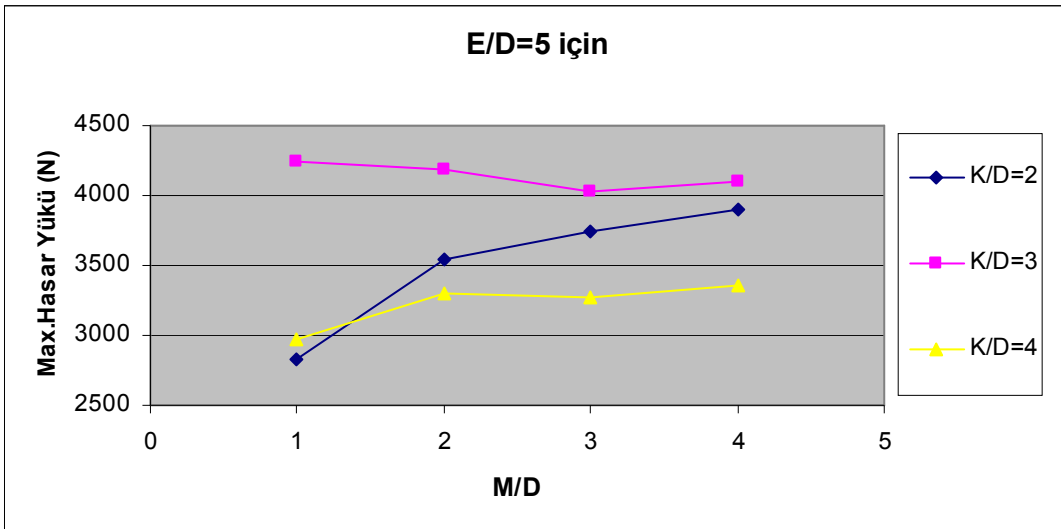
Şekil 3.6. E/D=3 için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.7' de E/D=4 olduğunda M/D oranlarına bağlı olarak maksimum hasar yüklerinin değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2747 N elde edilirken, $M/D=4$ ve $K/D=2$ olduğunda 3757 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de M/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D = 1$ ve 4 için sırasıyla 4067 N ve 4071 N olarak elde edilmiştir. Bu oranda $M/D=2$ ve 3 için ise sırasıyla 4078 N, 3993 N' luk hasar yükü elde edilmiştir. Grafikten ve sayısal değerlerden görüldüğü gibi hasar yükleri arasındaki fark oldukça azdır. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için ise sırasıyla 2969 N ve 3257 N' luk maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.7. E/D=4 için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.8’ de E/D=5 olduğunda M/D oranlarına bağlı olarak maksimum hasar yüklerinin değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için M/D=1 olduğunda maksimum hasar yükü 2825 N, M/D= 4 olduğunda ise 3904 N değerinde hasar yükü elde edilmiştir. K/D=3 olduğunda M/D=1 ve 4 için sırasıyla 4244 N ve 4101 N değerinde hasar yükleri elde edilmiştir. Bu oranda M/D=2 ve 3 için elde edilen değerlerde düzenli bir artışın olmadığı, ancak aradaki farkın çok küçük olduğu tespit edilmiştir. K/D=4 olduğunda M/D=1 ve 4 için ise sırasıyla 2972 N ve 3355 N’ luk maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Bu oranda da lineer bir artış olmayıp, çok düşük değerlerde bir artış ve azalış olduğu görülmektedir.

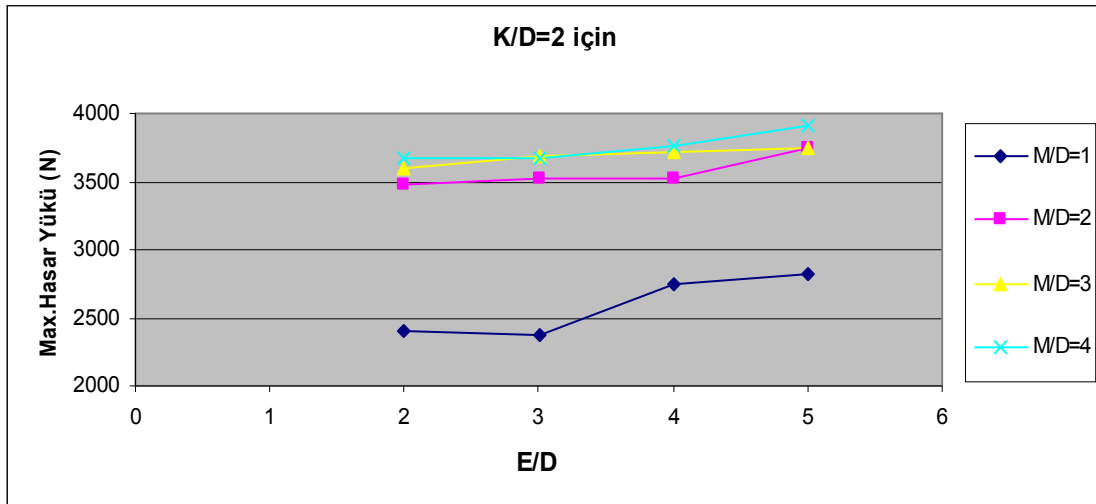


Şekil 3.8. E/D=5 için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Genel olarak M/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı gözlenmiştir. Ancak bu artış E/D oranı kadar ayırt edici değildir.

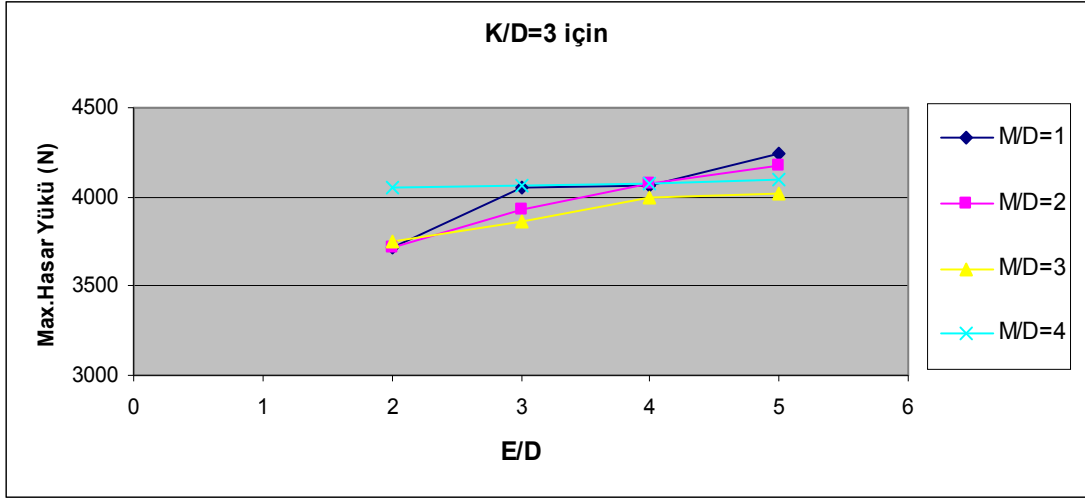
c) E/D, M/D, K/D oranları arasındaki ilişki ve hasar yüküne etkisi

Şekil 3.9’ da $K/D=2$ olduğunda E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=4 ve E/D=5 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; M/D=1 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2397 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 2825 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=4 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3669 N olarak elde edilirken, E/D=5 olduğunda bu değer 3904 N’ a yükselmiştir. Benzer şekilde artış M/D=2 ve 3 içinde gerçekleşmiştir.



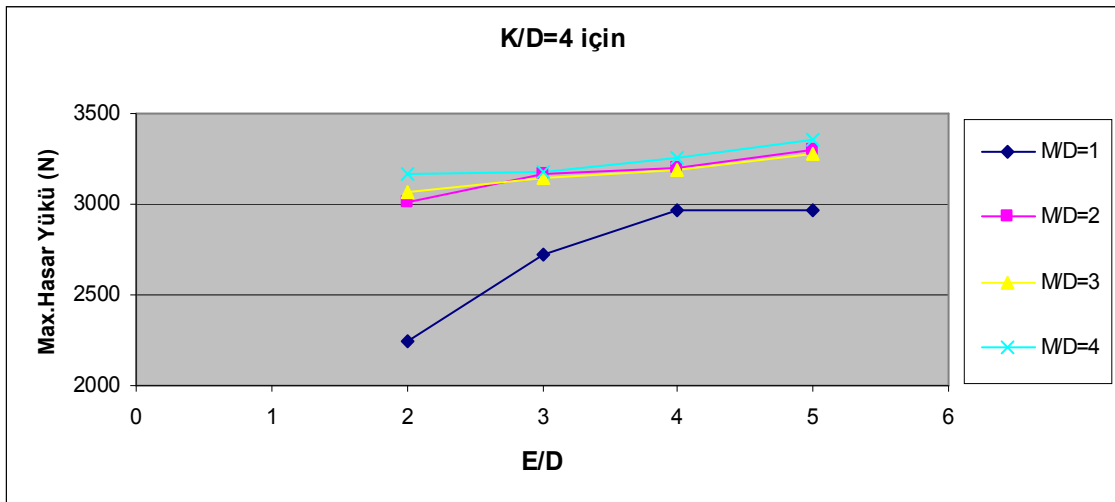
Şekil 3.9. $K/D=2$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.10’ da $K/D=3$ olduğunda E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=4 ve E/D=2 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; M/D=1 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3718 N elde edilirken, E/D= 5 olduğunda ise 4244 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=4 için, E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 4048 N olarak elde edilirken, E/D=5 olduğunda bu değer 4101 N’ a yükselmiştir. Benzer şekilde artış M/D=2 ve 3 içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.10. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.11’ de K/D=4 olduğunda E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=4 ve E/D=5 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; M/D=1 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2247 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 2972 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=4 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3169 N olarak elde edilirken, E/D=5 olduğunda bu değer 3355 N’ a yükselmiştir. Benzer şekilde M/D=2 ve 3 için E/D= 2, 3, 4, 5 oranlarına bağlı olarak hasar yükünün artış gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.11. K/D=4 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

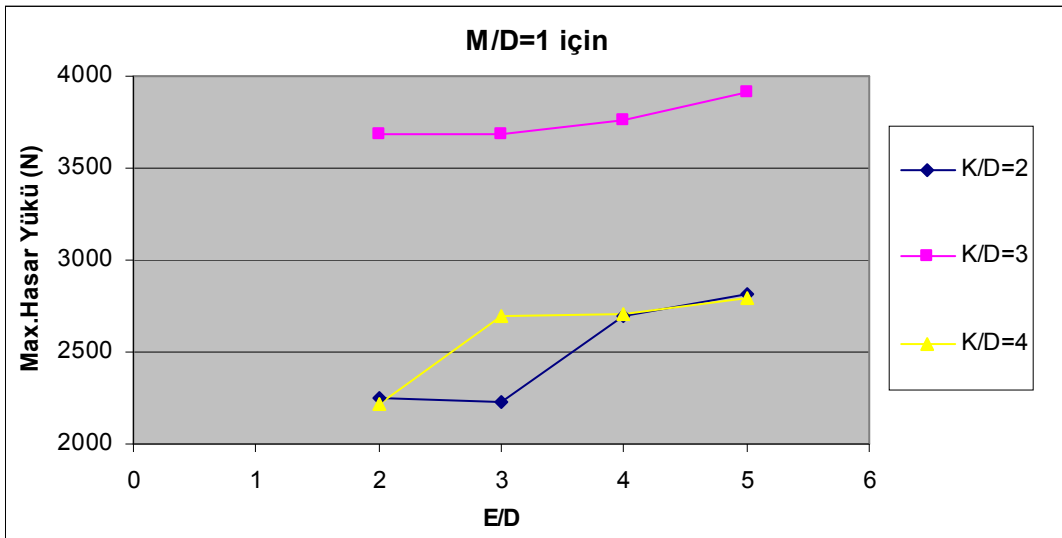
Genel olarak; K/D oranını sabit tutup, E/D ve M/D oranları artırıldığı zaman hasar yükünün de arttığı tespit edilmiştir.

3.1.1.2. Deniz suyunda 3 ay bekletilen numunelerde geometrik parametrelerin hasar yüküne etkisi

3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde M/D, K/D, E/D oranlarının kompozit levhanın hasar yüküne etkisi araştırılmış ve aşağıdaki şekillerde karşılaştırılması verilmiştir.

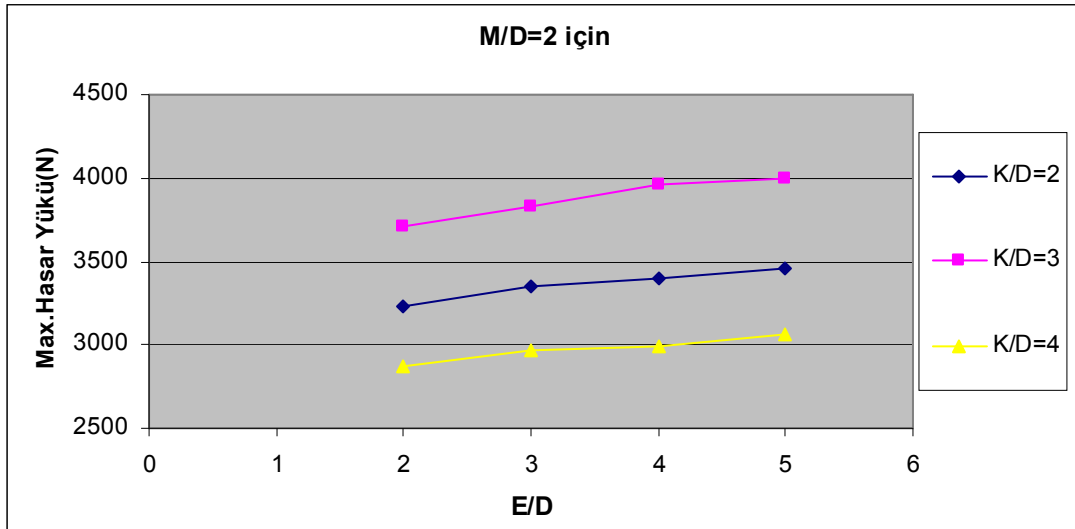
a) E/D oranının etkisi

Şekil 3.12’ de M/D=1 için E/D ve K/D’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. K/D oranları 2, 3, 4 olarak alınmıştır. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2247 N elde edilirken, E/D=5 ve K/D=2 olduğunda ise 2815 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=2 ve 5 için sırasıyla hasar yükü 3682 N ve 3914 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5 için ise sırasıyla 2217 N ve 2796 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



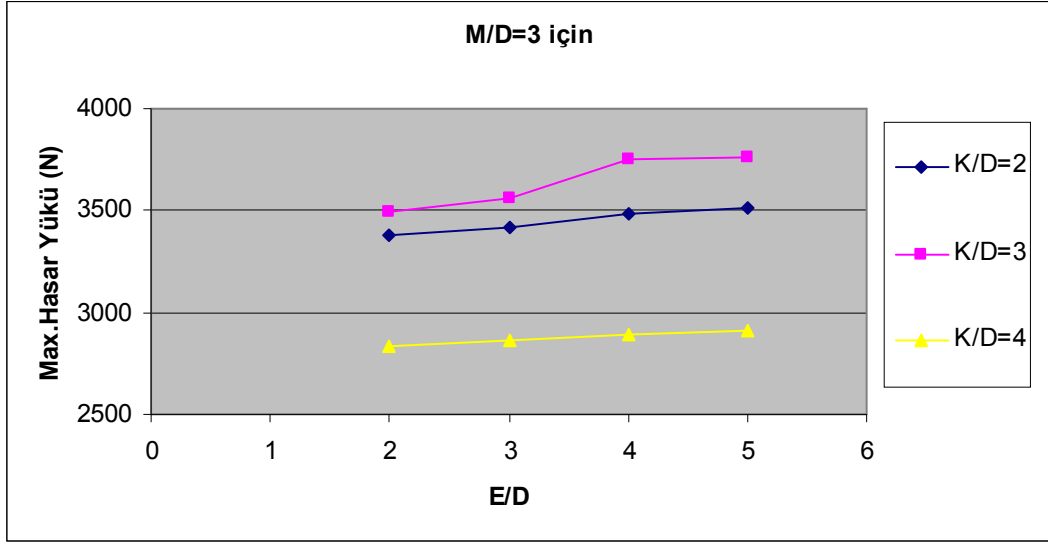
Şekil 3.12. M/D=1 için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.13’ de $M/D=2$, K/D oranı 2, 3, 4 olduğunda E/D ’ ye bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi görülmektedir. $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $E/D=5$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $E/D=2$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 3231 N elde edilirken, $E/D=5$ ve $K/D=2$ olduğunda 3463 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış $K/D=3$ ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $E/D=2$ ve 5 için sırasıyla hasar yükü 3708 N ve 4002 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $E/D=2$ ve 5 için ise sırasıyla 2875 N ve 3061 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



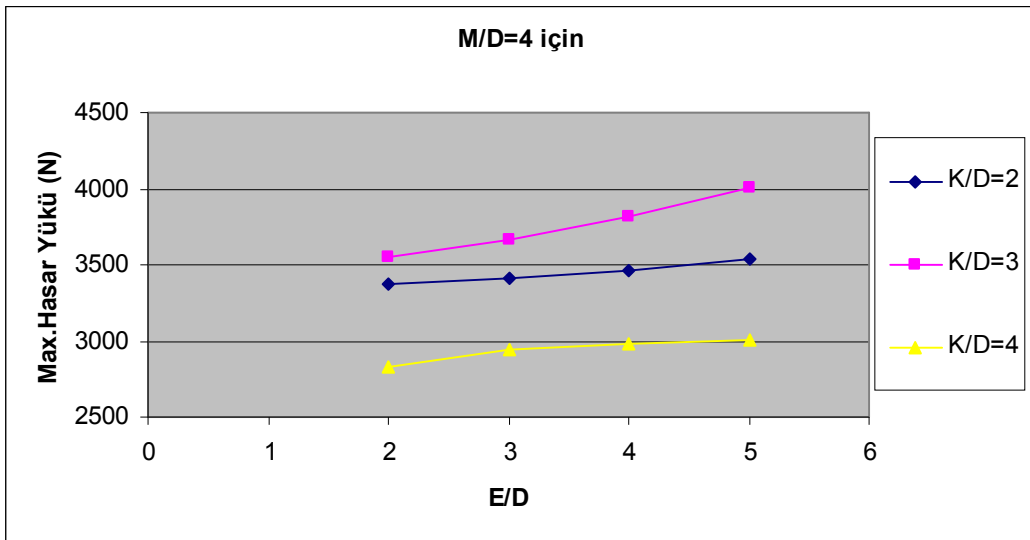
Şekil 3.13. $M/D=2$ için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.14’ de $M/D=3$ ve K/D oranı 2, 3, 4 olduğunda E/D ’ ye bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi görülmektedir. $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $E/D=5$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $E/D=2$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 3381 N elde edilirken, $E/D=5$ ve $K/D=2$ olduğunda 3508 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış $K/D=3$ ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $E/D=2$ ve 5 için sırasıyla hasar yükü 3489 N ve 3762 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $E/D=2$ ve 5 için ise sırasıyla 2835 N ve 2914 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.14. M/D=3 için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.15’ de M/D=4, K/D oranı 2, 3, 4 olduğunda E/D’ ye bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi görülmektedir. E/D oranı 2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3375 N elde edilirken, E/D=5 ve K/D=2 olduğunda 3541 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D= 2 ve 5 için hasar yükü sırasıyla 3552 N ve 4002 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5 için ise sırasıyla 2835 N ve 3005 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.

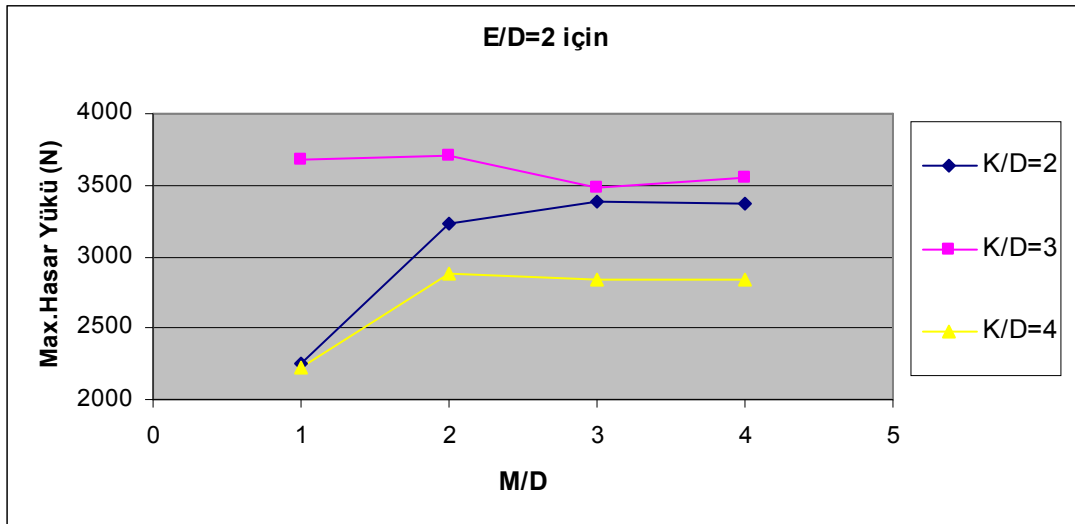


Şekil 3.15. M/D=4 için E/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Her dört grafikteki sonuçlar aynı parametrelerdeki kuru numunelerin sonuçları ile karşılaştırıldığında; 3 ay deniz suyuna konulan numunelerin maksimum hasar yüklerinin kuru numuneye göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

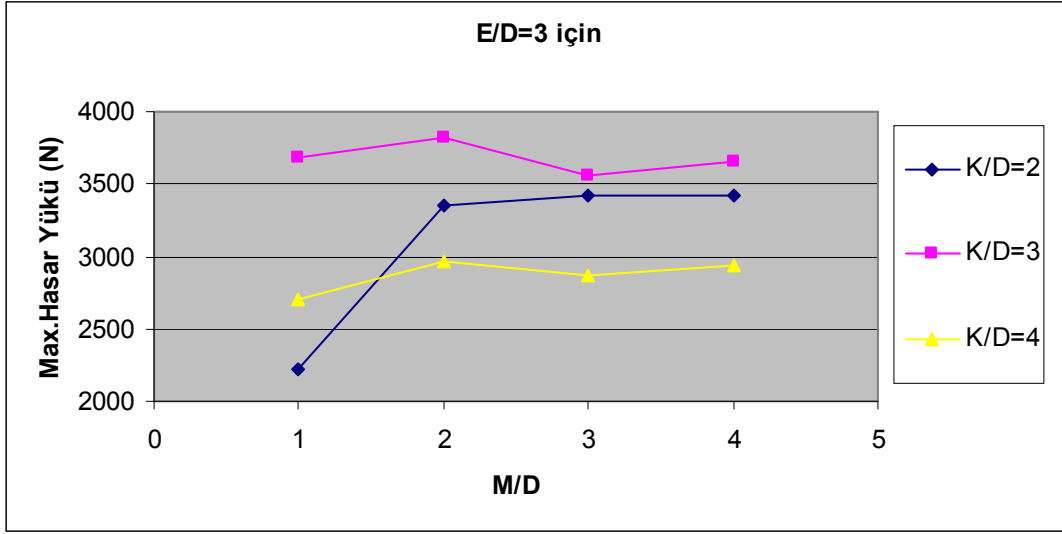
b) M/D oranının etkisi

Şekil 3.16' da $E/D=2$ için M/D oranına bağlı olarak hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2247 N elde edilirken, M/D=4 ve K/D=2 olduğunda 3375 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. K/D=3 olduğunda M/D=1 ve 4 için sırasıyla 3682 N ve 3552 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda M/D=1 ve 4 için ise sırasıyla 2217 N ve 2835 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



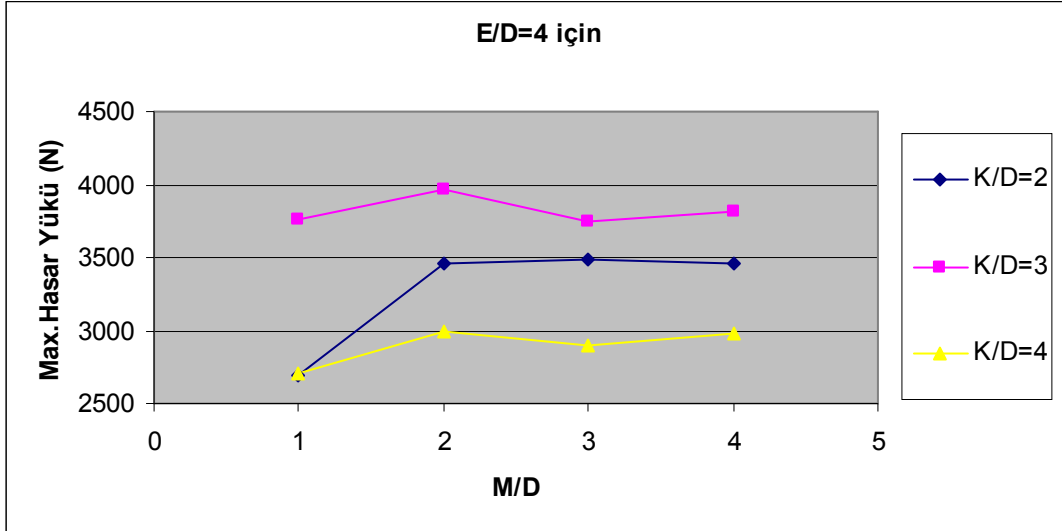
Şekil 3.16. $E/D=2$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.17' de $E/D=3$ için M/D oranına bağlı olarak hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2227 N elde edilirken, M/D=4 ve K/D=2 olduğunda 3414 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. K/D=3 olduğunda M/D=1 ve 4 için sırasıyla 3689 N ve 3659 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda M/D=1 ve 4 için ise sırasıyla 2698 N ve 2943 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.17. E/D=3 için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

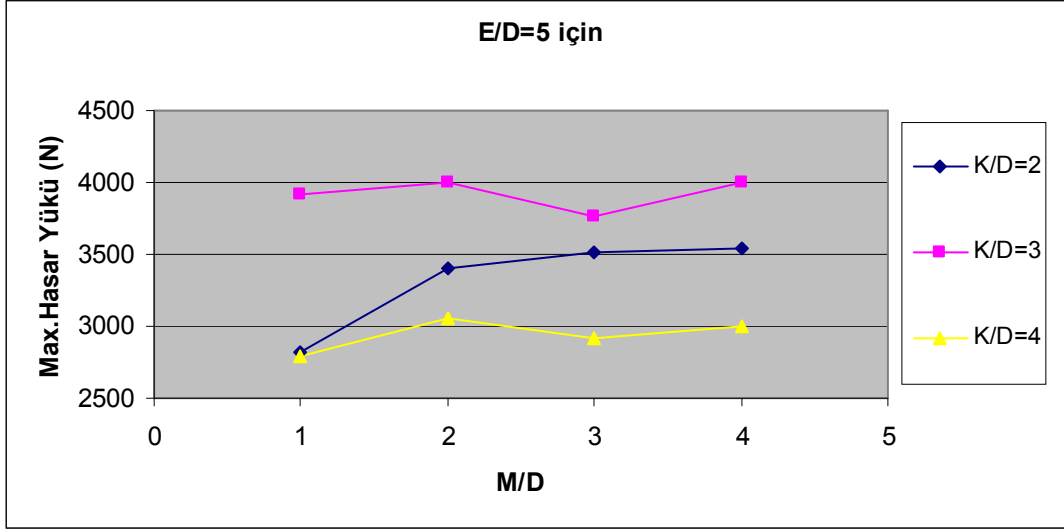
Şekil 3.18’ de E/D=4 için M/D oranına bağlı olarak hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2693 N elde edilirken, M/D=4 ve K/D=2 olduğunda 3463 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. K/D=3 olduğunda M/D=1 ve 4 için sırasıyla 3762 N ve 3819 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda M/D=1 ve 4 için ise sırasıyla 2711 N ve 2977 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.18. E/D=4 için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.19’ da E/D=5 için M/D oranına bağlı olarak hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve K/D=2 olduğunda maksimum

hasar yükü 2815 N elde edilirken, $M/D=4$ ve $K/D=2$ olduğunda 3541 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için sırasıyla 3914 N ve 4002 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için ise sırasıyla 2796 N ve 3005 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.

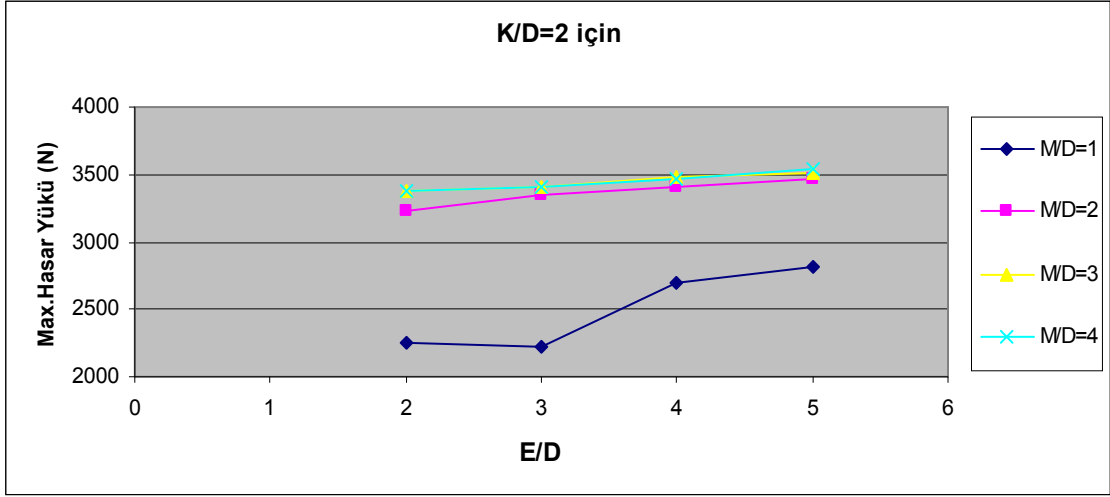


Şekil 3.19. $E/D=5$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Yukarıdaki grafikler incelendiği zaman $M/D=2$ ' de artış gerçekleşmiş ancak $M/D=3$ ve 4 olduğunda düşme ve artışlar meydana gelmiştir. Her dört grafikteki sonuçlar aynı parametrelerdeki kuru numunelerin sonuçları ile karşılaştırıldığında; 3 ay deniz suyuna konulan numunelerin maksimum hasar yük değerlerinin kuru numunelerden elde edilen değerlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

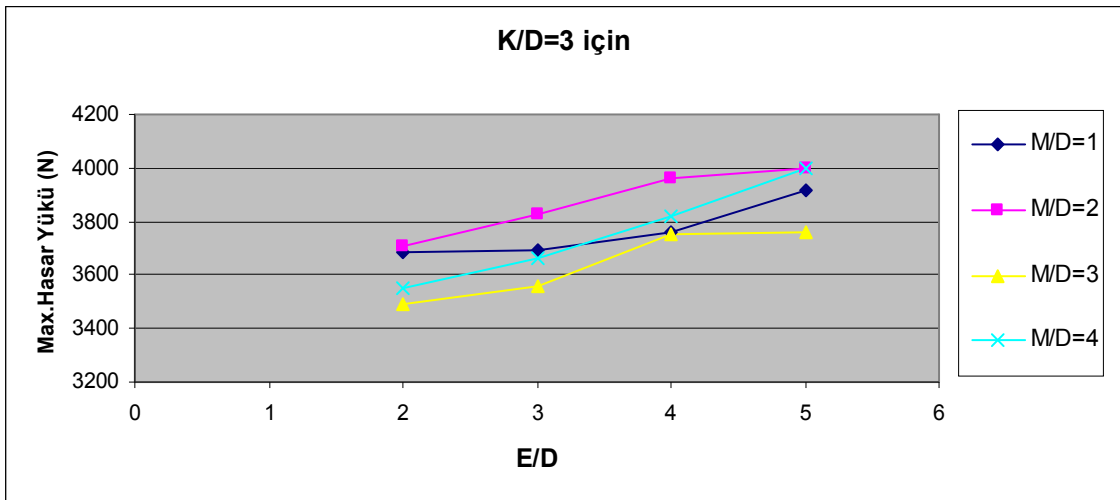
c) E/D , M/D , K/D oranları arasındaki ilişki ve hasar yüküne etkisi

Şekil 3.20' de $K/D=2$ olduğunda E/D ve M/D ' ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $M/D=4$ ve $E/D=5$ olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $M/D=1$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2247 N elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda ise 2815 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $M/D=4$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 3375 N olarak elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda bu değer 3541 N' a yükselmiştir. Benzer şekilde artış $M/D=2$ ve 3 içinde gerçekleşmiştir.



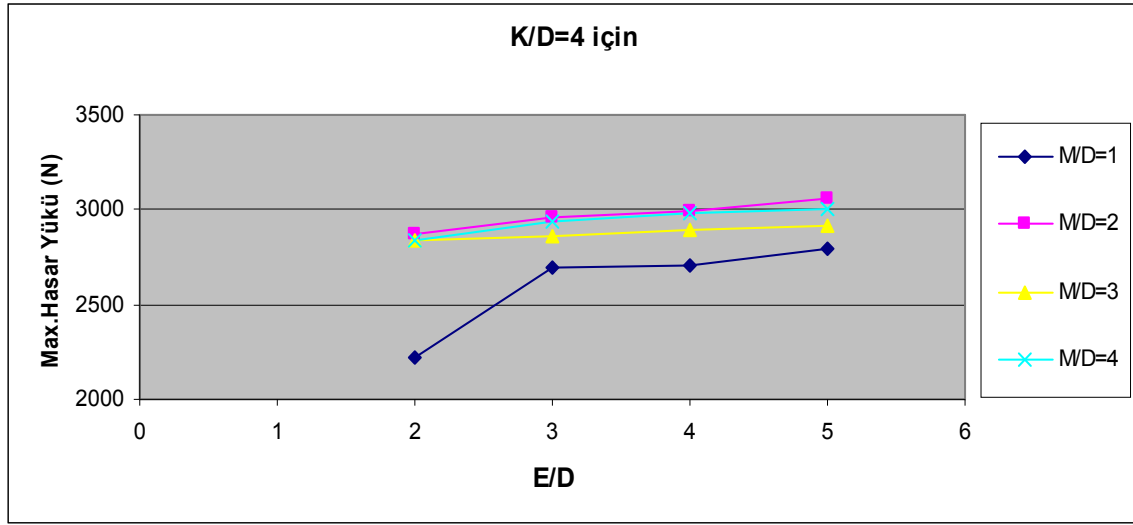
Şekil 3.20. K/D=2 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.21’ de K/D=3 olduğunda E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=4 ve E/D=5 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; M/D=1 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3682 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 3914 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=4 ve E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3552 N olarak elde edilirken, E/D=5 olduğunda bu değer 4002 N’ a yükselmiştir. Benzer şekilde artış M/D=2 ve 3 içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.21. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.22’ de $K/D=4$ olduğunda E/D ve M/D ’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $M/D=4$ ve $E/D=5$ olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $M/D=1$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2217 N elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda ise 2796 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $M/D=4$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2835 N olarak elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda bu değer 3005 N’ a yükselmiştir. Benzer şekilde artış $M/D=2$ ve 3 içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.22. $K/D=4$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

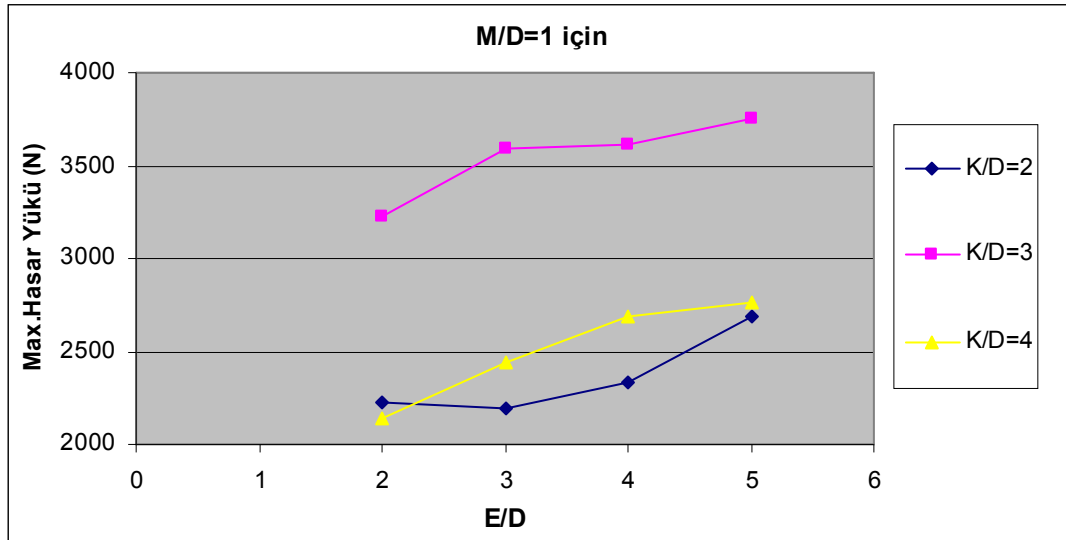
Grafikteki sonuçlara bakıldığında zaman $K/D=2, 3, 4$ oranları için E/D ve M/D oranlarının artması ile hasar yüklerinin arttığı görülmüştür. Ancak aynı parametrelerdeki kuru numunelerin sonuçları ile karşılaştırıldığında; 3 ay deniz suyuna konulan numunelerin maksimum hasar yük değerlerinin kuru numunelerde elde edilen değerlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

3.1.1.3. Deniz suyunda 6 ay bekletilen numunelerde geometrik parametrelerin hasar yüküne etkisi

6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numunelerde M/D , K/D , E/D oranlarının kompozit levhanın hasar yüküne etkisi araştırılmış ve aşağıdaki şekillerde karşılaştırılması verilmiştir.

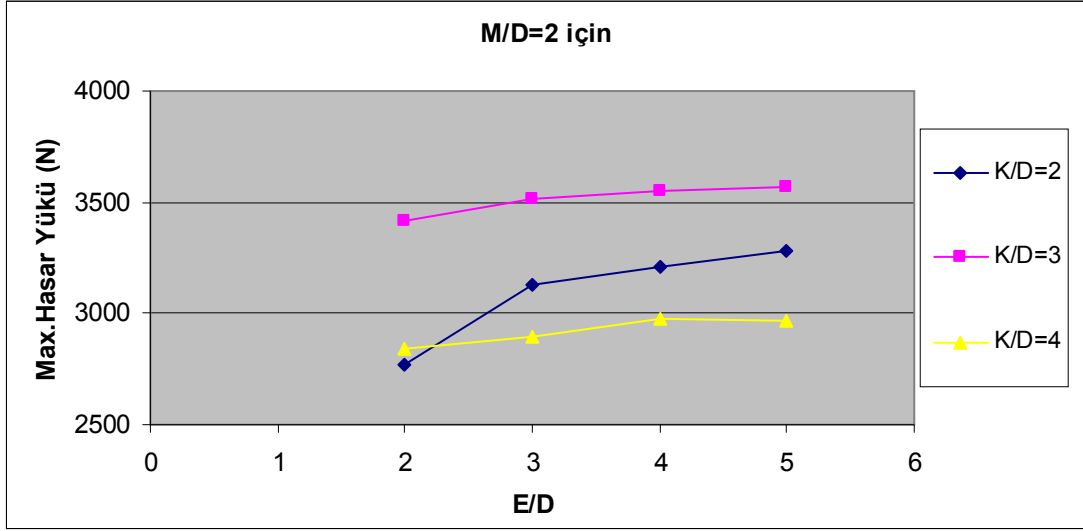
a) E/D oranının etkisi

Şekil 3.23’ de $M/D=1$ için E/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2222 N elde edilirken, E/D=5 ve K/D=2 olduğunda 2688 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=2 ve 5 için sırasıyla 3231 N, 3757 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5 için ise sırasıyla 2139 N, 2766 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



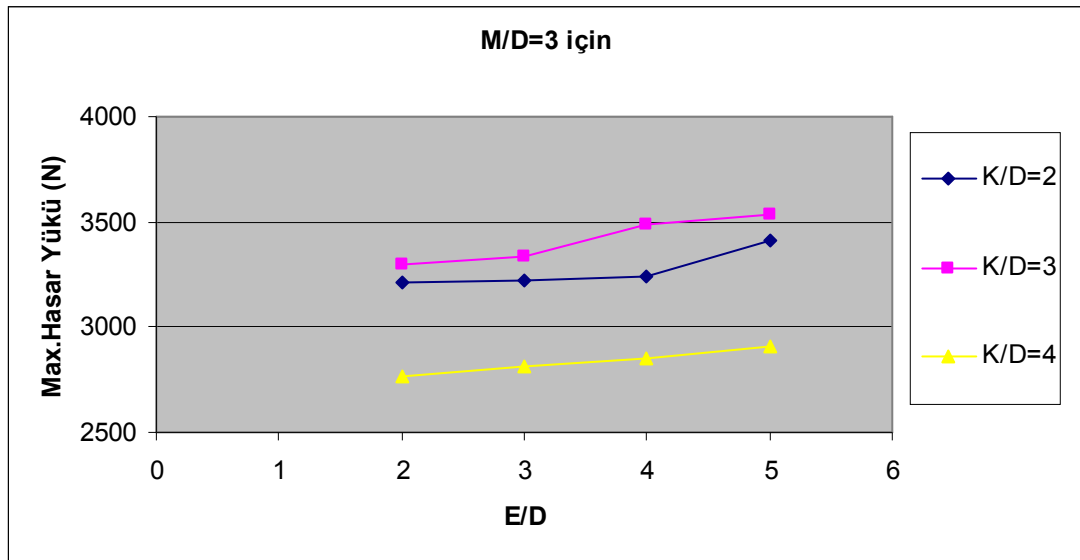
Şekil 3.23. $M/D=1$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.24’ de $M/D=2$ için E/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2770 N elde edilirken, E/D=5 ve K/D=2 olduğunda 3277 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış K/D=3 ve 4 için de E/D oranının artmasına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=2 ve 5 için sırasıyla 3414 N ve 3571 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5 için ise sırasıyla 2838 N ve 2963 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



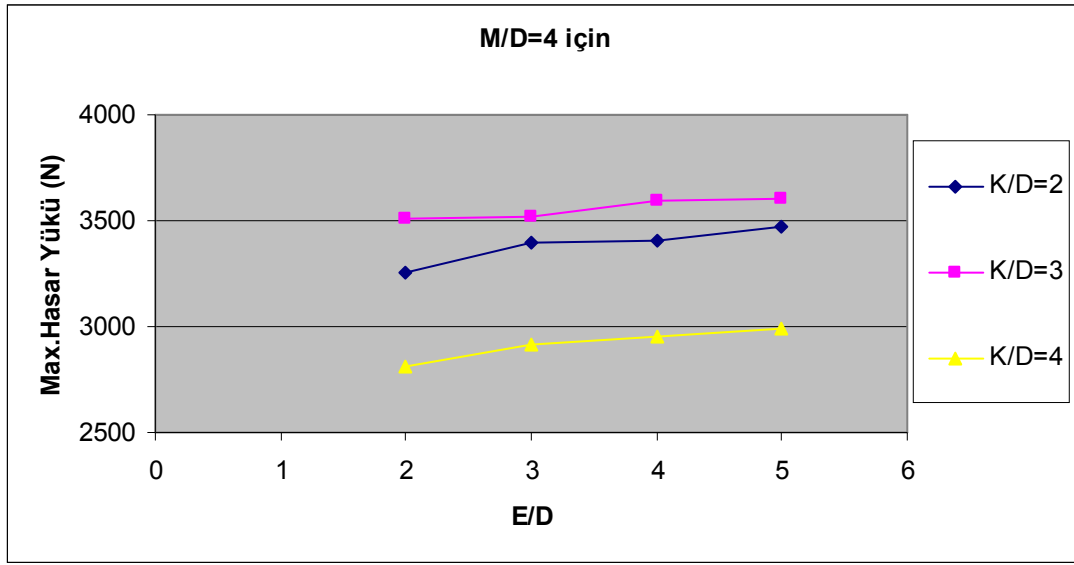
Şekil 3.24. M/D=2 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.25’ de M/D=3 için E/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; E/D=2 ve K/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3208 N elde edilirken, E/D=5 ve K/D=2 olduğunda 3414 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=2 ve 5 için sırasıyla 3296 N ve 3532 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2 ve 5 için ise sırasıyla 2766 N ve 2904 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.25. M/D=3 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.26’ da $M/D=4$ için E/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $E/D=5$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $E/D=2$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 3252 N elde edilirken, $E/D=5$ ve $K/D=2$ olduğunda 3472 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $E/D=2$ ve 5 için sırasıyla 3508 N ve 3600 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $E/D=2$ ve 5 için ise sırasıyla 2815 N ve 2992 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikte E/D oranının artması ile birlikte hasar yükünün arttığı görülmektedir.



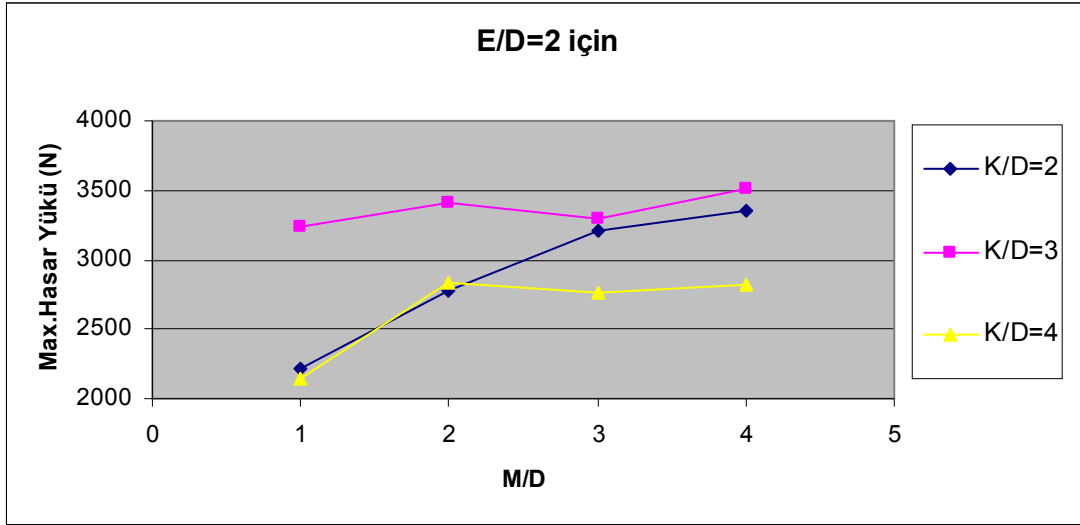
Şekil 3.26. $M/D=4$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı grafiklerden de görülmekte olup, 3 ay deniz suyuna konulan numunelerden elde edilen hasar yük değerlerinin kuru numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

b) M/D oranının etkisi

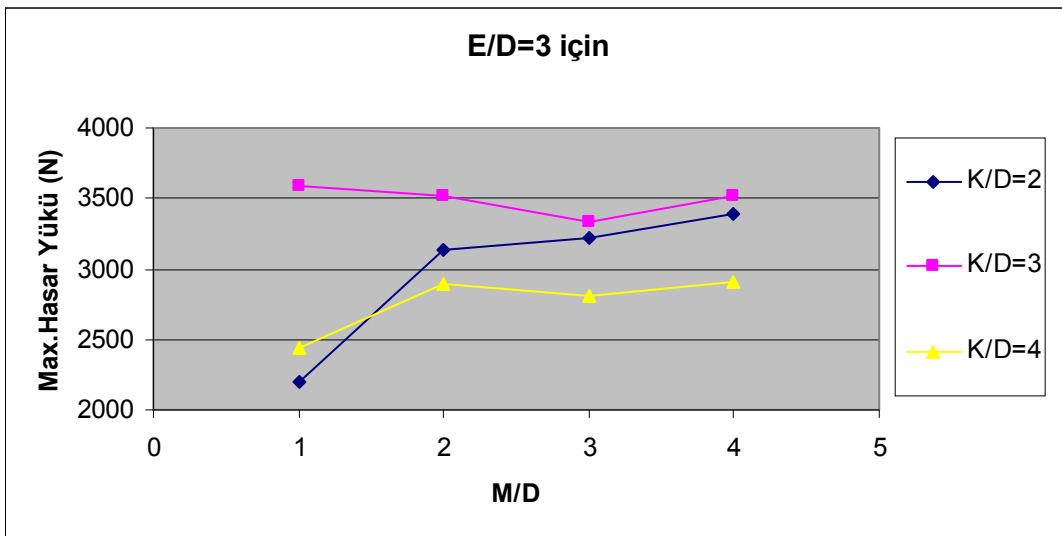
Şekil 3.27’ de $E/D=2$ için M/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2222 N elde edilirken, $M/D=4$ ve $K/D=2$ olduğunda 3352 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için sırasıyla 3231 N ve 3508 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için ise sırasıyla 2139 N,

2815 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $K/D=3$ için $E/D=3$ olduğunda düşme meydana gelmiş ise de aradaki farkın oldukça az olduğu tespit edilmiştir.



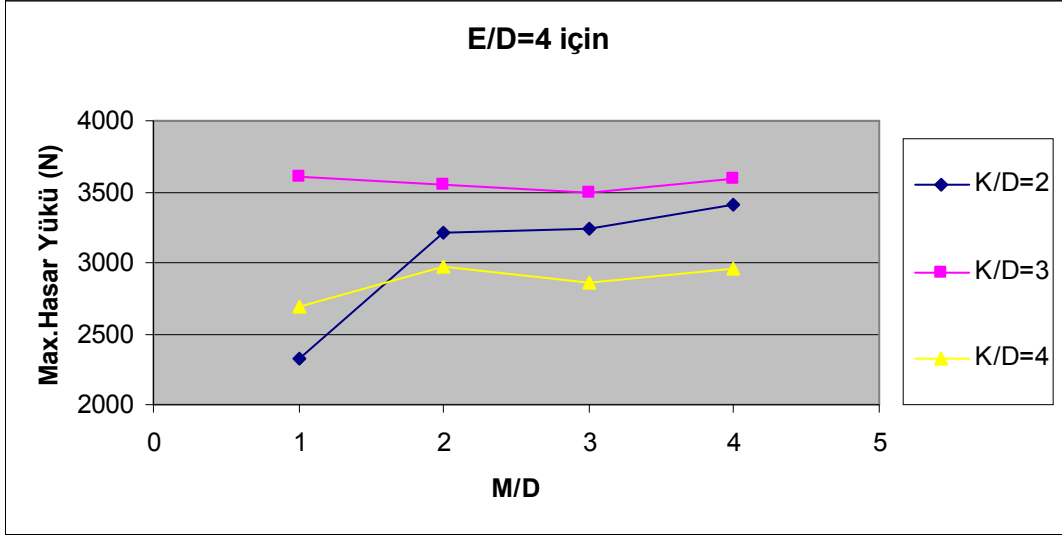
Şekil 3.27. $E/D=2$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.28' de $E/D=3$ için M/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2197 N elde edilirken, $M/D=4$ ve $K/D=2$ olduğunda 3394 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için sırasıyla 3590 N ve 3515 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için ise sırasıyla 2439 N ve 2914 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.28. $E/D=3$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

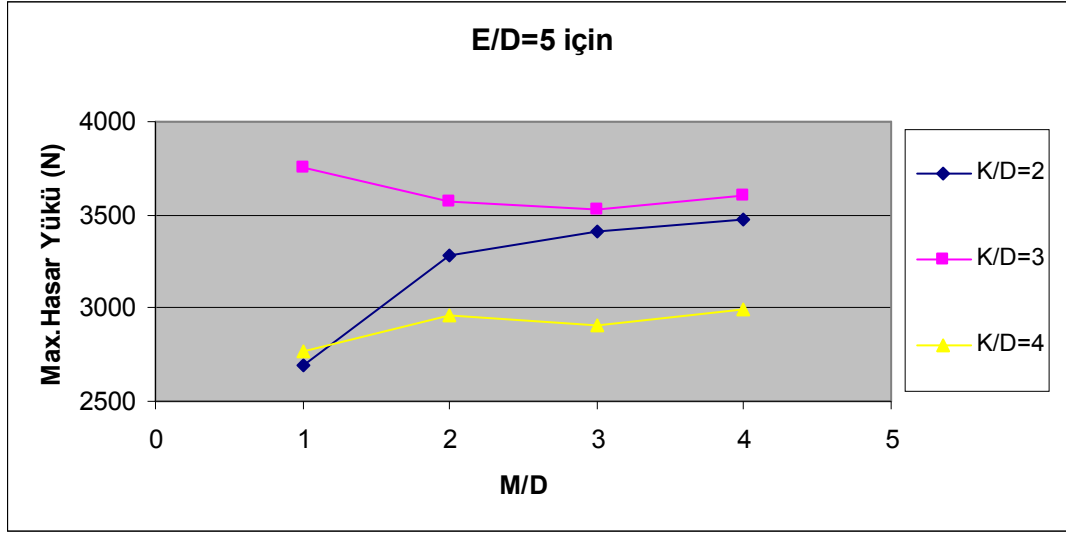
Şekil 3.29’ da $E/D=4$ için M/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2328 N elde edilirken, $M/D=4$ ve $K/D=2$ olduğunda 3410 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için sırasıyla 3610 N ve 3590 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için ise sırasıyla 2688 N ve 2956 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.29. $E/D=4$ için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.30’ da $E/D=5$ için M/D oranına bağlı olarak maksimum hasar yükünün değişimi incelenmiştir. K/D oranı 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $K/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2688 N elde edilirken, $M/D=4$ ve $K/D=2$ olduğunda 3472 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için sırasıyla 3757 N ve 3600 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1$ ve 4 için ise sırasıyla 2766 N ve 2992 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.

Grafikte M/D oranının artması ile birlikte maksimum hasar yükünün de arttığı görülmektedir.

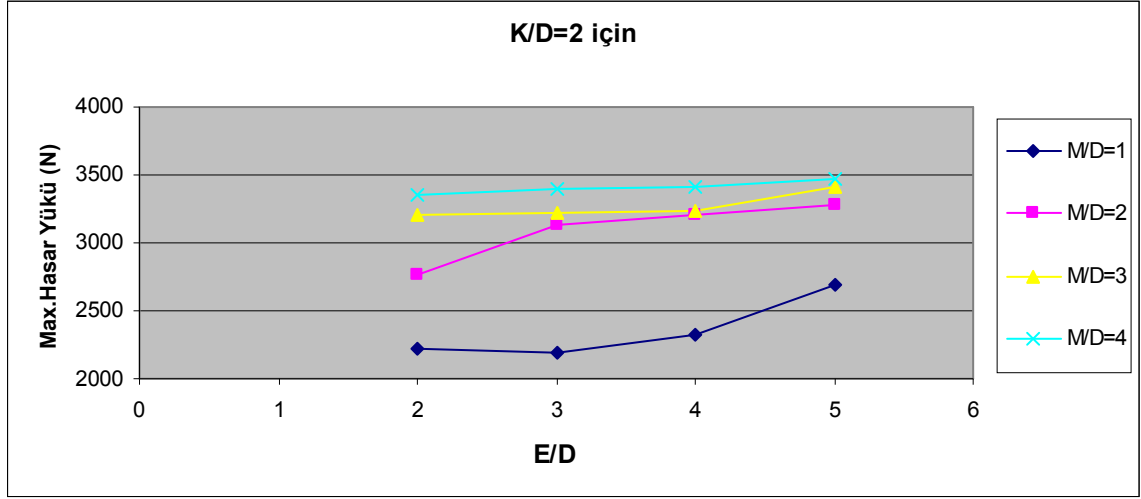


Şekil 3.30. E/D=5 için M/D ve K/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Grafiklerde görüldüğü gibi M/D=3 olduğunda bazı durumlarda düşme meydana gelmiş ise de aradaki fark oldukça azdır. Bu durum için deney ortamı şartları, malzeme yapısı, deniz suyu etkisi gibi nedenlerin hasar yükünü etkilediği düşünülmektedir

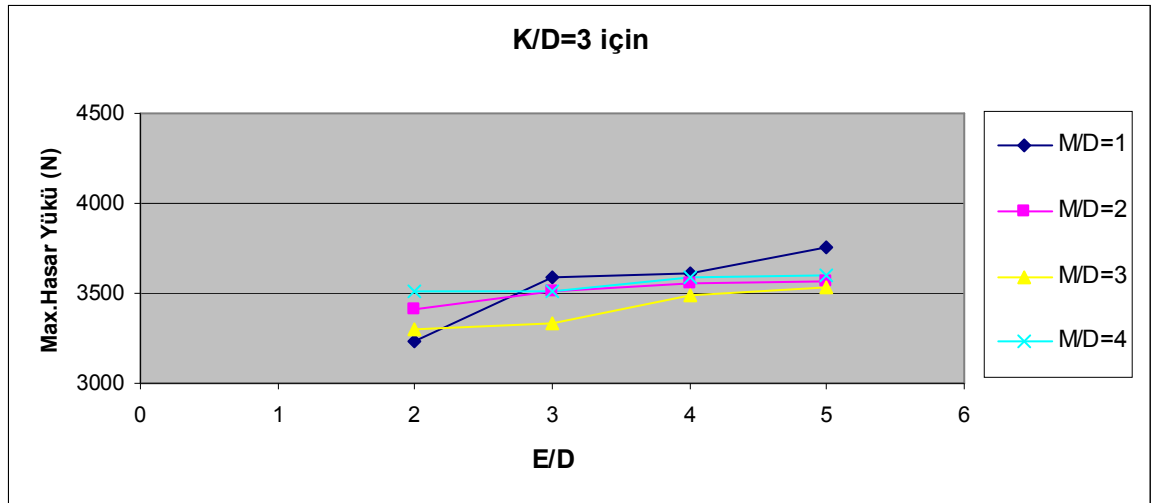
c) E/D, M/D, K/D oranları arasındaki ilişki ve hasar yüküne etkisi

Şekil 3.31' de K/D= 2 için E/D ve M/D' ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=4 ve E/D=2 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. M/D=1 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2222 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 2688 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=2 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2770 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 3277 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=3 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3208 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 3414 N' luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=4 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3352 N olarak elde edilirken, E/D=5 olduğunda bu değer 3472 N' a yükselmiştir.



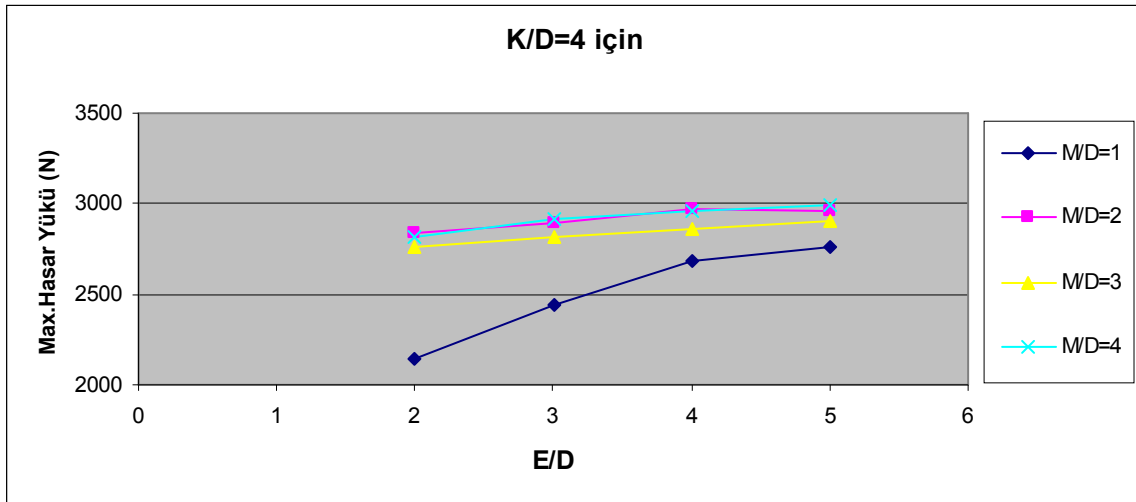
Şekil 3.31. K/D=2 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.32’ de K/D=3 için E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=1 ve E/D=5 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. M/D=1 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3231 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 3757 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=2 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3414 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 3571 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=3 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3296 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda ise 3532 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. M/D=4 için E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 3508 N olarak elde edilirken, E/D=5 olduğunda bu değer 3600 N’ a yükselmiştir.



Şekil 3.32. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Şekil 3.33’ de $K/D=4$ için E/D ve M/D ’ ye bağlı olarak elde edilen maksimum hasar yükleri verilmiştir. M/D oranı 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $M/D=4$ ve $E/D=5$ olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. $M/D=1$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2139 N elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda ise 2766 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $M/D=2$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2838 N elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda ise 2963 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $M/D=3$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2766 N elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda ise 2904 N’ luk bir maksimum hasar yükü elde edilmiştir. $M/D=4$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 2815 N olarak elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda bu değer 2992 N’ a yükselmiştir.



Şekil 3.33. $K/D=4$ için E/D ve M/D oranlarına bağlı olarak hasar yükünün değişimi

Grafikler incelendiğinde K/D oranları sabit tutulup, E/D ve M/D oranlarının artması ile maksimum hasar yüklerinin genel olarak arttığı tespit edilmiştir.

3.1.2. Deniz suyunun malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisi

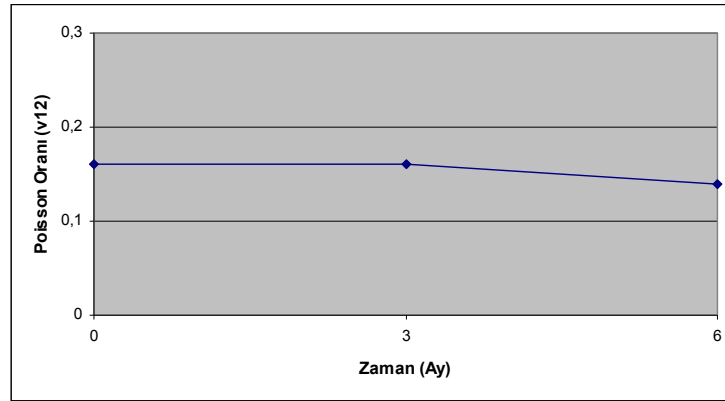
Cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhanın mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla, numuneler standartlara uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kuru halde iken mekanik özellikleri tespit edilmek amacıyla test edilmiştir. Bunun yanında deniz suyunun malzeme üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla, aynı şekilde hazırlanan numuneler laboratuvar şartlarında 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyu

içerisinde bekletilmiştir. Bekleme süresi tamamlanan numunelerin mekanik özellikleri tek tek ölçülerek, tespit edilmiştir. 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numuneler ile kuru haldeki numunelerin ölçülen mekanik özelliklerinin değerleri aşağıda grafik yolu ile karşılaştırılmıştır.

Aşağıda deniz suyunun kompozit levhanın Poisson oranı, Elastisite modülü, Kayma modülü, kayma mukavemeti, basma ve çekme mukavemeti üzerinde etkisi tek tek ele alınmıştır.

3.1.2.1. Deniz suyunun Poisson oranına etkisi

3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numuneler ve deniz suyu içerisine konulmayan numunelerin standartlara uygun bir şekilde Poisson oranı tespit edilmiştir. Ölçülen Poisson oranı değerleri grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Kuru halde ve deniz suyu içerisine konulan numunelerin Poisson oranı değerleri

Grafikten de görüldüğü gibi Poisson oranı kuru halde 0.16, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunede 0.158 (≈ 0.16) ve 6 ay deniz suyunda bekletilen numunede ise 0.14 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan 3 ay deniz suyuna konulan numunelerin Poisson oranının; kuru numunelerden elde edilen poisson oranına göre çok fazla değişmediği görülmüştür (Şekil 3.34).

Tablo 3.1. Deney sürelerine göre Poisson oranları

Deney süresi	ν_{12}
kuru hal	0.16
3 ay	0.16
6 ay	0.14

6 ay deniz suyu içerisinde bırakılan numunelerde Poisson oranının daha belirgin bir şekilde değiştiği gözlenmiştir. 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin Poisson oranının 0.14' e düştüğü tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde Poisson oranının; kuru ve 3 ay deniz suyuna konulan numunelere göre %12.5 oranında azaldığı görülmüştür.

3.1.2.2. Deniz suyunun malzemenin mukavemet değerleri üzerinde etkisi

Hazırlanan numuneler kuru, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilmiş her süre bitiminde, numunelerin basma mukavemeti (X_c), çekme mukavemeti (X_t) ve kayma mukavemeti (S_{12}) değerleri deneyle tespit edilmiştir. Yapılan test sonucunda elde edilen mukavemet değerleri Tablo 3.2' de gösterilmiştir.

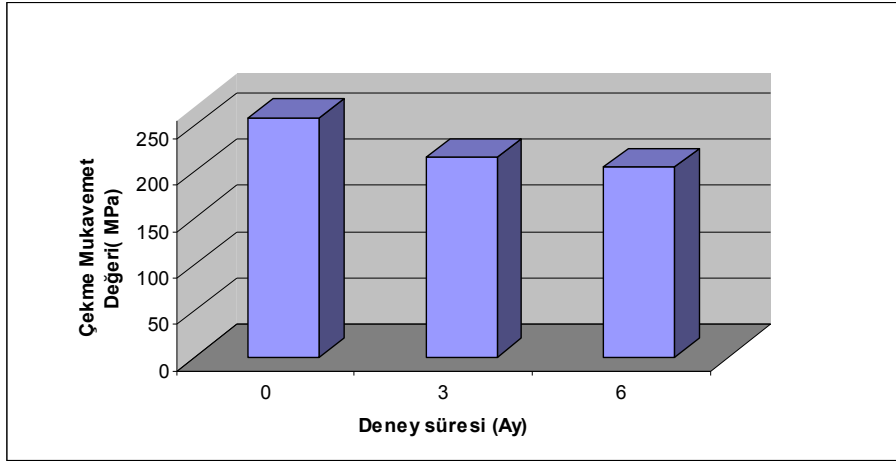
Tablo 3.2. Deney sonucunda elde edilen mukavemet değerleri

Ortam	X_t (Çekme Mukavemeti) MPa	X_c (Basma Mukavemeti) MPa	S_{12} (Kayma Mukavemeti) MPa
Kuru hal	258	217	92
3ay	215	196	91 (90.8)
6ay	205	192	89 (88.9)

a) Çekme mukavemet değerleri

Tablo 3.2' de de görüldüğü gibi kompozit levhanın kuru haldeki çekme mukavemeti değeri 258 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerin 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 3 ay deniz suyunda kalan numunelerin çekme mukavemet değeri 215 MPa, 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin çekme mukavemet değeri 205 MPa olarak elde edilmiştir. Numunelerin çekme mukavemeti (X_t) değerlerinin; Şekil 3.35' den de görüldüğü gibi deniz suyu içerisinde kalma süresi arttıkça, düştüğü görülmüştür. 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin çekme mukavemeti değerinin, kuru haldeki değere oranla %16.67 azaldığı görülmüştür. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin çekme mukavemet değerlerinin, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen değere

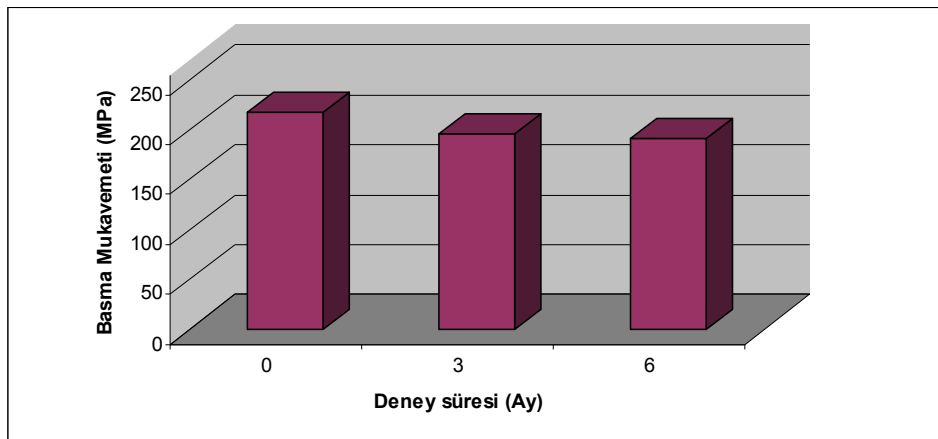
göre %4.65 oranında, kuru halde elde edilen değere göre ise %20.54 oranında düştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 3.35. Deney sonrası elde edilen çekme mukavemet değerleri

b) Basma mukavemet değerleri

Tablo 3.2’ de de görüldüğü gibi kompozit levhanın kuru halde elde edilen basma mukavemeti değeri 217 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer 3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin basma mukavemet değeri 196 MPa, 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin basma mukavemet değeri 192 MPa olarak elde edilmiştir.



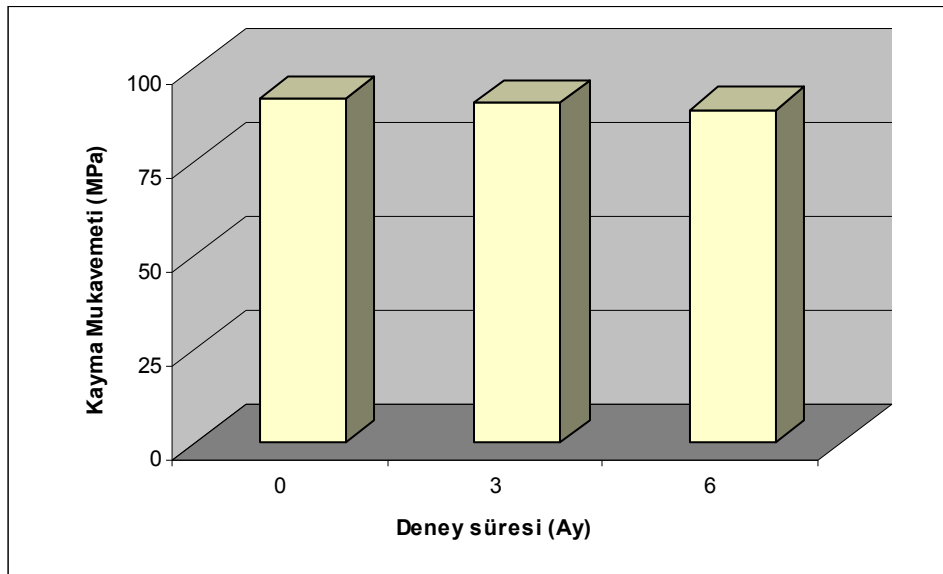
Şekil 3.36. Deney sonrası elde edilen basma mukavemet değerleri

Numunelerin basma mukavemet değerlerinin (X_c), numunelerin deniz suyu içerisinde kalma süresi arttıkça, düştüğü görülmüştür (Şekil 3.36). Numunelerin 3 ay deniz

suyunda bekletilmesi sonunda basma mukavemet değerinin, kuru halde elde edilen değere göre %9.68 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Deniz suyu içerisinde 6 ay bekletilen numunelerin basma mukavemet değeri, 3 ay deniz suyunda bekletildikten sonra elde edilen basma mukavemet değerine göre, %2.04 oranında; kuru haldeki değere göre %11.52 oranında düştüğü tespit edilmiştir.

c) Kayma mukavemet değerleri

Tablo 3.2’ de de görüldüğü gibi kompozit plakanın kuru halde kayma mukavemeti değeri 92 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer 3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen değerlerden yüksek olduğu tespit edilmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin kayma mukavemet değeri 91 MPa, 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin kayma mukavemet değeri 89 MPa olarak elde edilmiştir.

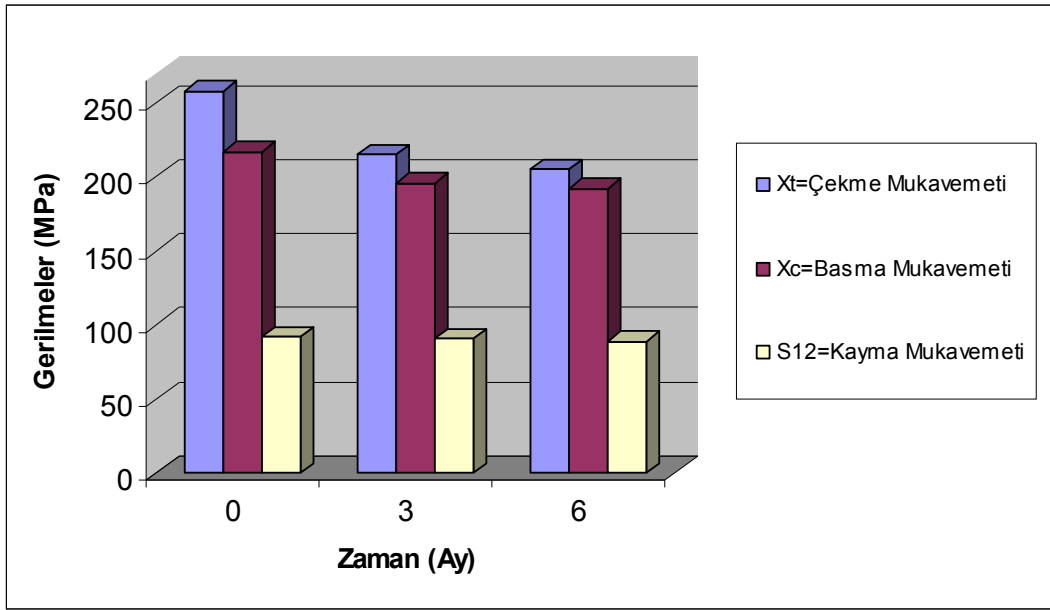


Şekil 3.37. Deney sonrası elde edilen kayma mukavemet değerleri

Numunelerin kayma mukavemet değerlerinin (S_{12}); deniz suyunda kalma süresine göre değişim değerleri Şekil 3.37’ de gösterilmiştir. Tablodan ve şekilden de görüldüğü gibi kayma mukavemet değerleri arasındaki fark çok fazla olmamakla birlikte deniz suyu etkisi görülmektedir. 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin kayma mukavemet değerinin, kuru halde elde edilen kayma mukavemet değerine göre %1.09 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Deniz suyu içerisinde 6 ay bekletilen numunelerin kayma

mukavemet değerinin, 3 ay deniz suyu bekletilen numunelerden elde edilen kayma mukavemet değerine göre, %2.20 oranında; kuru halde elde edilen değere göre ise % 3.26 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Numunelerin çekme, basma ve kayma mukavemet değerlerinin kuru, 3 ay ve 6 ay deniz suyu bekletildikten sonra elde edilen mukavemet değerleri Şekil 3.38’ de karşılaştırılmıştır. Numunelerin deniz suyu içerisinde kalma süreleri uzadıkça, mukavemet değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.38. Mukavemet değerleri açısından karşılaştırma

3.1.2.3. Deniz suyunun malzemenin modül değerleri üzerinde etkisi

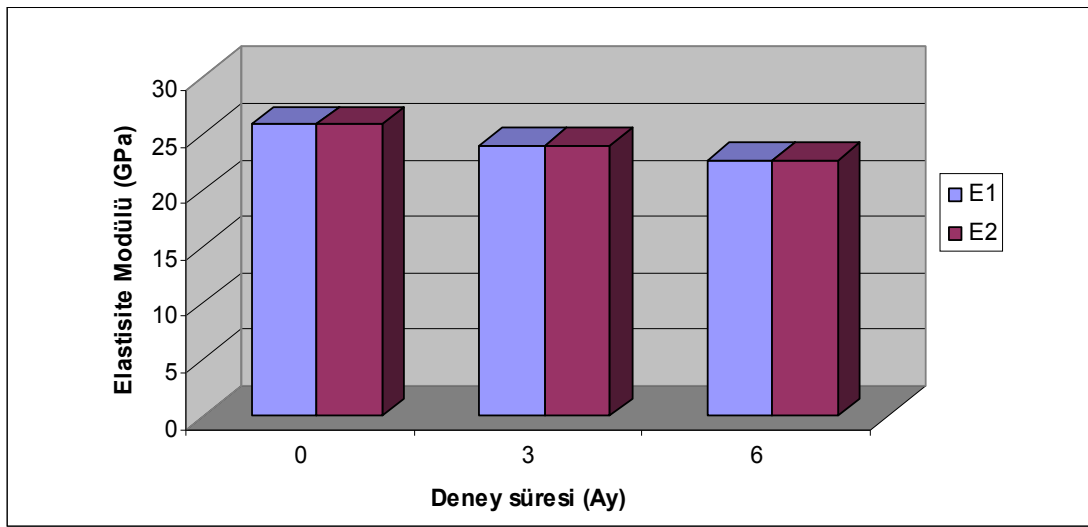
Hazırlanan numuneler kuru, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilmiş ve her süre bitiminde, numunelerin elastisite ve kayma modül değerleri tespit edilmiştir. Yapılan test sonucunda elde edilen değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3. 3. Elde edilen modül değerler

Çevre Şartları	E_1 (Elastisite Modülü) MPa	E_2 (Elastisite Modülü) MPa	G_{12} (Kayma Modülü) MPa
Kuru	25900	25900	6323
3 ay	23970	23970	5402
6 ay	22700	22700	4119

a) Malzemenin elastisite modülü

3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletilen numuneler ile kuru haldeki numunelerin deneysel olarak tespit edilen elastisite modülleri Şekil 3.39’ da verilmiştir. Grafik ve tablodaki değerlere göre elastisite modülü değerinin (E_1); numunelerin deniz suyunda kalma süresi arttıkça, düştüğü tespit edilmiştir. Kuru halde 25.9 GPa elde edilirken, bu değer 3 ay deniz suyunda bekletilmesi sonunda 23.970 GPa’ a ve 6 ay deniz suyunda bekletilmesi sonunda ise 22.7 GPa değerine düşmüştür.



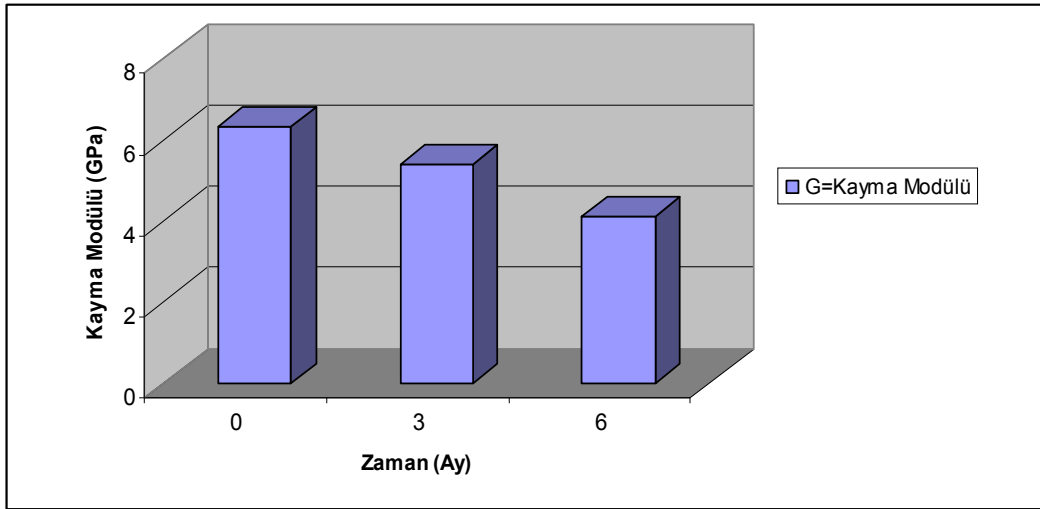
Şekil 3.39. Elastisite modül değerlerinin karşılaştırılması

Elde edilen değerler göre (Şekil 3.39); numunelerin 3 ay deniz suyunda bekletilmesi sonunda elde edilen elastisite modülü değeri, kuru halde elde edilen elastisite modül değerine göre % 7.45 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Aynı şekilde 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin E_1 değeri; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen E_1 değerine göre %5.30 oranında, kuru halde elde edilen değere göre ise % 12.36 oranında düştüğü tespit edilmiştir.

b) Malzemenin kayma modülü

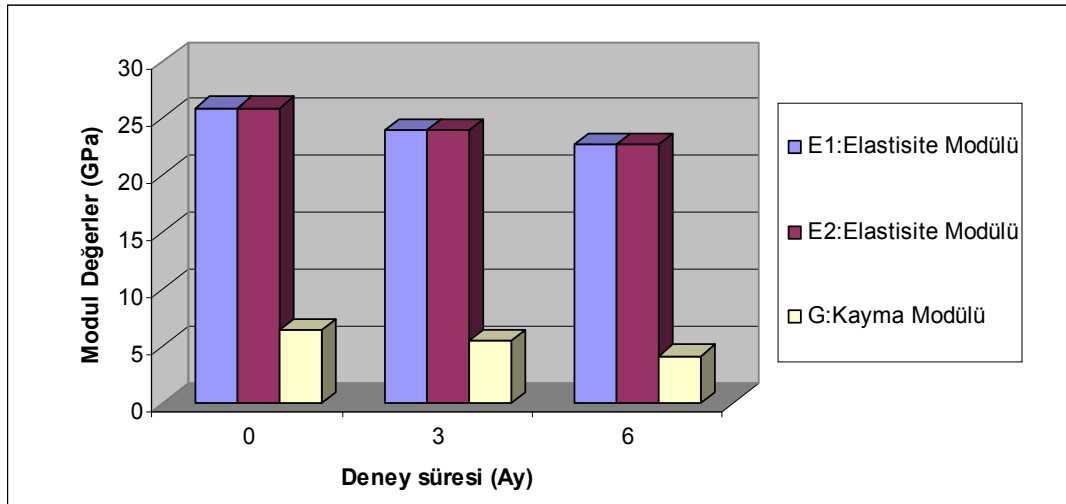
3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numuneler ile kuru haldeki numunelerin ölçülen kayma modülleri Şekil 3.40’ da verilmiştir. Grafik ve tablodaki değerlere göre numunelerin deniz suyu içerisinde kalma süreleri arttıkça, kayma modülü

(G_{12}) değeri düşmüştür. Kuru halde elde edilen değer 6.323 GPa iken, bu değer 3 ay deniz suyunda bekletilme sonunda 5.402 GPa' a ve 6 ay deniz suyunda bekletilme sonunda ise 4.119 GPa değerine düşmüştür. Numunelerin Kayma modülü (G_{12}) değerinin; deniz suyu içerisinde kalma süresi arttıkça, azaldığı tespit edilmiştir. 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin kayma modülü değeri, kuru halde elde edilen kayma modülü değerine göre %14.57 oranında bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Deniz suyu içerisinde 6 ay bekletilen numunelerin Kayma modülü değeri, 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilmesi sonunda elde edilen Kayma modül değerine göre %23.75 oranında; kuru halde elde edilen değere göre %34.86 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.40. Kayma modül değerlerinin karşılaştırılması

Numunelerin deniz suyu içerisinde kalma süreleri arttıkça, Elastisite ve Kayma modül değerleri giderek azalmıştır. Aşağıdaki grafikte birlikte gösterimi yer almaktadır (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. Malzemenin modül değerler açısından karşılaştırılması

Cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhanın deneysel çalışma sonucu elde edilen mekanik özellikleri aşağıda Tablo 3.4' te verilmiştir.

Tablo 3.4. Cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit plakanın mekanik özellikleri

Ortam	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	ν_{12}	X _t (MPa)	X _c (MPa)	S ₁₂ (MPa)	G ₁₂ (MPa)
Kuru	25900	25900	0,16	258	217	92	6323
3ay	23970	23970	0,16	215	196	91	5402
6ay	22700	22700	0,14	205	192	89	4119

3.1.3. Deniz suyunun hasar yükleri üzerine etkisi

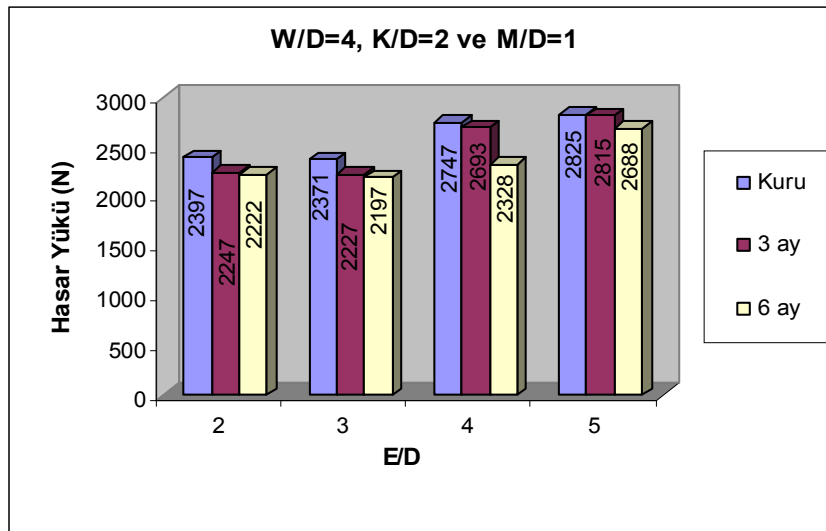
Bu kısımda her bir geometrik parametredeki numunenin deney sonrası elde edilen hasar yükleri değerlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen maksimum hasar yükleri grafiklere aktarılmıştır.

W=20 mm, K=10 mm, M=5 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.68 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.13; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %7.88 azaldığı görülmüştür.

W=20 mm, K=10 mm, M=5 mm ve E=15 mm için; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.47 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.37 azaldığı; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %7.92 azaldığı görülmüştür.

W=20 mm, K=10 mm, M=5 mm ve E=20 mm için; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %2.00 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %15.68 azaldığı; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %18.00 azaldığı görülmüştür.

W=20 mm, K=10 mm, M=5 mm ve E=25 mm için; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %0.36 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %4.72 azaldığı; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %5.10 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.42).



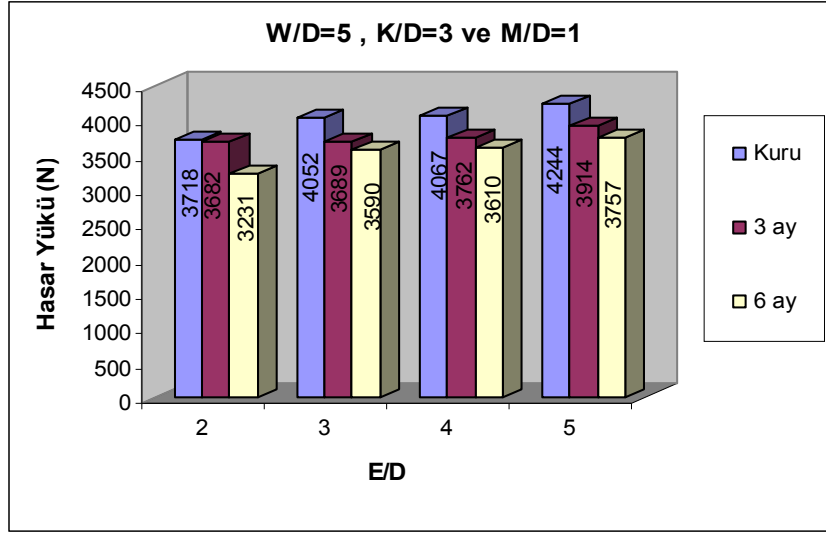
Şekil 3.42. W/D=4, K/D=2, M/D=1 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %0.98 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %13.96; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %15.07 azaldığı görülmüştür.

W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %9.84 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %2.76; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.87 azaldığı görülmüştür.

W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.11 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %4.21; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.66 azaldığı görülmüştür.

W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.43 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %4.18; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.96 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.43).



Şekil 3.43. W/D=5, K/D=3, M/D=1 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

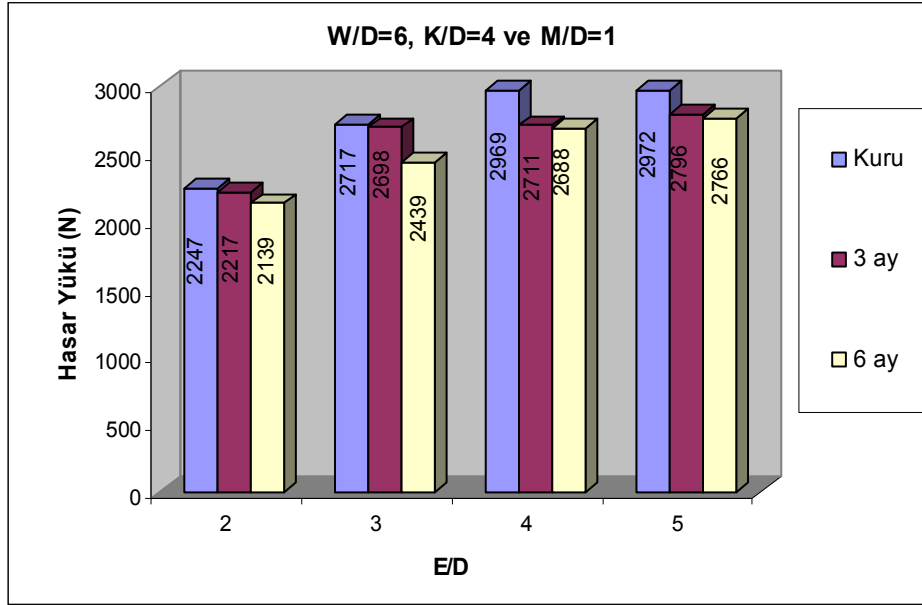
W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %1.35 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre % 3.65; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %5.05 azaldığı görülmüştür.

W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %0.70 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %10.62; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %11.40 azaldığı görülmüştür.

W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %9.52 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.86; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %10.45 azaldığı görülmüştür.

W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.29 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda

bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.08; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %7.45 azaldığı görülmüştür (3.44).



Şekil 3.44. W/D=6, K/D=4, M/D=1 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

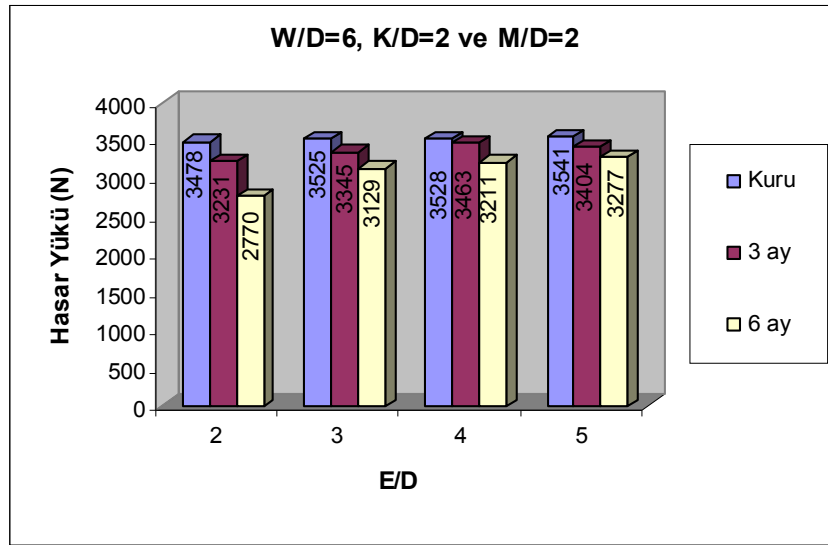
W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %7.64 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %16.64; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %25.56 azaldığı görülmüştür.

W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %5.38 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %6.90; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.66 azaldığı görülmüştür.

W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %1.88 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz

suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %7.85; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %9.87 azaldığı görülmüştür.

W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %4.02 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %3.88; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %8.06 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.45).



Şekil 3.45. W/D=6, K/D=2, M/D=2 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

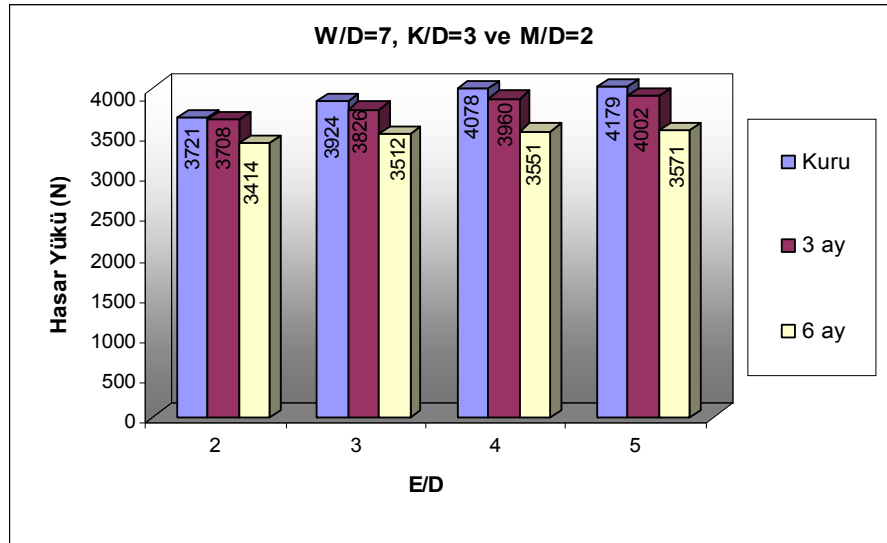
W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %0.35 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %8.61; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %8.99 azaldığı görülmüştür.

W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %2.56 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen

numunelerin maksimum hasar yüküne göre %8.94; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %11.73 azaldığı görülmüştür.

W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %2.98 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %11.52; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %14.84 azaldığı görülmüştür.

W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %4.42 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %12.07; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %17.03 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.46).



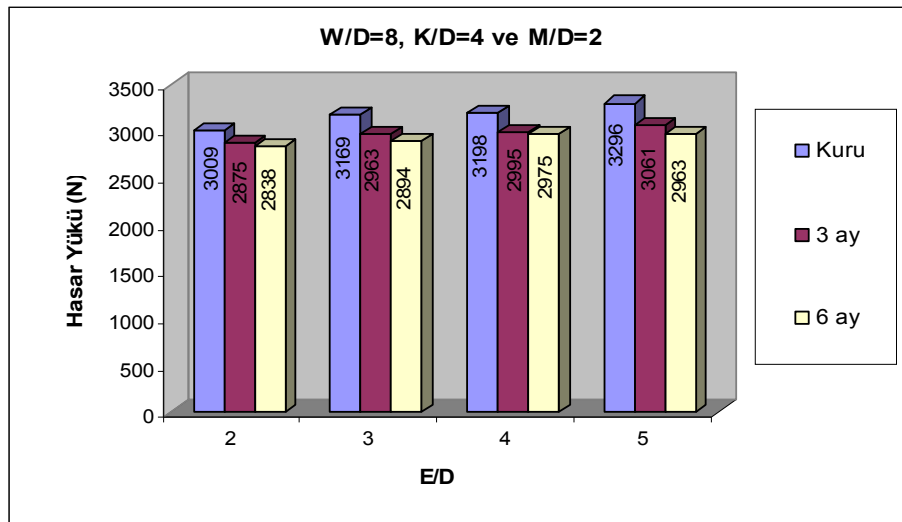
Şekil 3.46. W/D=7, K/D=3, M/D=2 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %4.66 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.30; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %6.03 azaldığı görülmüştür.

W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.95 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %2.38; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %9.50 azaldığı görülmüştür.

W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.78 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.67; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %7.50 azaldığı görülmüştür.

W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %7.68 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %3.31; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %11.24 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.47).



Şekil 3.47. W/D=8, K/D=4, M/D=2 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

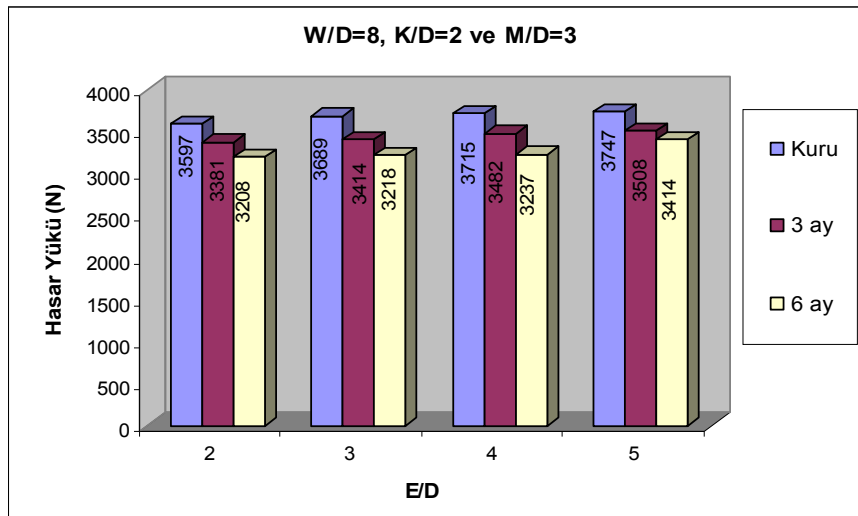
W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden

elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.39 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %5.39; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.13 azaldığı görülmüştür.

W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.06 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %6.09; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %14.64 azaldığı görülmüştür.

W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.69 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %7.57; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %14.77 azaldığı görülmüştür.

W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.81 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %2.75; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %9.75 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.48).



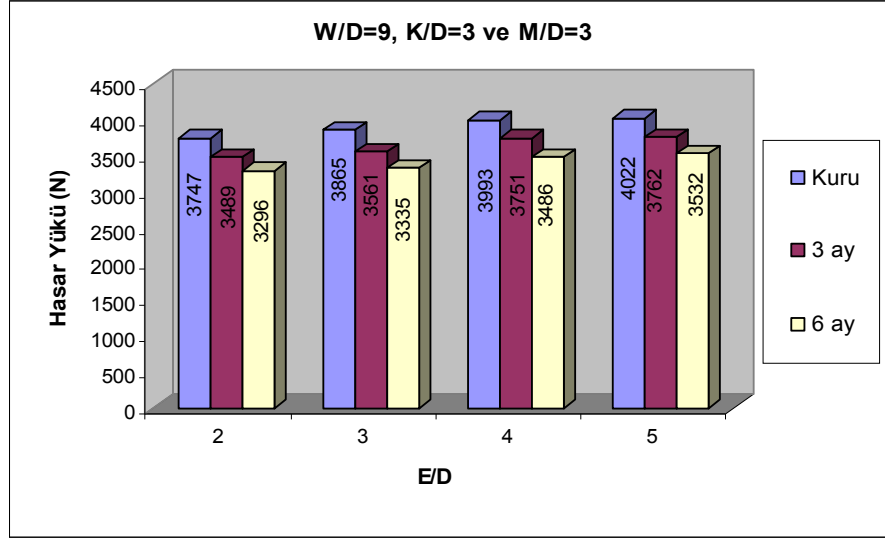
Şekil 3.48. W/D=8, K/D=2, M/D=3 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %7.39 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %5.86; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %13.68 azaldığı görülmüştür.

W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.54 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %6.78; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %15.89 azaldığı görülmüştür.

W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.45 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %7.60; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %14.54 azaldığı görülmüştür.

W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.91 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %6.51; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %13.87 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.49).



Şekil 3.49. W/D=9, K/D=3, M/D=3 ve E/D=2, 3, 4, 5 numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

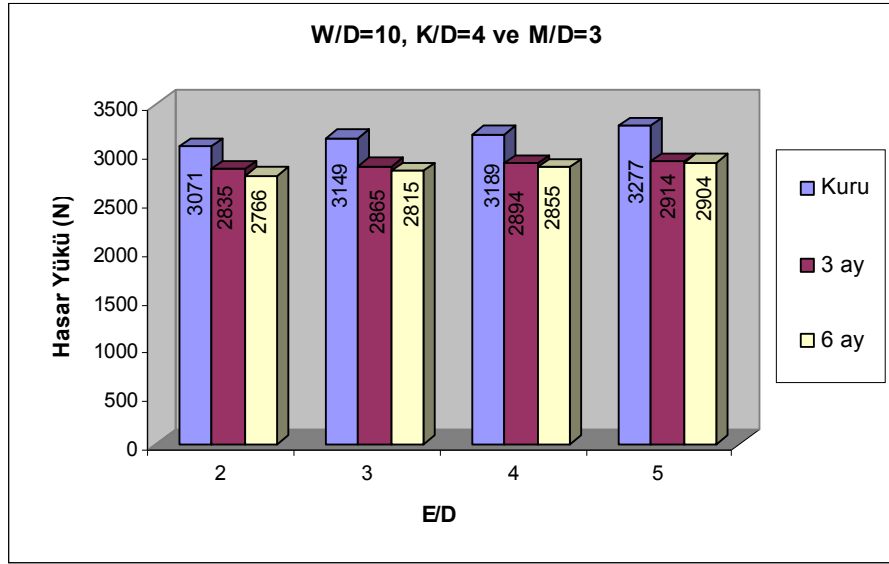
W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.32 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %2.49; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %11.03 azaldığı görülmüştür.

W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %9.91 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.78; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %11.87 azaldığı görülmüştür.

W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %10.19 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.37; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %11.70 azaldığı görülmüştür.

W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %12.46 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz

suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.34; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.84 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.50).



Şekil 3.50. W/D=10, K/D=4, M/D=3 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

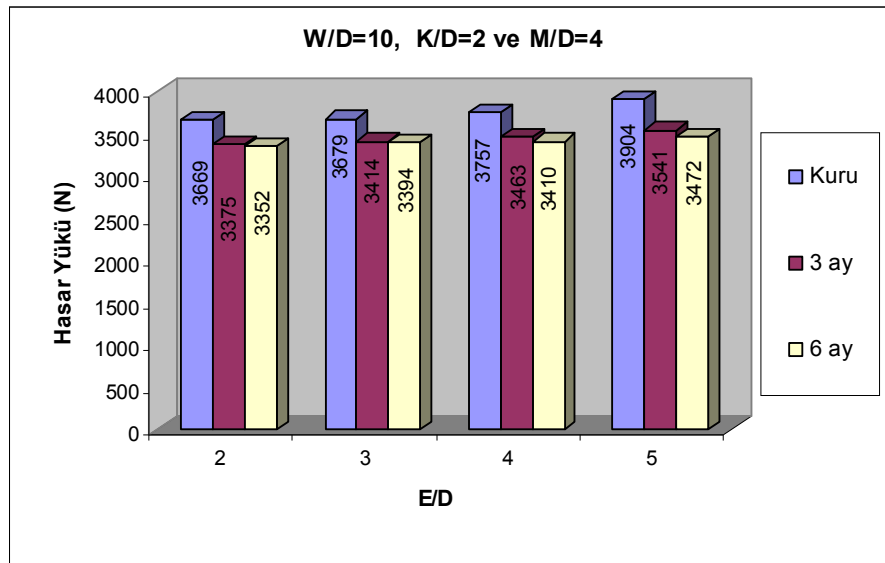
W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.71 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.69; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %9.46 azaldığı görülmüştür.

W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %7.76 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre % 0.59; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %8.40 azaldığı görülmüştür.

W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.49 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen

numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.55; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %10.18 azaldığı görülmüştür.

W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %10.25 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.99; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.44 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.51).



Şekil 3.51. W/D=10, K/D=2, M/D=4 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

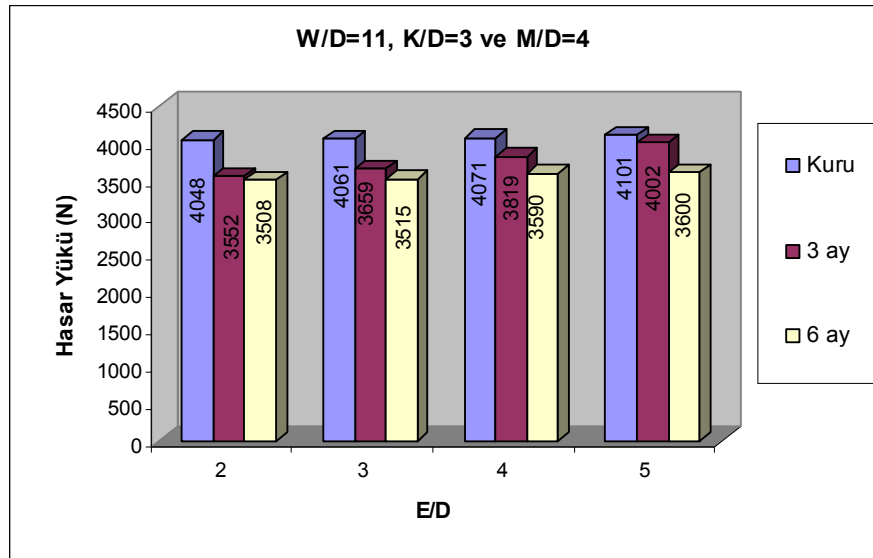
W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %13.96 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %1.25; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %15.39 azaldığı görülmüştür.

W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %10.99 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen

numunelerin maksimum hasar yüküne göre %4.10; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %15.53 azaldığı görülmüştür.

W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %6.60 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %6.38; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %13.40 azaldığı görülmüştür.

W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %2.47 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %11.17; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %13.92 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.52).



Şekil 3.52. W/D=11, K/D=3, M/D=4 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

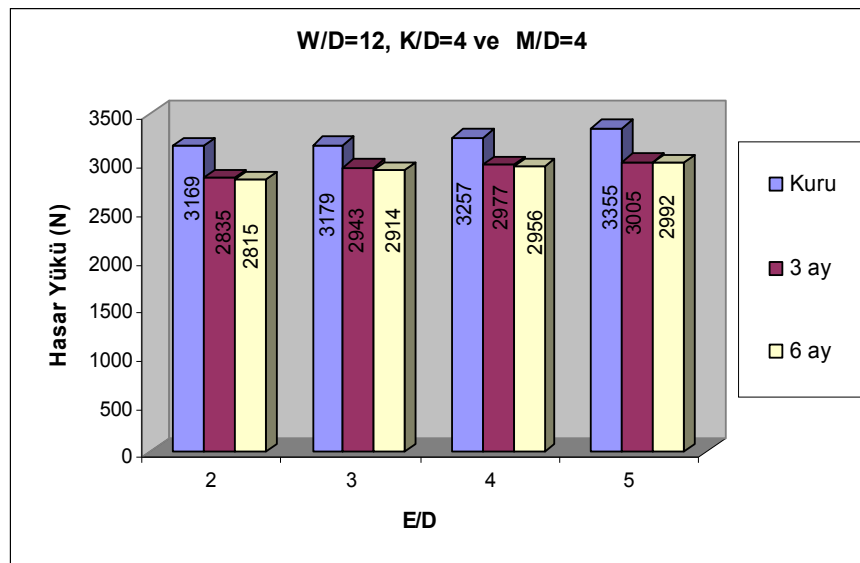
W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %11.78 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen

numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.71; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.58 azaldığı görülmüştür.

W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=15 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %8.02 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.99; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %9.09 azaldığı görülmüştür.

W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=20 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %9.41 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.71; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %10.18 azaldığı görülmüştür.

W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=25 mm olan numunede; 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre %11.65 azaldığı tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yükünün, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin maksimum hasar yüküne göre %0.44; kuru haldeki numunelerden elde edilen maksimum hasar yüküne göre ise %12.13 azaldığı görülmüştür (Şekil 3.53).



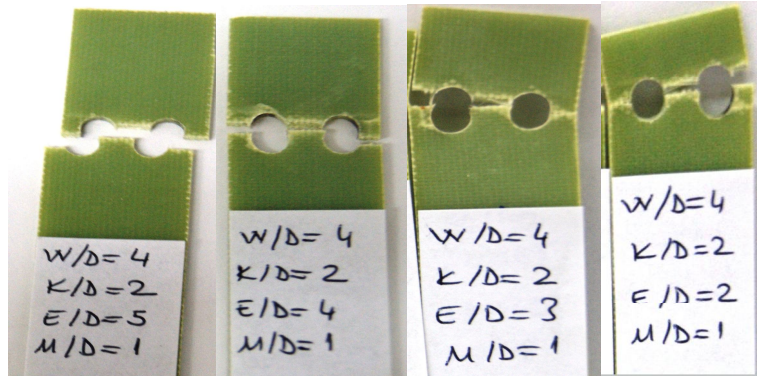
Şekil 3.53. W/D=12, K/D=4, M/D=4 ve E/D=2, 3, 4, 5 olan numunelerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi kuru halde elde edilen maksimum hasar yük değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin deniz suyu içerisinde kalma süreleri artıkça, maksimum hasar yük değerlerinin düştüğü deneyler ile tespit edilmiştir. Aynı zamanda E/D oranı arttığı zaman hasar yüklerinin de arttığı görülmektedir. Bu elde edilen yükler aynı zamanda numunelerin, geometrik boyutlardaki dayanım yükünü de belirtmektedir.

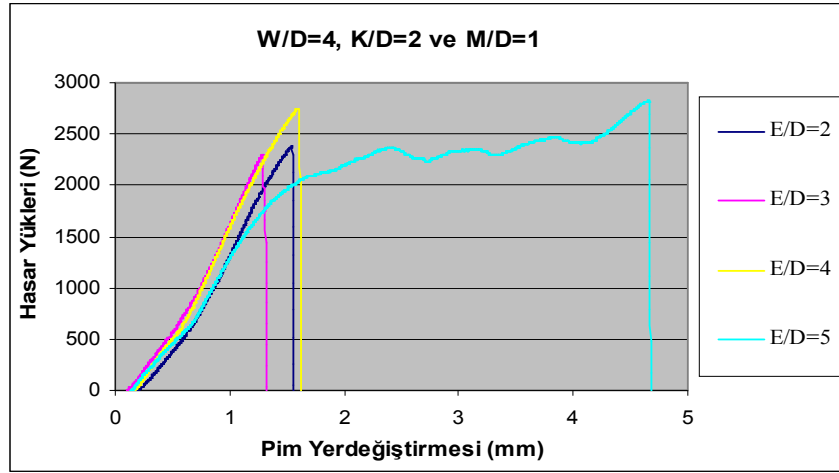
3.1.4. Deniz suyunun hasar tipleri üzerine etkisi

Cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar, Instron 1114 model çekme cihazı ile test edilmiş, hasar tipleri belirlenmiş ve yük-pim yerdeğiştirme grafikleri çizilmiştir. Numunelerin her üç durumda elde edilen hasar tiplerinin fotoğrafları çekilmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Aynı şekilde her üç durum için elde edilen yük-pim yerdeğişimi grafikleri de aşağıda verilmiştir.

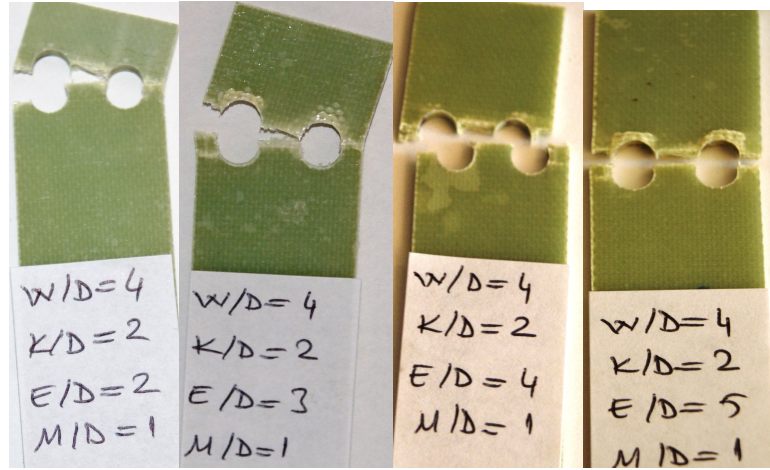
W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görülmektedir. Hem hasar fotoğraflarında hem de hasar grafiği incelendiğinde hasar tipleri oluşumu açısından birbirleri ile benzerlik gösterdikleri ve hasar tipinin yırtılma olduğu görülmüştür.



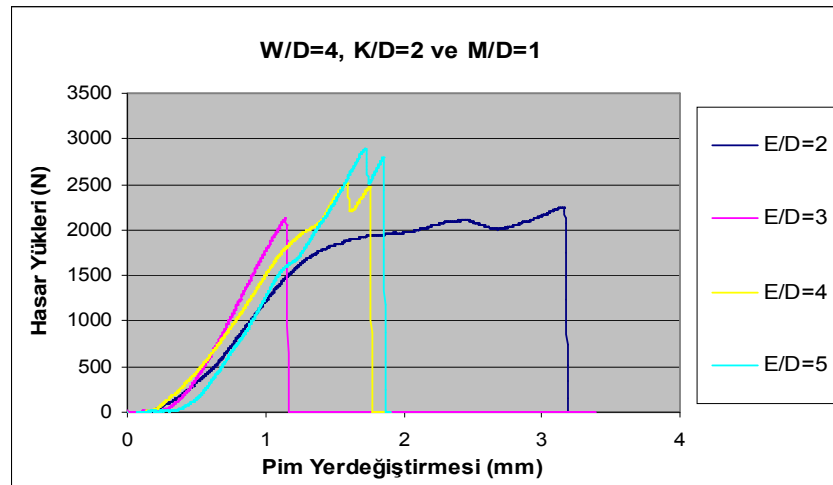
Şekil 3.54. Kuru halde W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları



Şekil 3.55. Kuru halde $W=20$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı



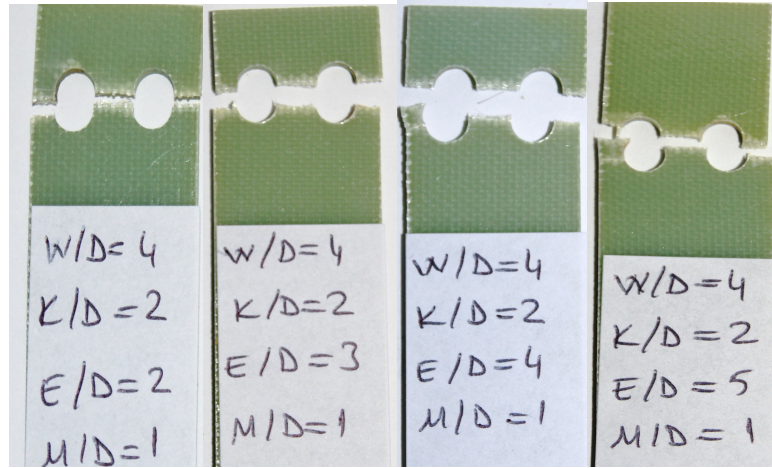
Şekil 3.56. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=20$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları



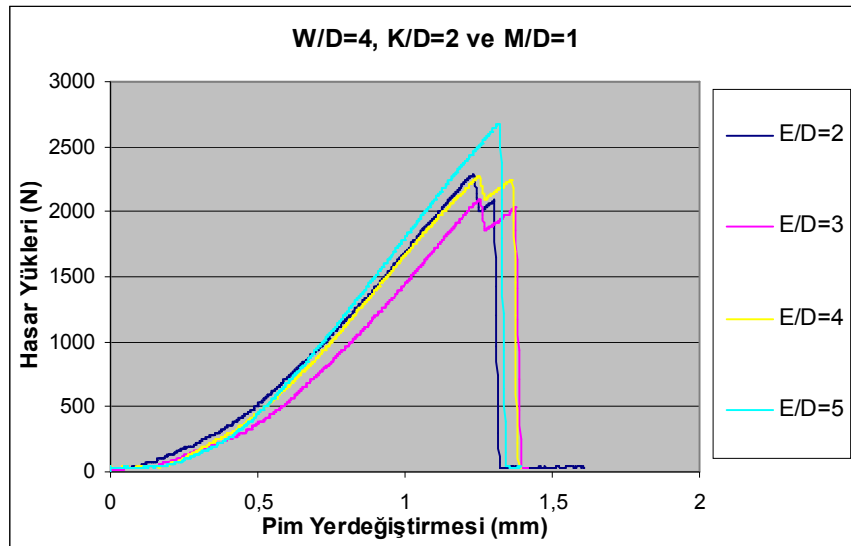
Şekil 3.57. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=20$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.56 ve Şekil 3.57’ de 3 ay deniz suyunda bekletildikten sonra çekme testine tabi tutulan numunelerin hasar fotoğrafları ile grafiğinin hasar tipleri oluşumu açısından birbirleri ile benzerlik gösterdiği ve hasar tipinin yırtılma olduğu görülmektedir.

Benzer şekilde Şekil 3.58 ve Şekil 3.59’ da 6 ay deniz suyunda bekletildikten sonra çekme testine tabi tutulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve hasar tipinin yırtılma olduğu görülmektedir.

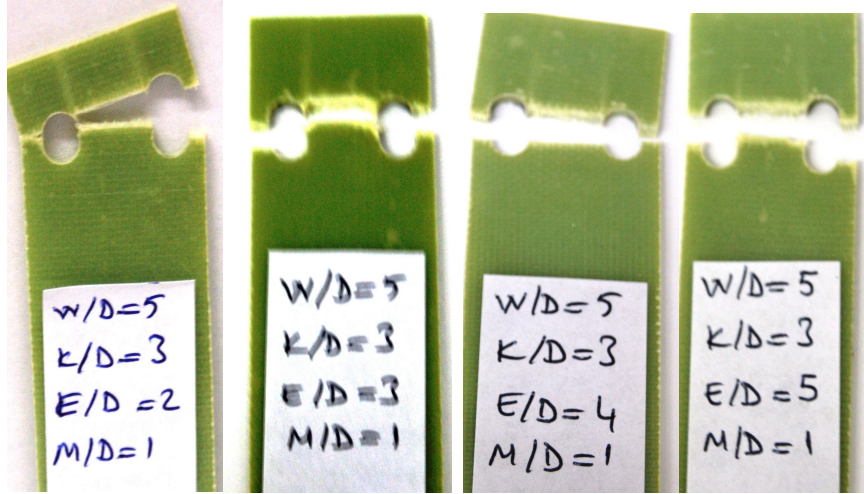


Şekil 3.58. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

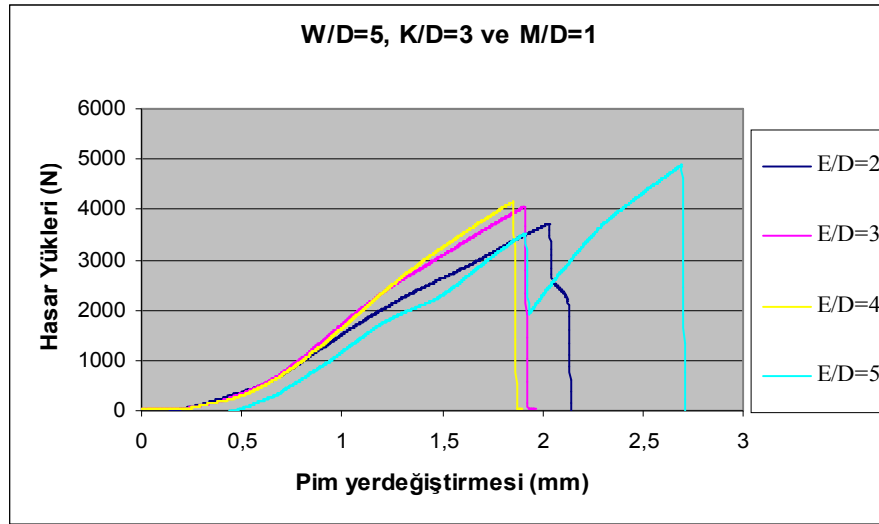


Şekil 3.59. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=20 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

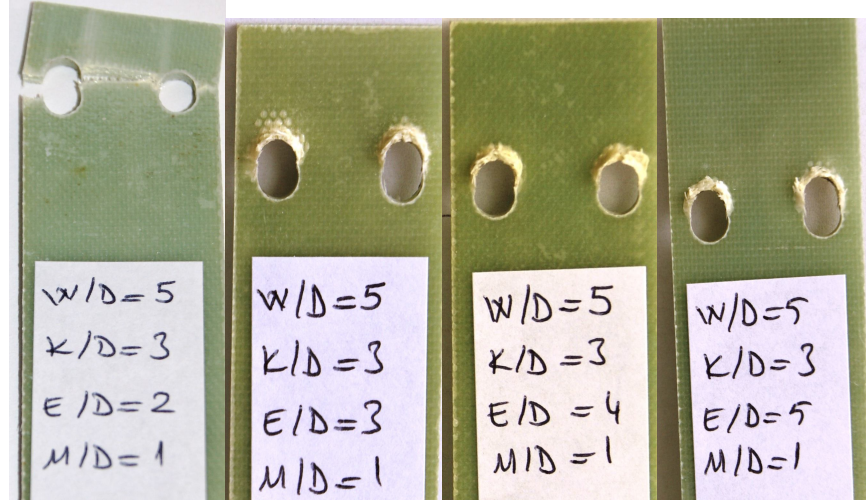
W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda verilmiştir. Hem hasar fotoğraflarında hem de hasar grafiği incelendiğinde hasar tipleri açısından birbirleri ile benzerlik gösterdikleri ve hasar tipinin yırtılma olduğu görülmüştür (Şekil 3.60, Şekil 3.61).



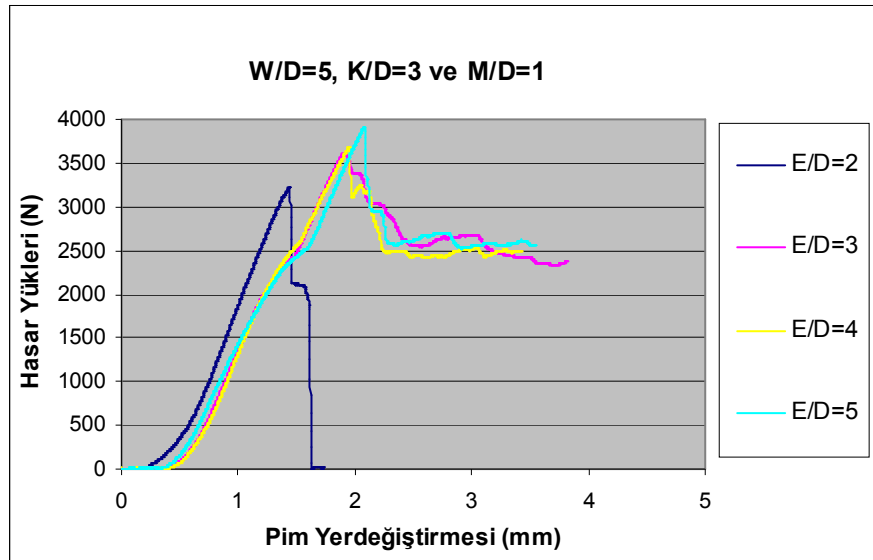
Şekil 3.60. Kuru halde W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları



Şekil 3.61. Kuru halde W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği



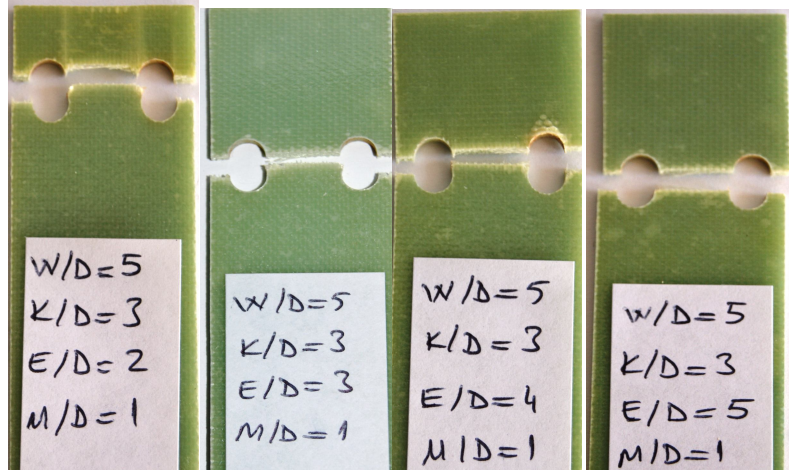
Şekil 3.62. 3 ay deniz suyuunda bekletilen W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları



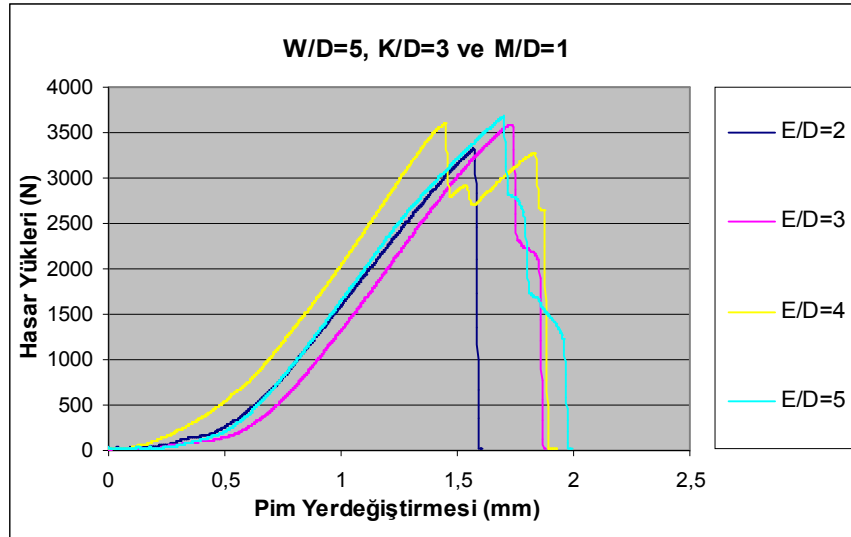
Şekil 3.63. 3 ay deniz suyuunda bekletilen W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10,15, 20, 25 mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.62 ve Şekil 3.63’ de 3 ay deniz suyu içerisinde konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin hasar tipleri açısından birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 3.64 ve Şekil 3.65’ te ise 6 ay süre ile deniz suyu içerisinde konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin hasar tipleri açısından birbirleri ile uyumlu olduğu ve hasar tipinin yırtılma olduğu görülmektedir.

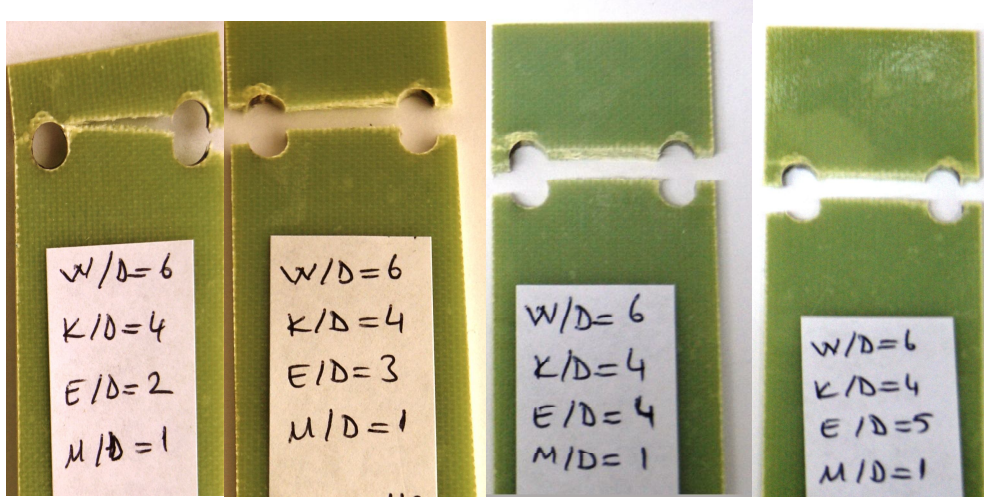


Şekil 3.64. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=25$ mm, $K=15$ mm, $M=5$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

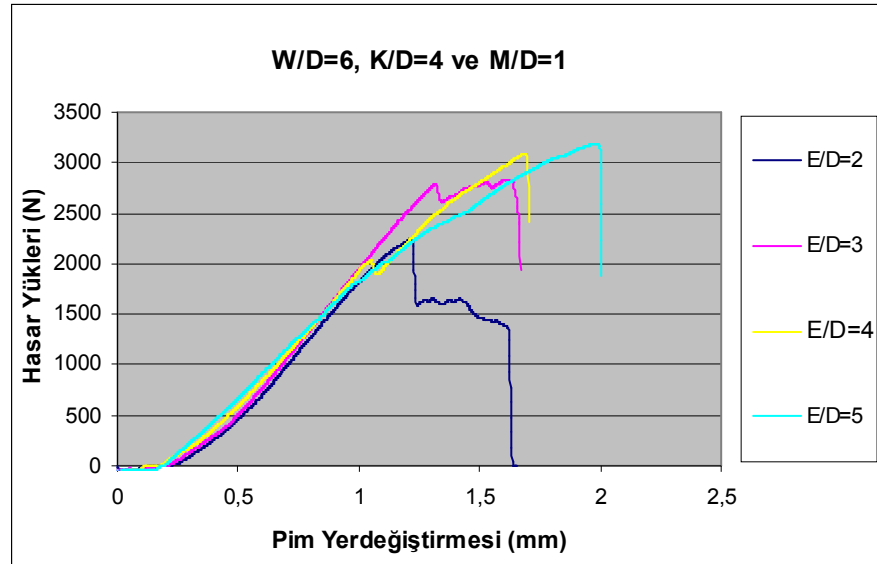


Şekil 3.65. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=25$ mm, $K=15$ mm, $M=5$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

$W=30$ mm, $K=20$ mm, $M=5$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görülmektedir. Kuru haldeki numunelerin hem hasar fotoğrafları hem de hasar grafiği (Şekil 3.66 ve Şekil 3.67) incelendiğinde hasar tipleri bakımından benzerlik gösterdiği ve hasar tipinin yırtılma olduğu görülmektedir.

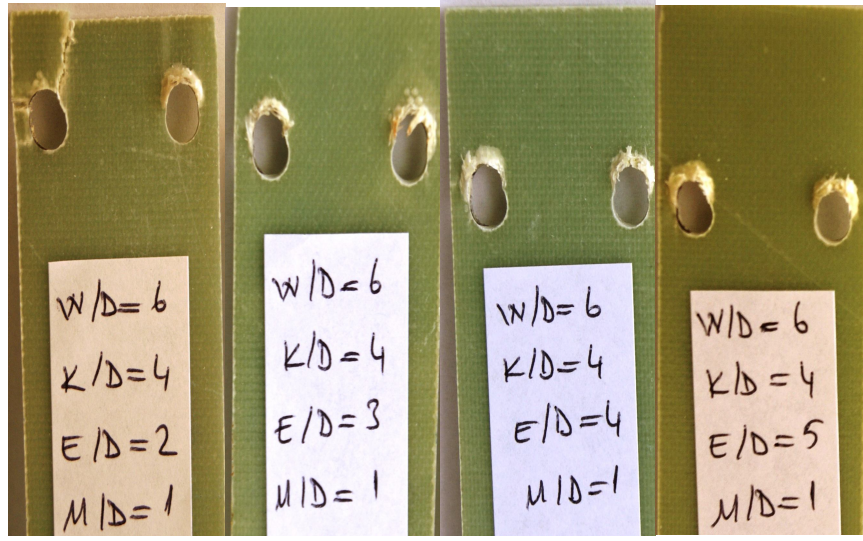


Şekil 3.66. Kuru halde $W=30$ mm, $K=20$ mm, $M=5$ mm ve $E=10,15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

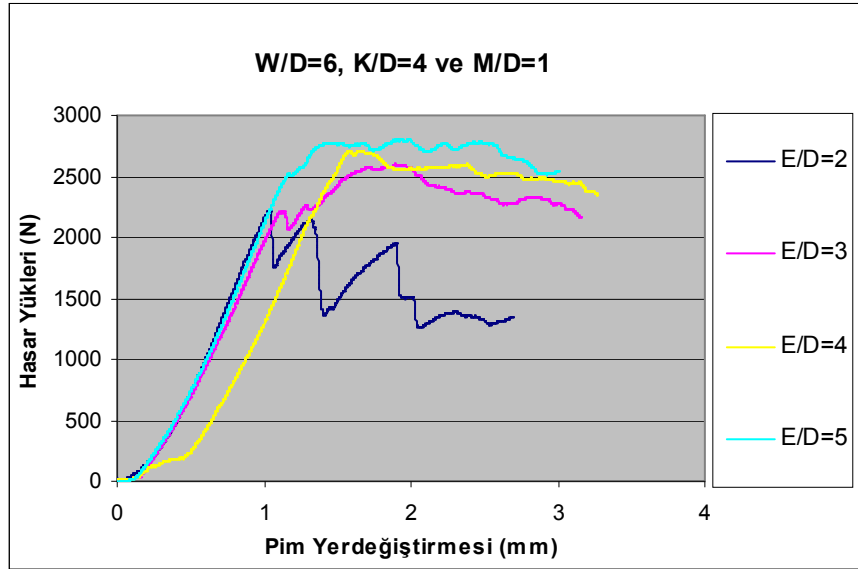


Şekil 3.67. Kuru halde $W=30$ mm, $K=20$ mm, $M=5$ mm ve $E=10,15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.68 ve Şekil 3.69' da 3 ay süre ile deniz suyu içerisinde konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği görölmektedir.

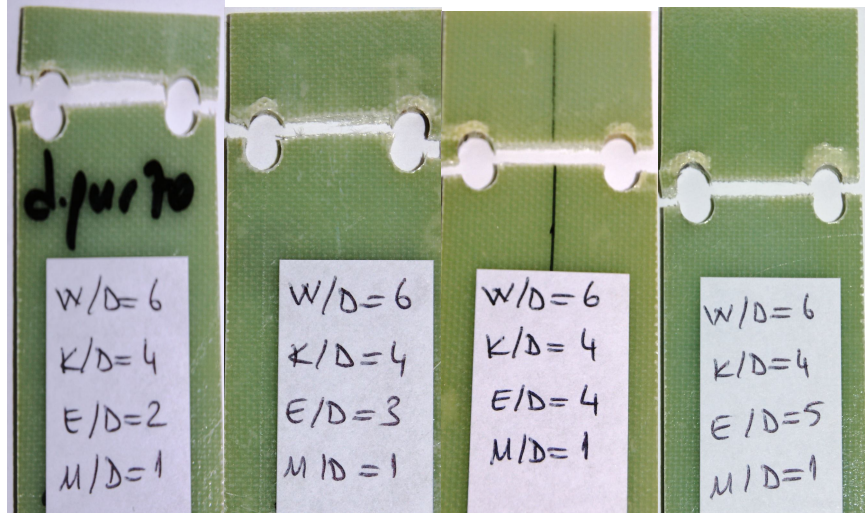


Şekil 3.68. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=20$ mm, $M=5$ mm ve $E=10,15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

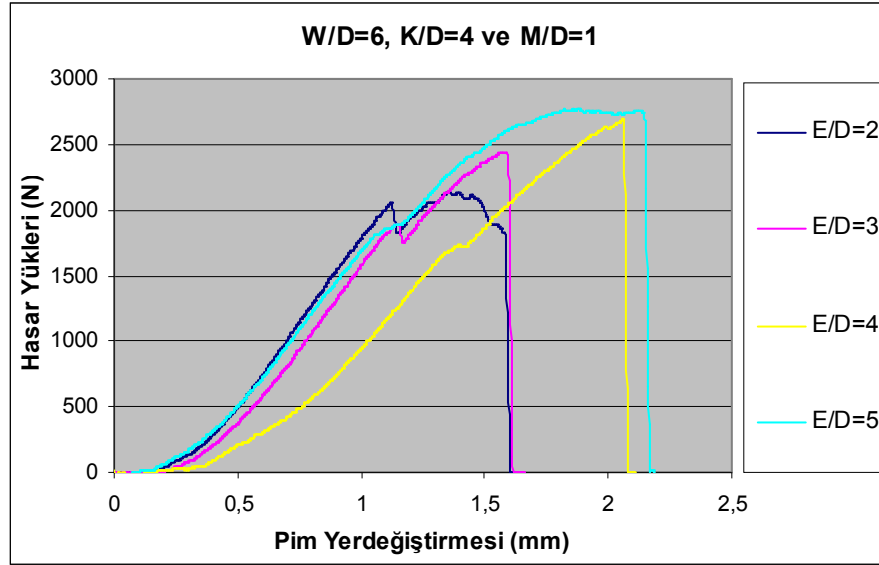


Şekil 3.69. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=20$ mm, $M=5$ mm ve $E=10,15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.70 ve Şekil 3.71' de ise 6 ay deniz suyu içerisine konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve hasar tipinin yırtılma olduğu görlmektedir.



Şekil 3.70. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=20$ mm, $M=5$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

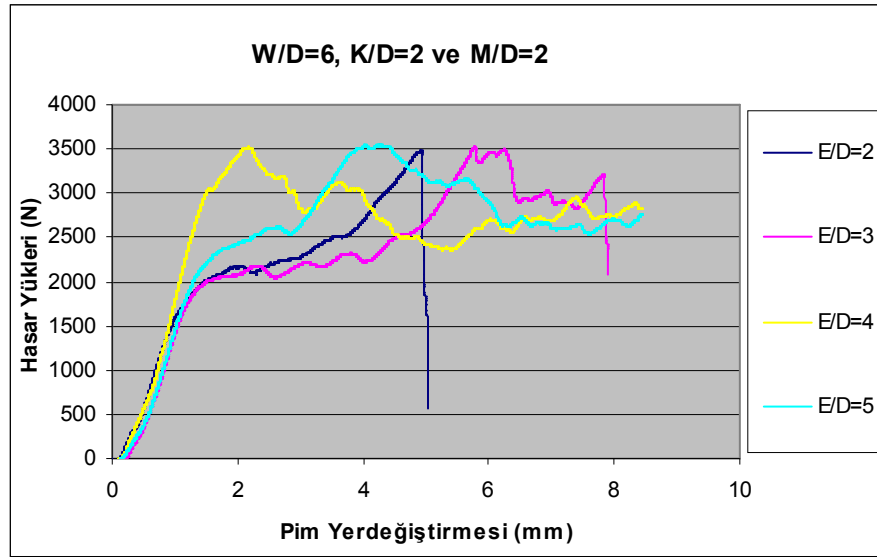


Şekil 3.71. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=20$ mm, $M=5$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

$W=30$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyuna konulduktan sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri görölmektedir. Kuru haldeki numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiklerinin (Şekil 3.72 ve Şekil 3.73) birbiri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve her ikisinde de yırtılma ve ezilme hasar tipi oluştuğu görölmektedir.



Şekil 3.72. Kuru halde $W=30$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

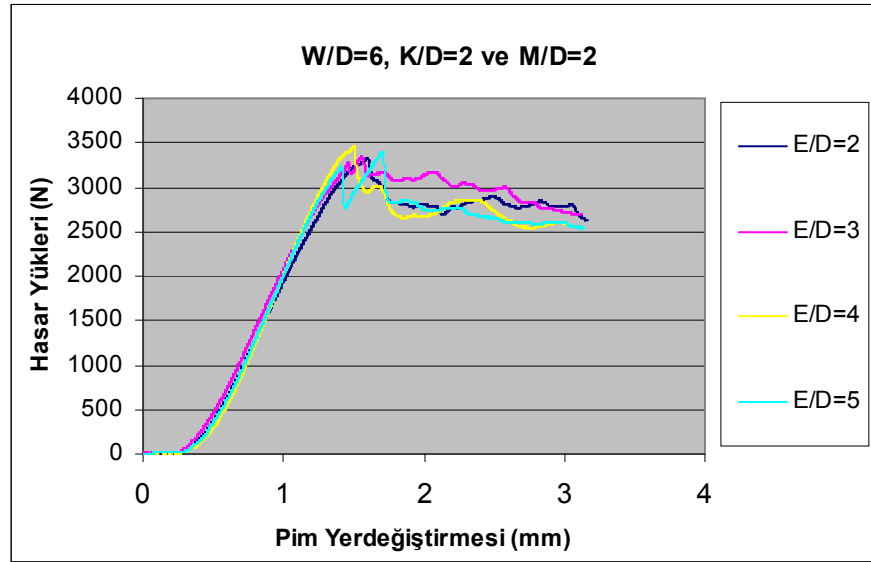


Şekil 3.73. Kuru halde $W=30$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.74 ve Şekil 3.75' te ise 3 ay deniz suyu içerisine konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve hasar tipinin ezilme olduğu görlmektedir.

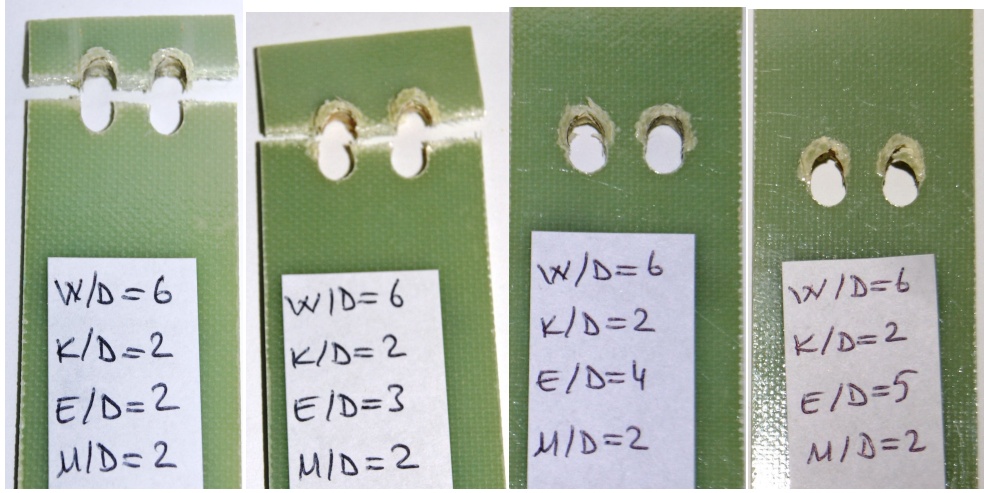


Şekil 3.74. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

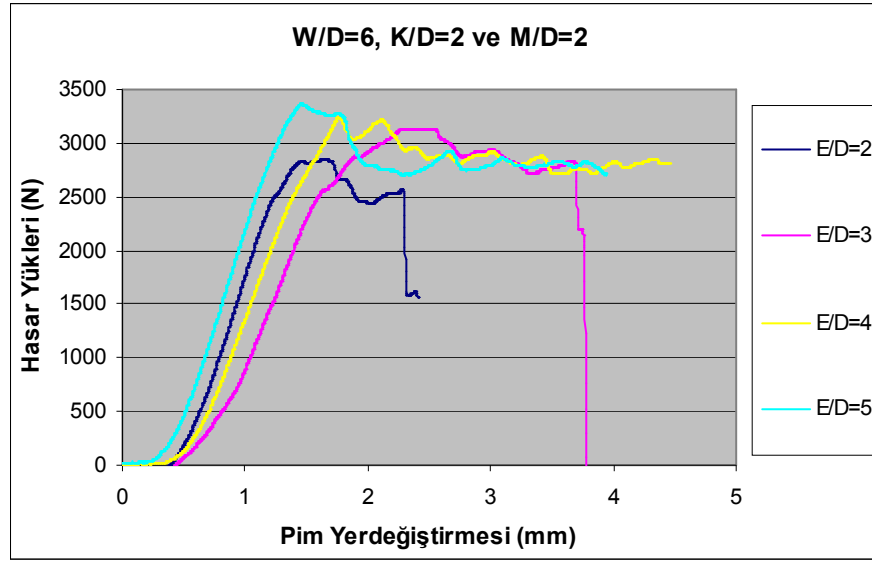


Şekil 3.75. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.76 ve Şekil 3.77’ de ise 6 ay deniz suyu içerisine konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından uyumluluk gösterdiği görölmektedir.

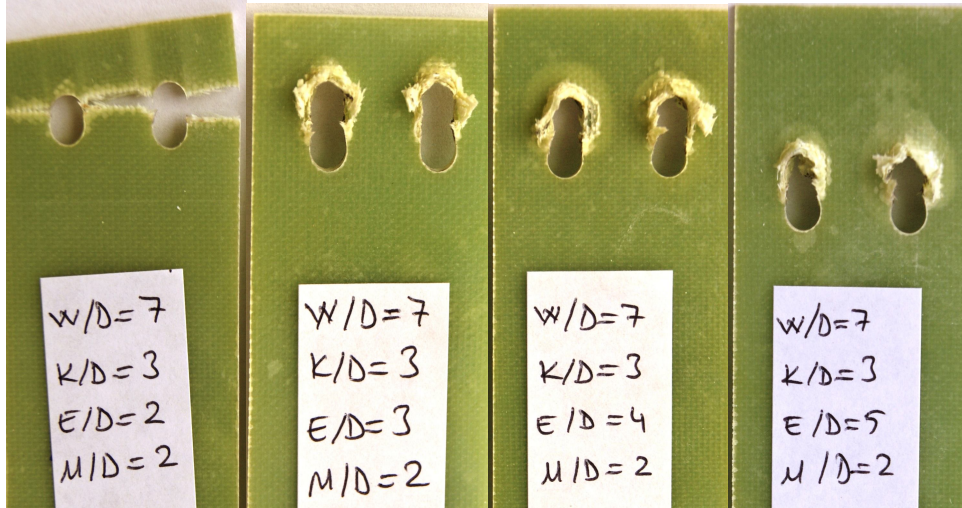


Şekil 3.76. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

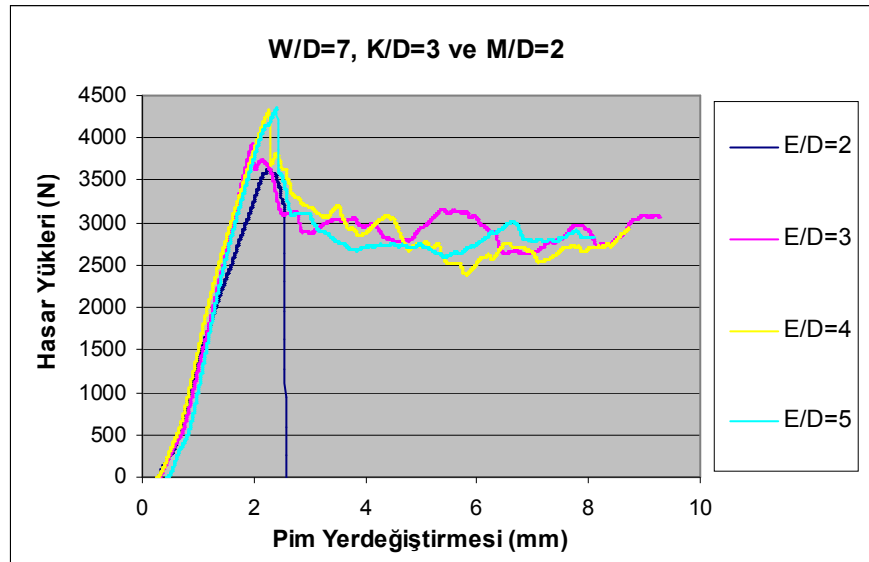


Şekil 3.77. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=30$ mm, $K=10$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

$W=35$ mm, $K=15$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görölmektedir. Kuru haldeki numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiklerinin birbiri ile hasar tipleri ağısından benzerlik gösterdiği görölmektedir (Şekil 3.78 ve Şekil 3.79).

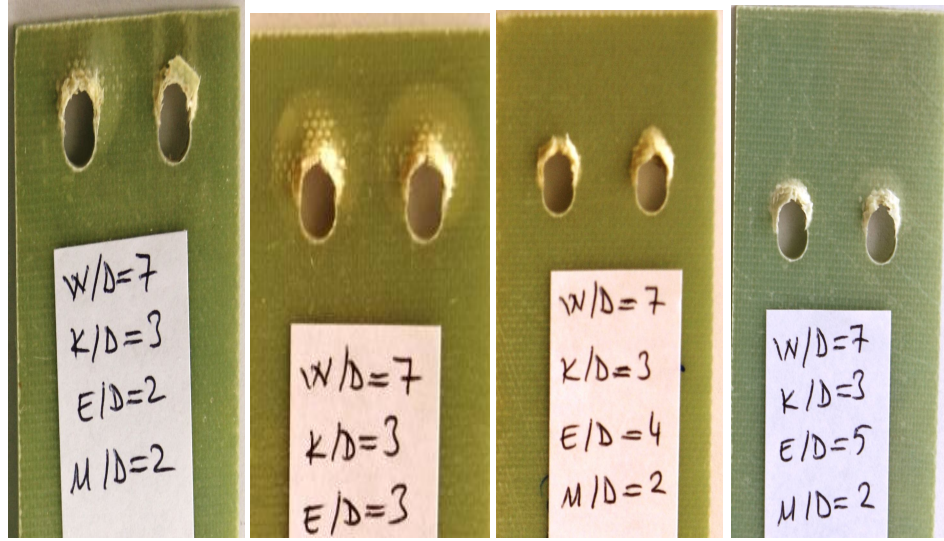


Şekil 3.78. Kuru halde $W=35$ mm, $K=15$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

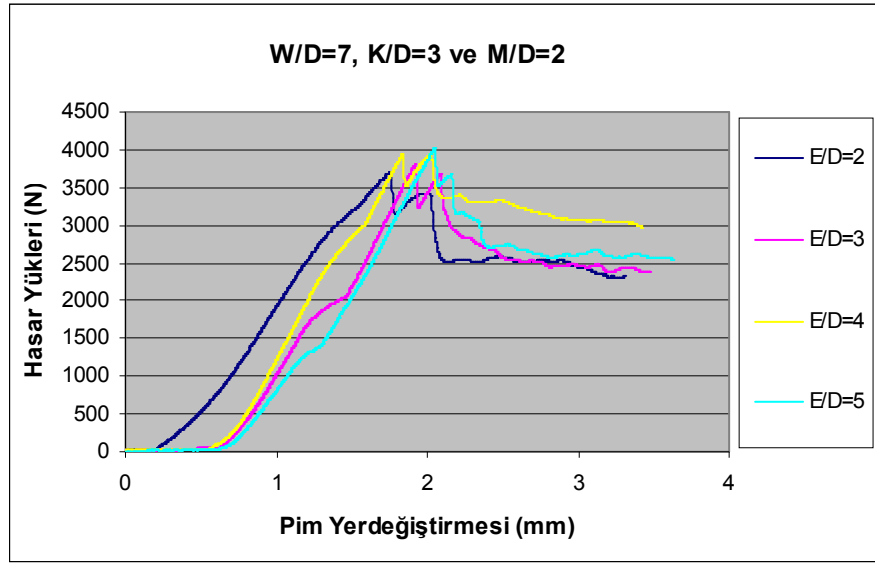


Şekil 3.79. Kuru halde $W=35$ mm, $K=15$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.80 ve Şekil 3.81’ de ise 3 ay deniz suyu içersine konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından uyumluluk gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştugu görölmektedir



Şekil 3.80. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W=35$ mm, $K=15$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

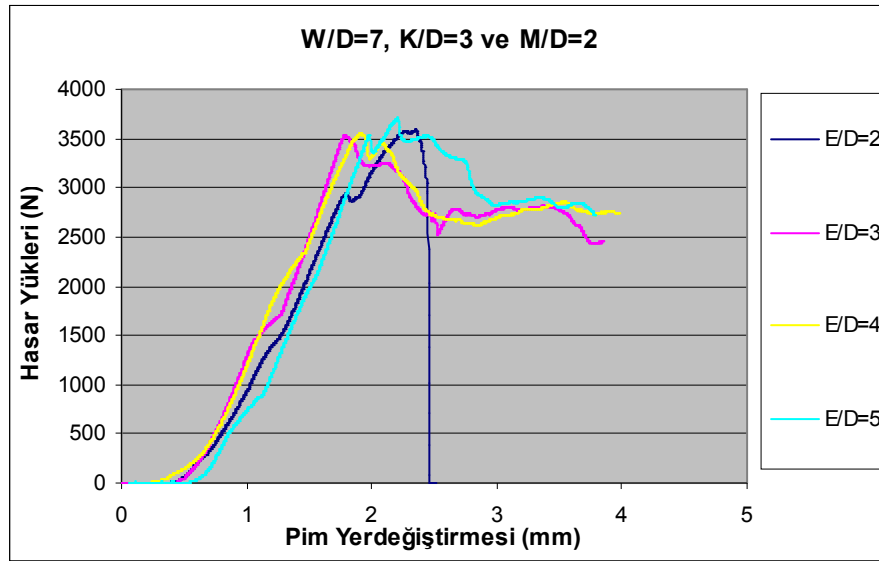


Şekil 3.81. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W=35$ mm, $K=15$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.82 ve Şekil 3.83' te ise 6 ay süre ile deniz suyu içerisine konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından uyumluluk gösterdiği görülmektedir.

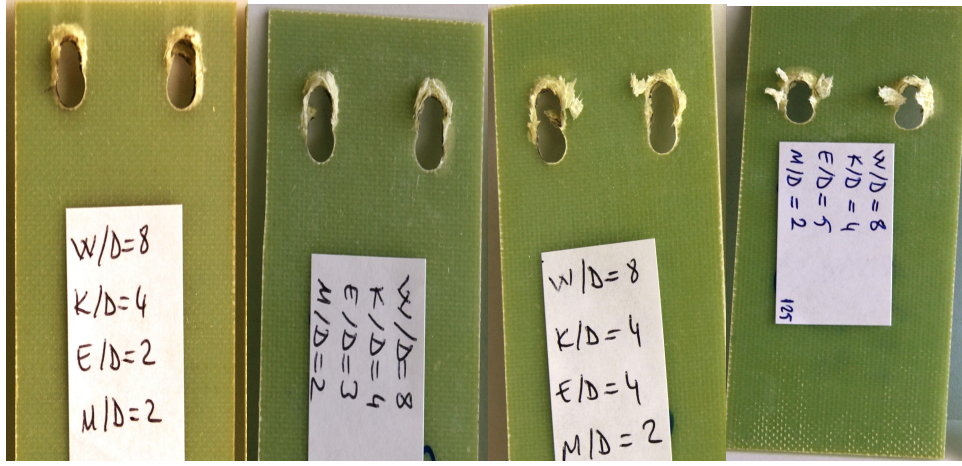


Şekil 3.82. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=35$ mm, $K=15$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

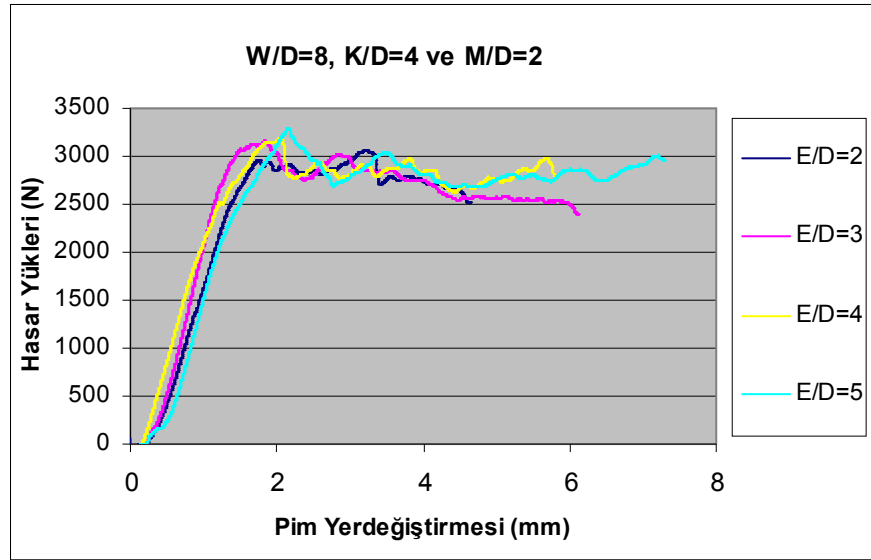


Şekil 3.83. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=35$ mm, $K=15$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

$W=40$ mm, $K=20$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisine konulduktan sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görölmektedir. Kuru haldeki numunelerin hasar fotoğrafları ve grafikleri incelendiğinde birbiri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğu görölmektedir (Şekil 3.84 ve Şekil 3.85).

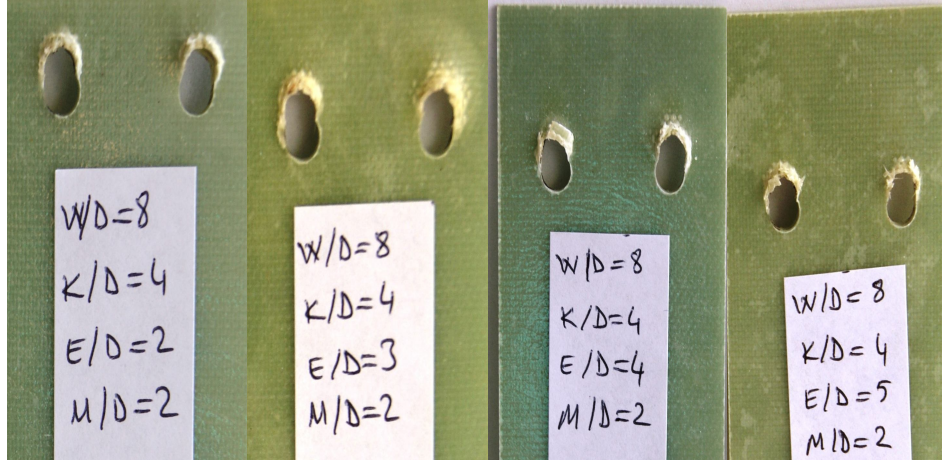


Şekil 3.84. Kuru halde $W=40$ mm, $K=20$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

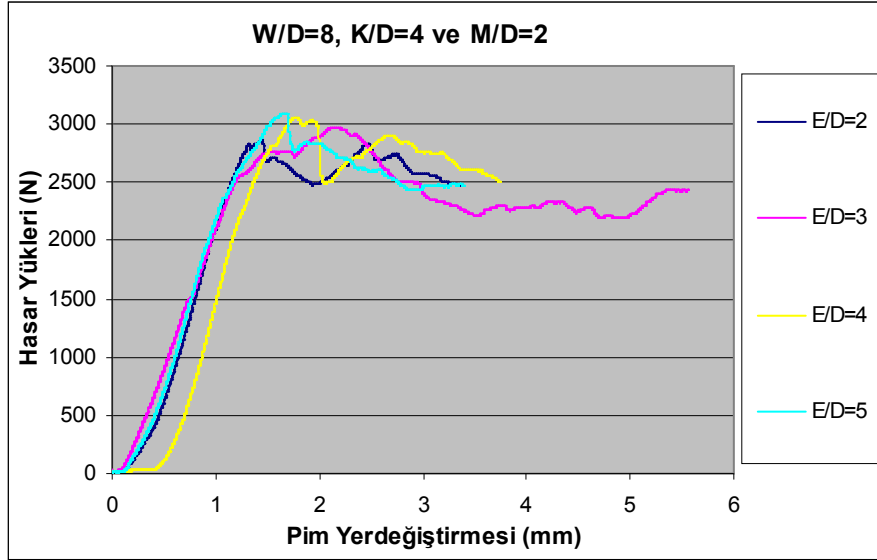


Şekil 3.85. Kuru halde $W=40$ mm, $K=20$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.86 ve Şekil 3.87' de ise 3 ay deniz suyu içersine konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğı görölmektedir.

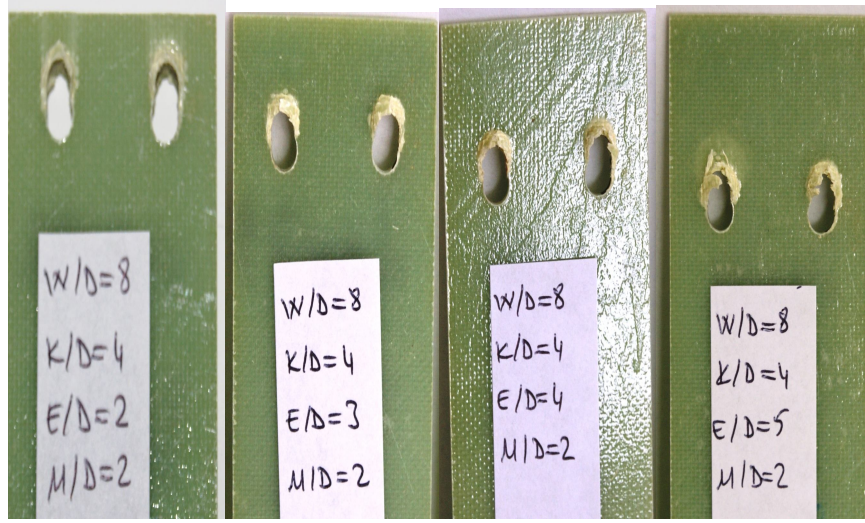


Şekil 3.86. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=40$ mm, $K=20$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

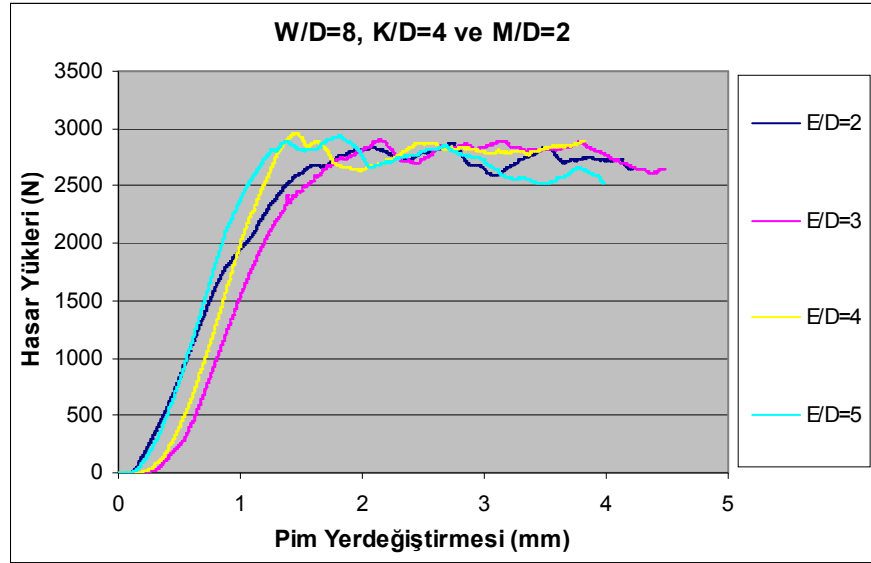


Şekil 3.87. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=40$ mm, $K=20$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.88 ve Şekil 3.89’ da ise 6 ay deniz suyu içerisine konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından uyumluluk gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğu görölmektedir

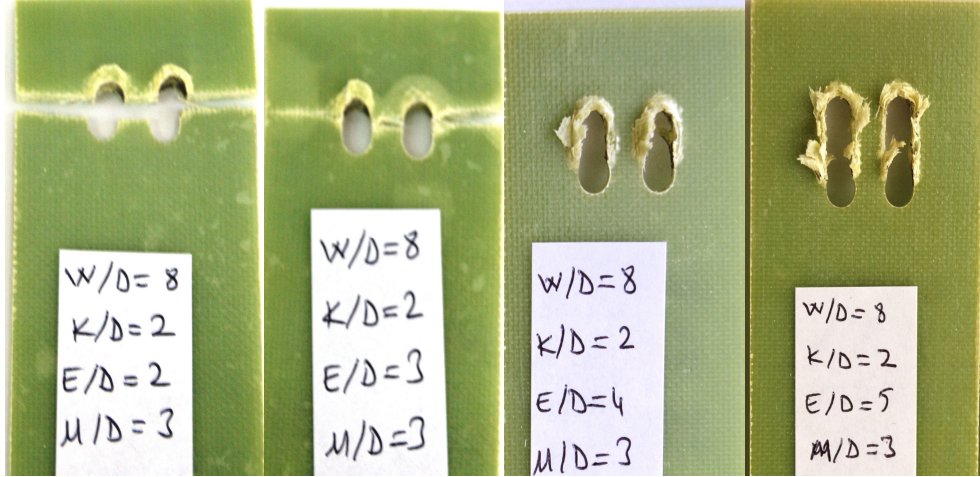


Şekil 3.88. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=40$ mm, $K=20$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

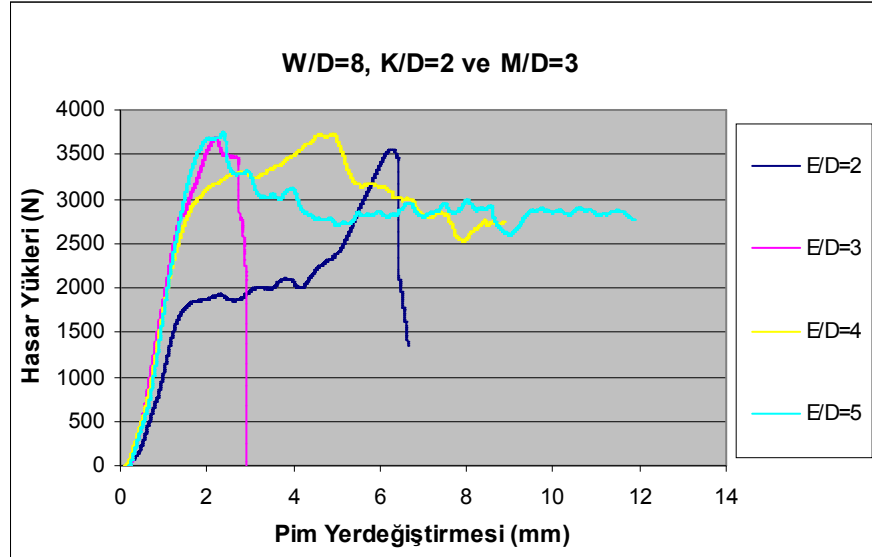


Şekil 3.89. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=40$ mm, $K=20$ mm, $M=10$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

$W=40$ mm, $K=10$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyuunda bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görölmektedir. Kuru haldeki numunelerin hasar fotoğrafları ve grafikleri incelendiğinde birbirleriyle hasar tipleri açısından uyumluluk gösterdikleri görölmektedir (Şekil 3.90 ve Şekil 3.91).

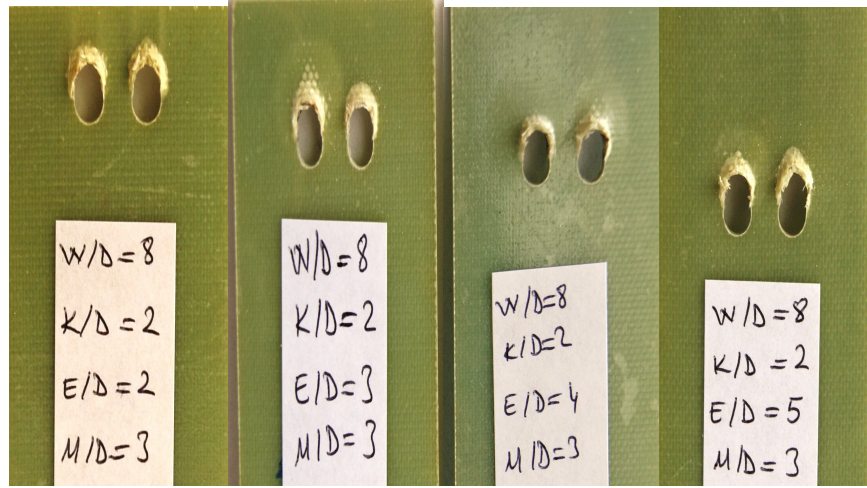


Şekil 3.90. Kuru halde $W=40$ mm, $K=10$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

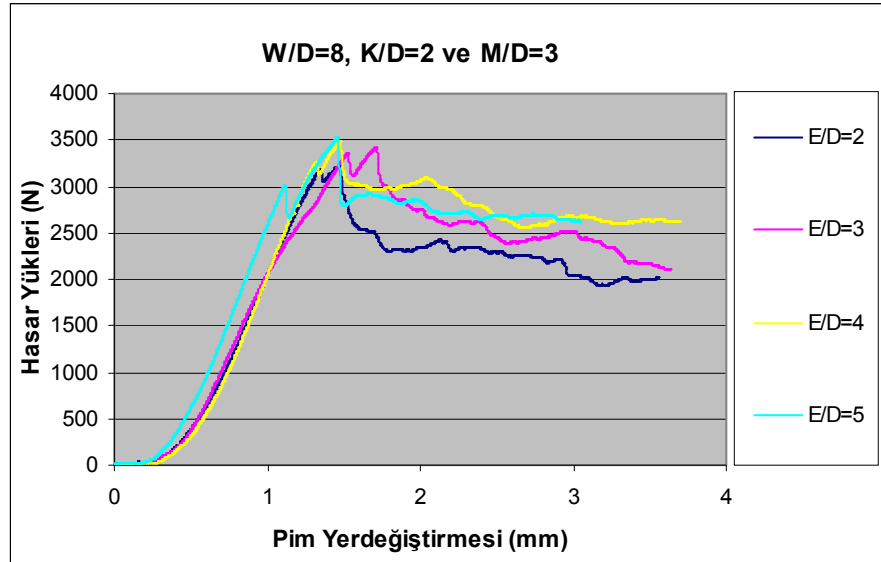


Şekil 3.91. Kuru halde $W=40$ mm, $K=10$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.92 ve Şekil 3.93' te ise 3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri ağısından uyumluluk gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğu görülmektedir



Şekil 3.92. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=40$ mm, $K=10$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

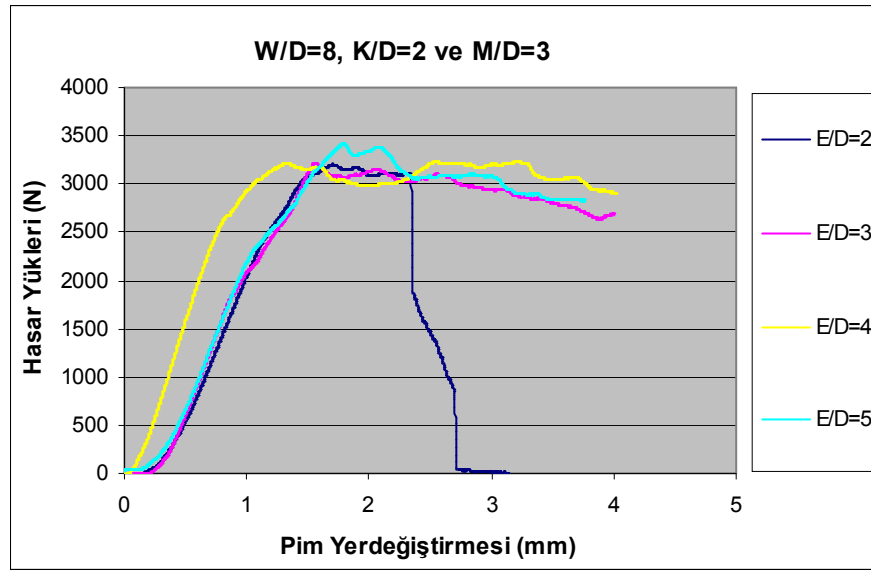


Şekil 3.93. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=40$ mm, $K=10$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.94 ve Şekil 3.95’ te ise 6 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin hasar tipleri açısından birbirleri ile benzerlik gösterdiği görölmektedir.

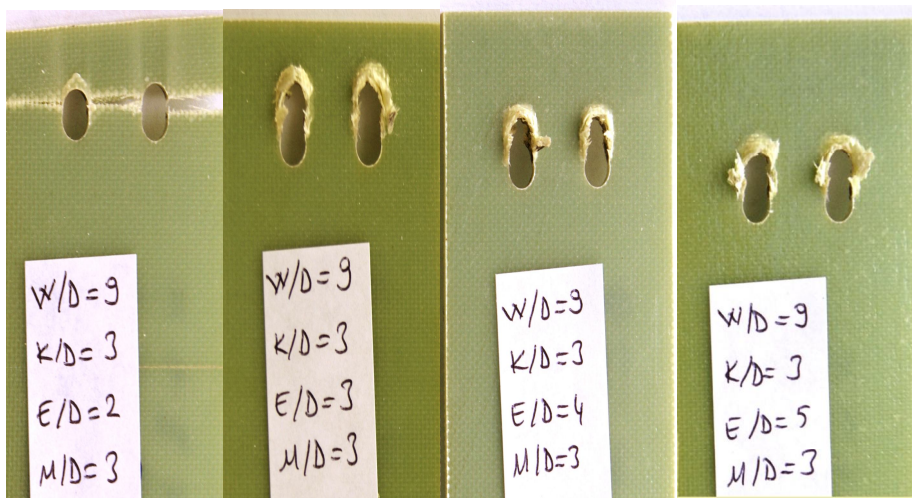


Şekil 3.94. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=40$ mm, $K=10$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

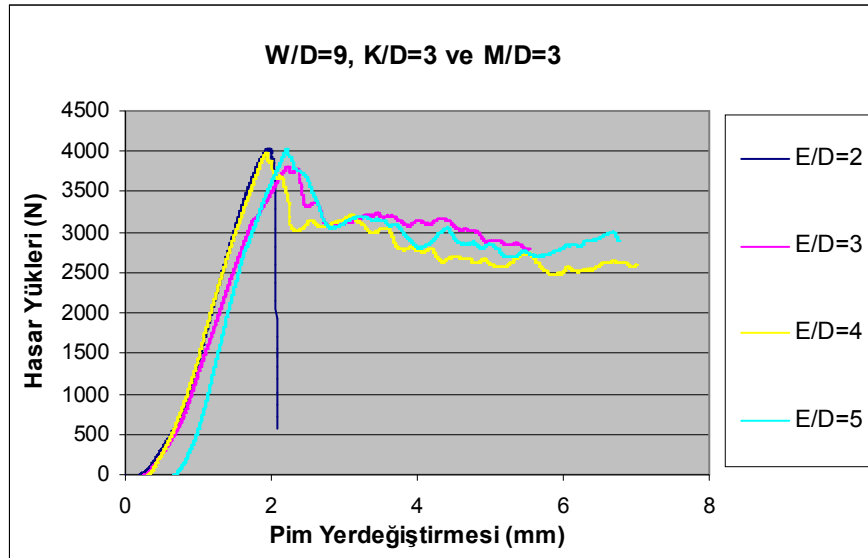


Şekil 3.95. 6 ay deniz suyunda bekletilen $W=40$ mm, $K=10$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiği

$W=45$ mm, $K=15$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görülmektedir. Kuru numunelerin hasar fotoğrafları ve grafikleri incelendiğinde birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdikleri görülmektedir (Şekil 3.96 ve Şekil 3.97).

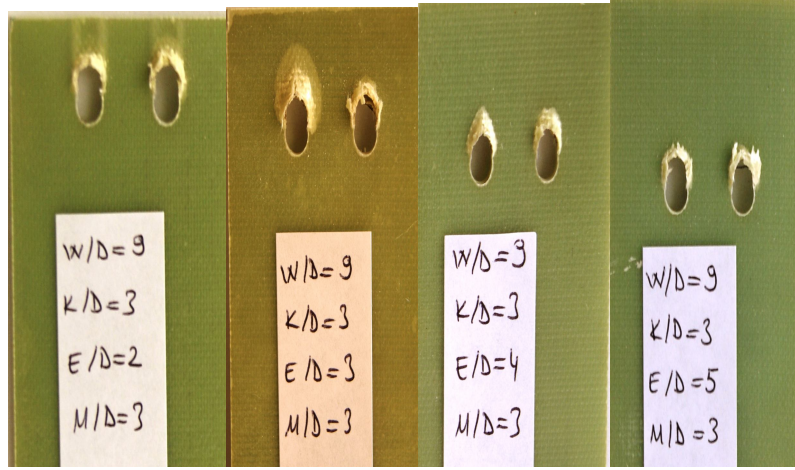


Şekil 3.96. Kuru halde $W=45$ mm, $K=15$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

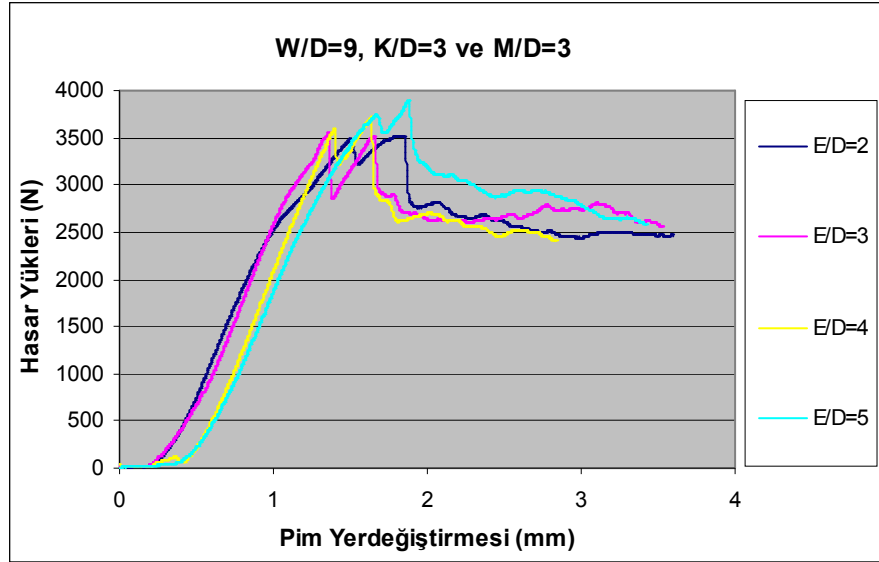


Şekil 3.97. Kuru halde $W=45$ mm, $K=15$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.98 ve Şekil 3.99' da ise 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdikleri ve ezilme hasar tipi olduğu görülmektedir.

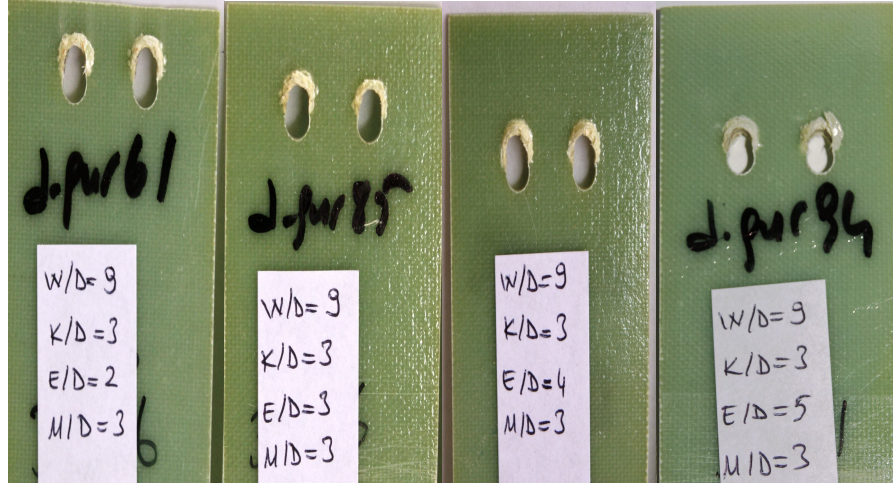


Şekil 3.98. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=45$ mm, $K=15$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

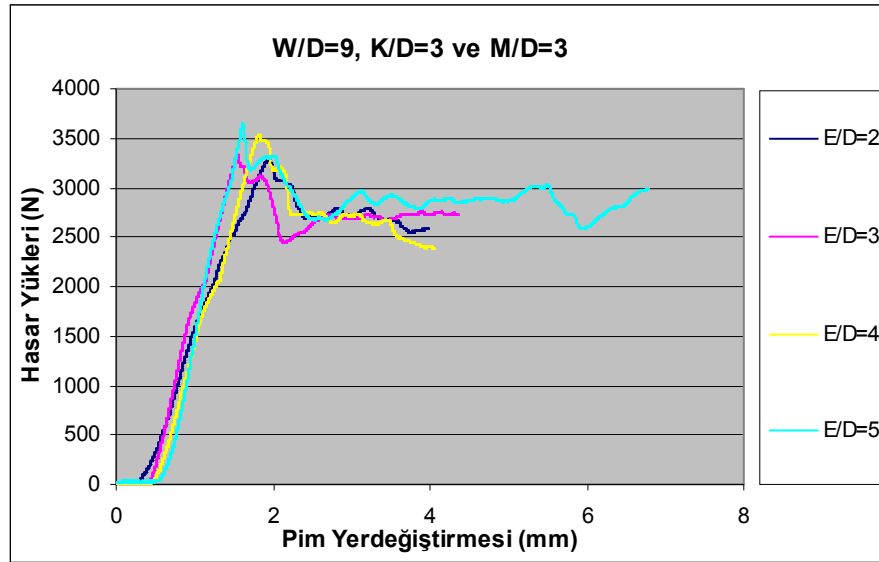


Şekil 3.99. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=45$ mm, $K=15$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.100 ve Şekil 3.101' de ise 6 ay deniz suyu içerisinde konulan numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.100. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=45$ mm, $K=15$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

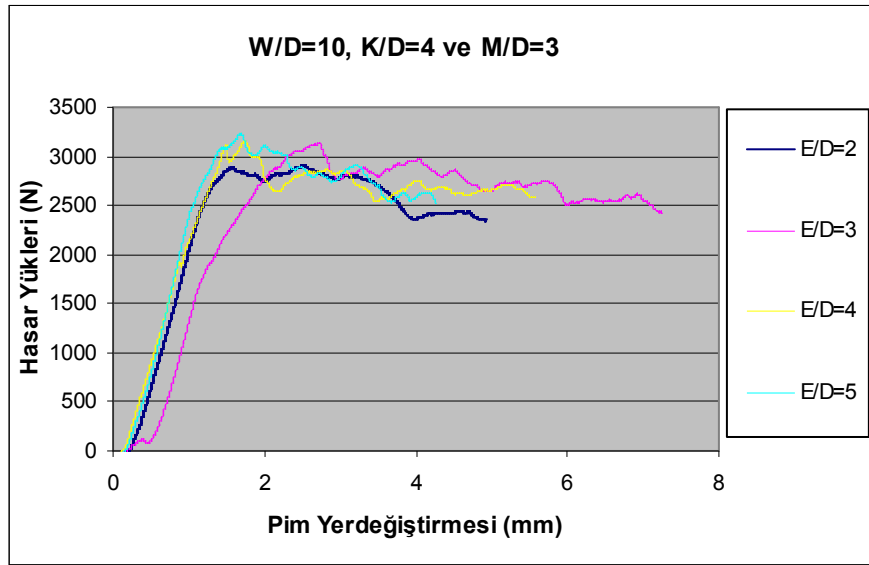


Şekil 3.101. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=45$ mm, $K=15$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

$W=50$ mm, $K=20$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerine konulduktan sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri görölmektedir. Kuru haldeki numunelerin fotoğrafları ve grafikleri incelendiğinde birbirleriyle hasar tipleri açısından benzerlik gösterdikleri ve ezilme hasar tipi oluştuğı görölmektedir (Şekil 3.102 ve Şekil 3.103).

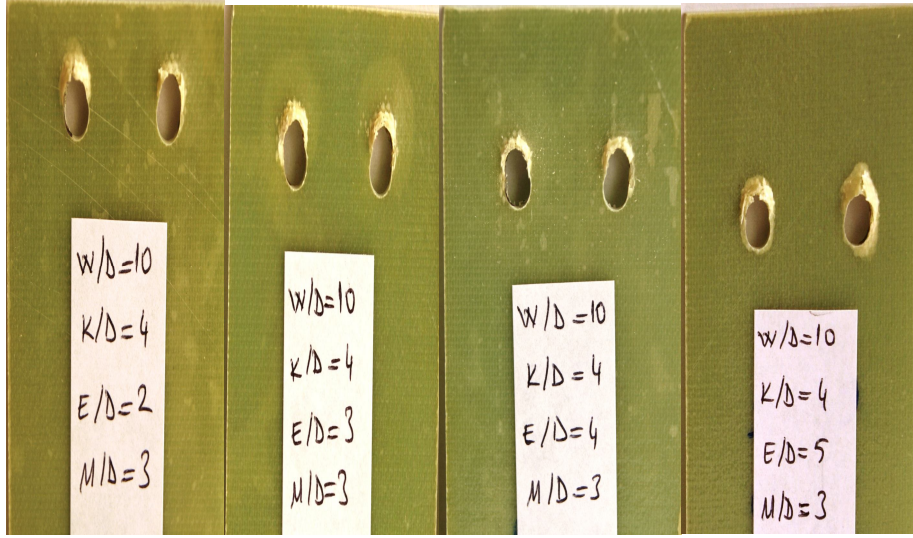


Şekil 3.102. Kuru halde $W=50$ mm, $K=20$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

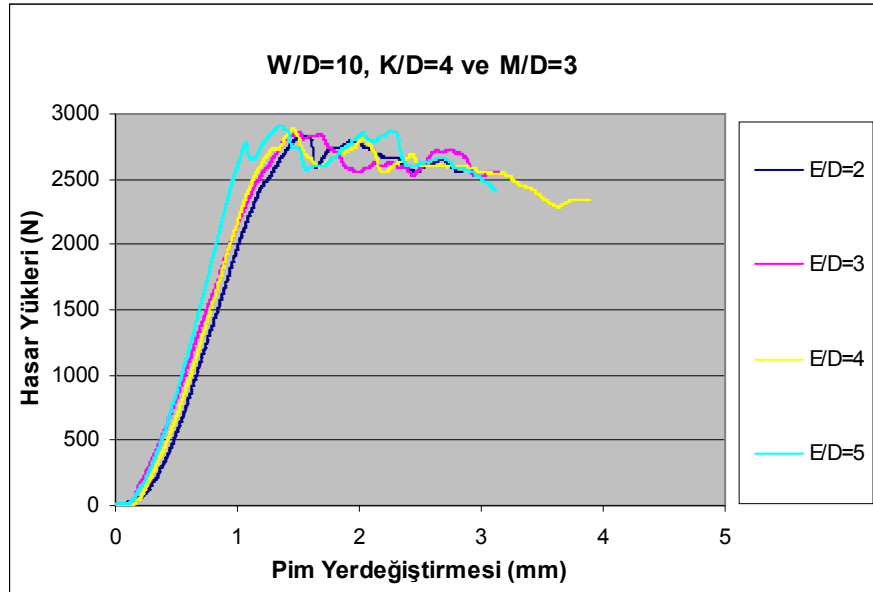


Şekil 3.103. Kuru halde $W=50$ mm, $K=20$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.104 ve Şekil 3.105’ de ise 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği görölmektedir.

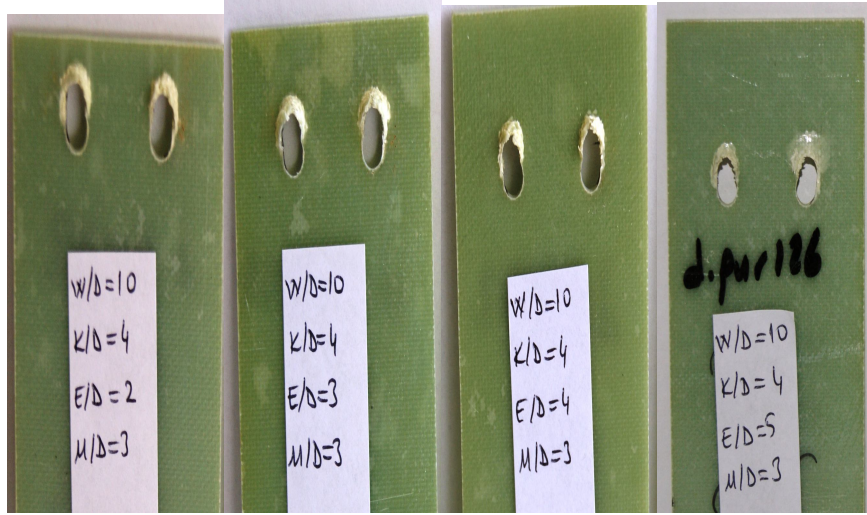


Şekil 3.104. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=50$ mm, $K=20$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

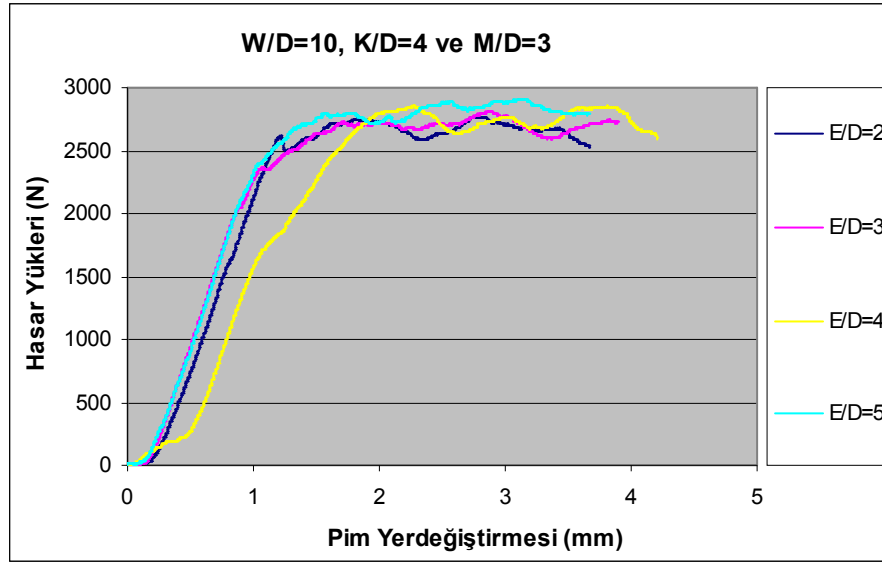


Şekil 3.105. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=50$ mm, $K=20$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.106 ve Şekil 3.107’ de görüldüğü gibi 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.106. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=50$ mm, $K=20$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

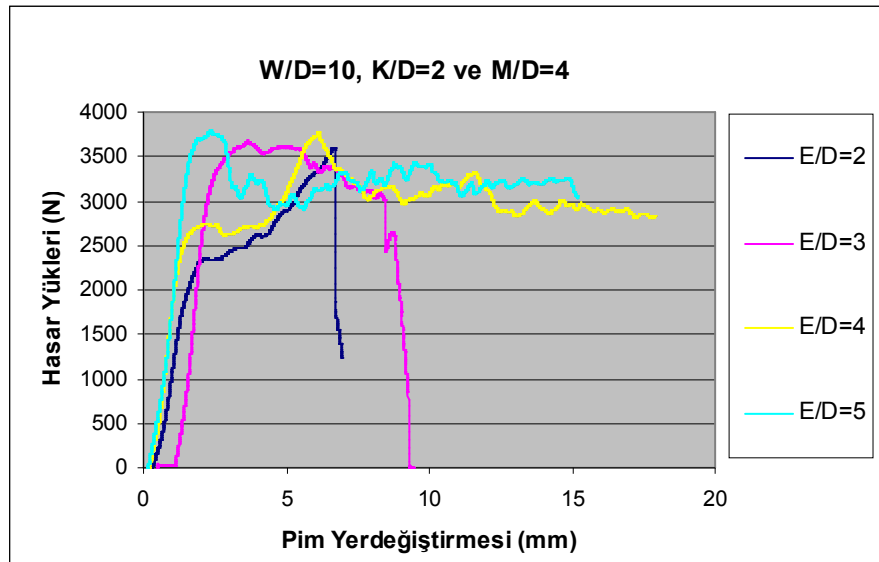


Şekil 3.107. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=50$ mm, $K=20$ mm, $M=15$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

$W=50$ mm, $K=10$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerine konulduktan sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görölmektedir. Kuru numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiklerinin birbirleriyle hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiğı görölmektedir (Şekil 3.108 ve Şekil 3.109).

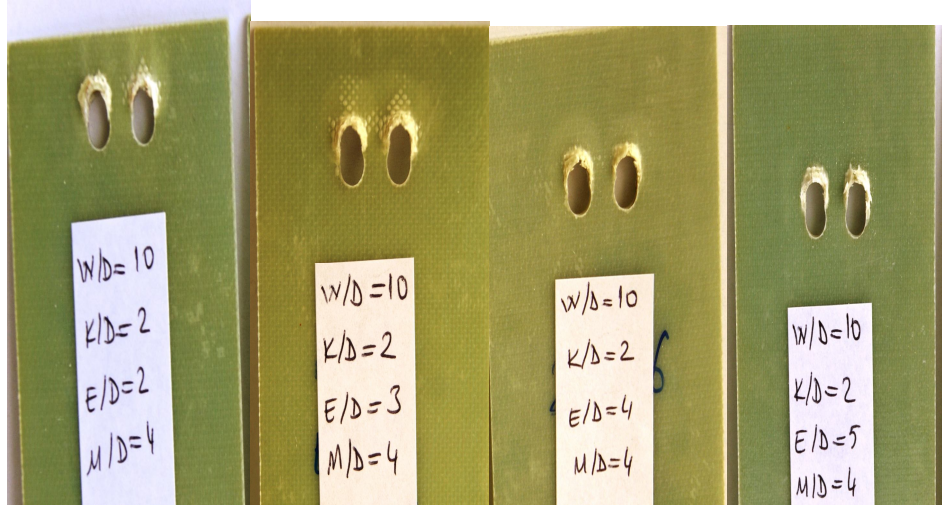


Şekil 3.108. Kuru halde $W=50$ mm, $K=10$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

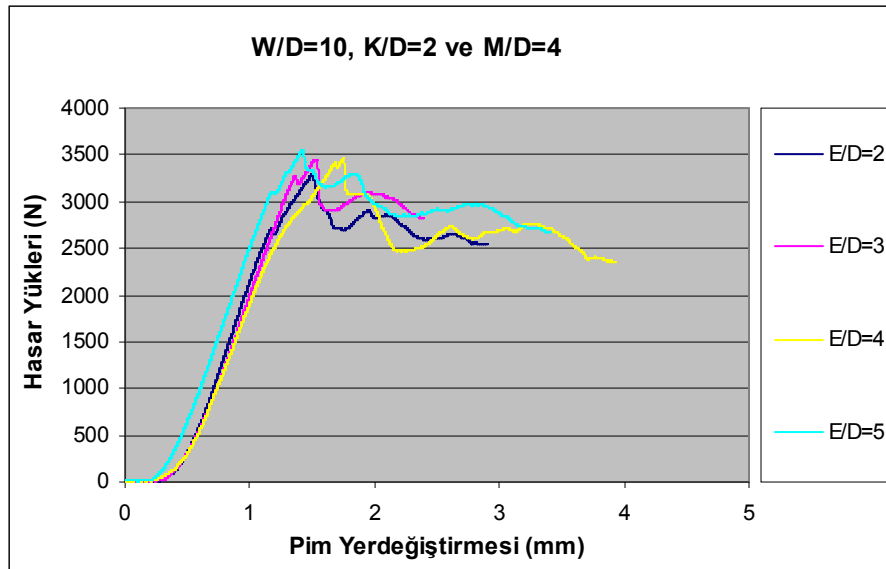


Şekil 3.109. Kuru halde $W=50$ mm, $K=10$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.110 ve Şekil 3.111’ de 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi olduğu görölmektedir.

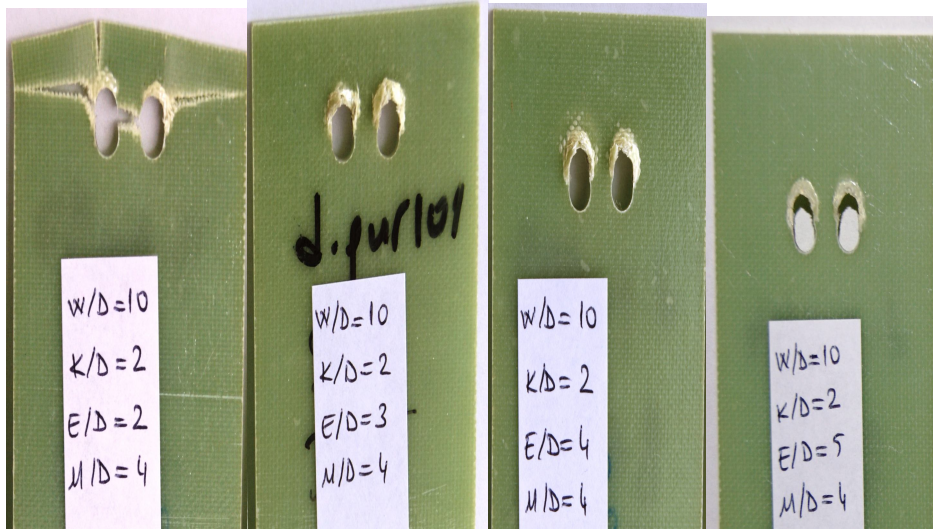


Şekil 3.110. 3 ay deniz suyu bekletilen $W=50$ mm, $K=10$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

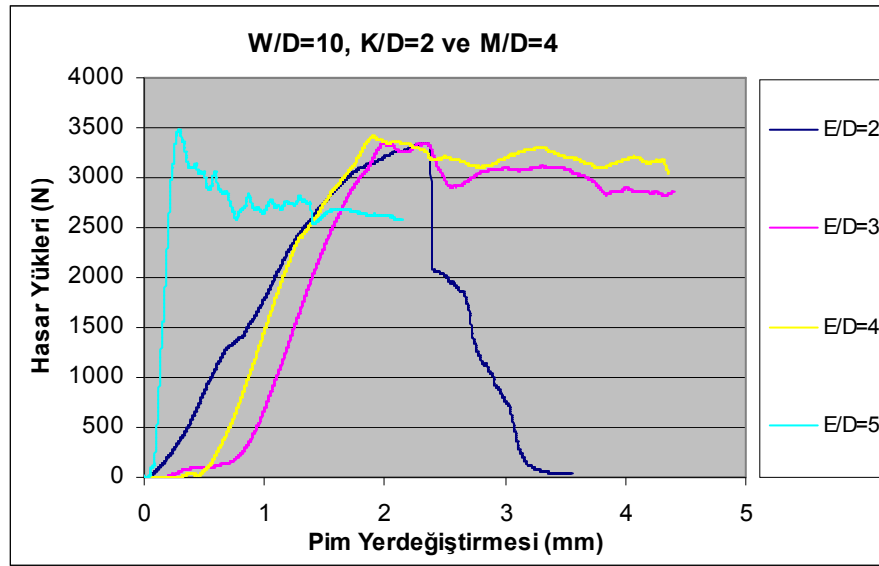


Şekil 3.111. 3 ay deniz suyu bekletilen $W=50$ mm, $K=10$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.112 ve Şekil 3.113’ te ise 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.112. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=50$ mm, $K=10$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

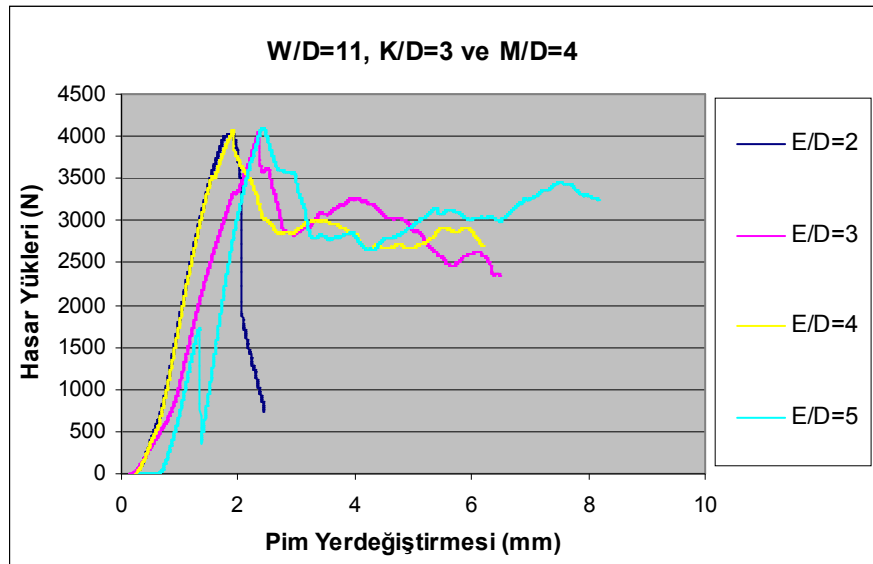


Şekil 3.113. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=50$ mm, $K=10$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

$W=55$ mm, $K=15$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görölmektedir. Kuru haldeki numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiklerinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği görölmektedir (Şekil 3.114 ve Şekil 3.115).

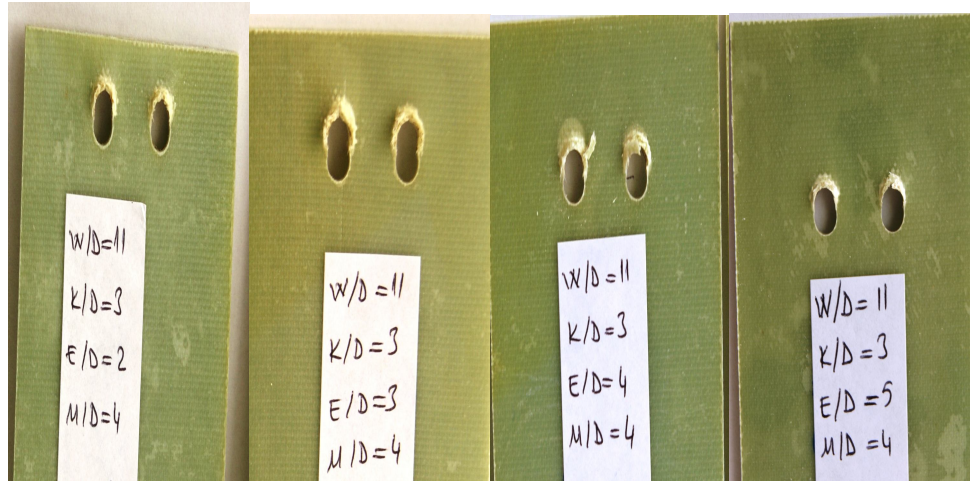


Şekil 3.114. Kuru halde $W=55$ mm, $K=15$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

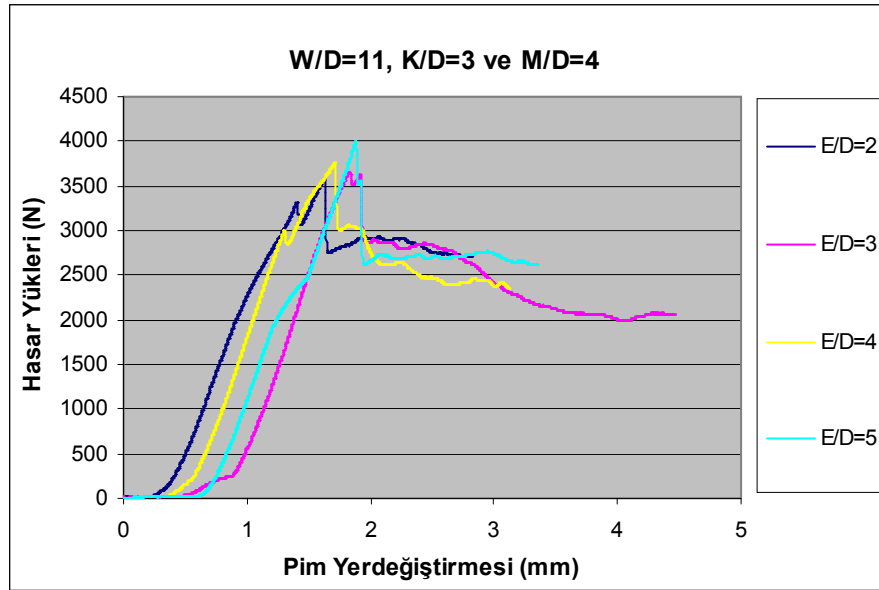


Şekil 3.115. Kuru halde $W=55$ mm, $K=15$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.116 ve Şekil 3.117' de ise 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğu görölmektedir.

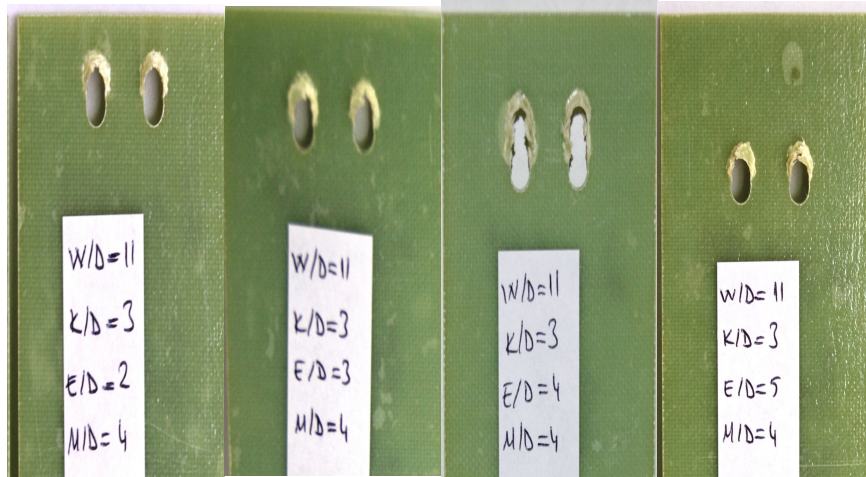


Şekil 3.116. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=55$ mm, $K=15$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

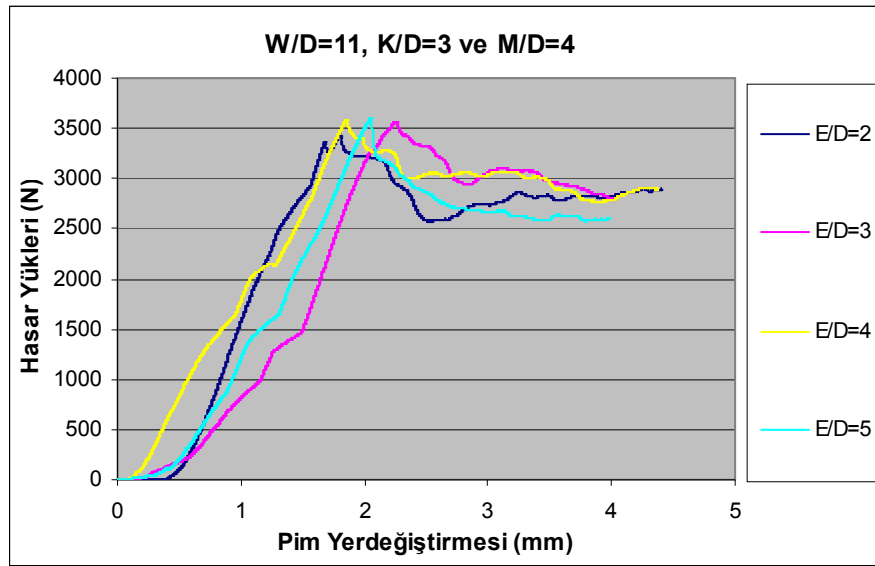


Şekil 3.117. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=55$ mm, $K=15$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.118 ve Şekil 3.119’ da ise 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğı görülmektedir.

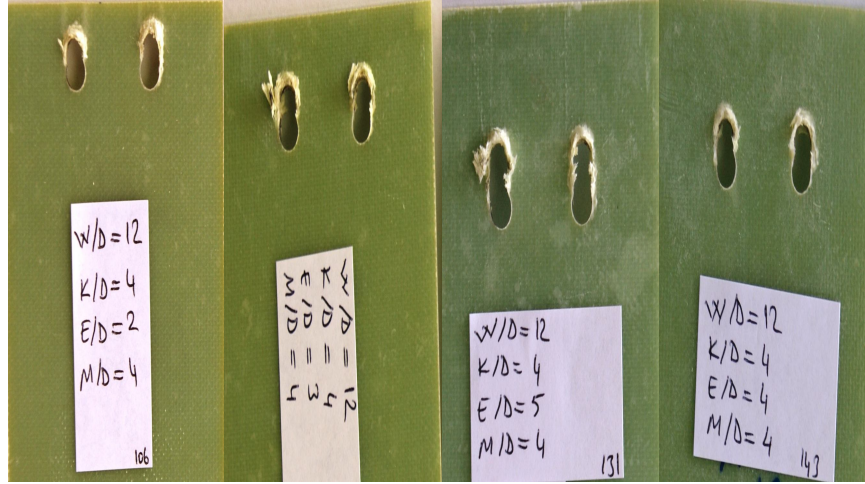


Şekil 3.118. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=55$ mm, $K=15$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

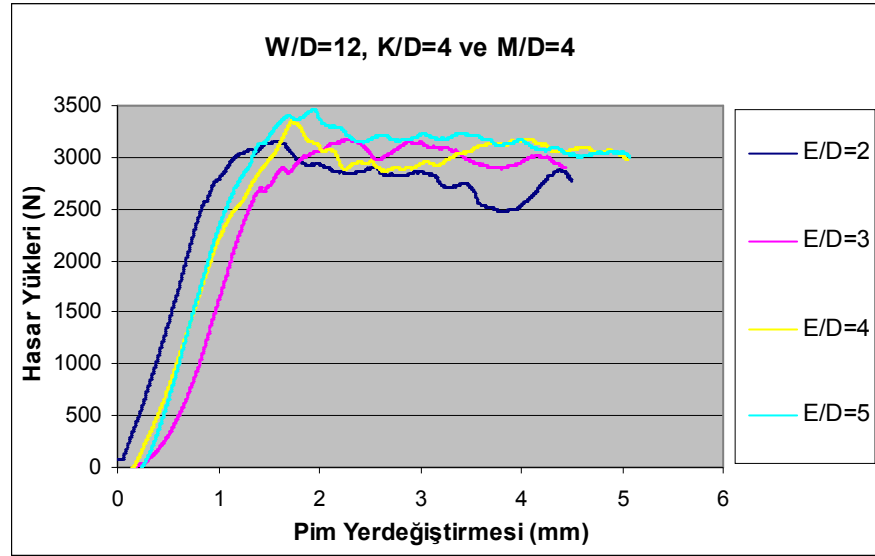


Şekil 3.119. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=55$ mm, $K=15$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

$W=60$ mm, $K=20$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerinde kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içinde bekletildikten sonra elde edilen hasar tipleri ve hasar yük grafikleri aşağıda görölmektedir. Kuru numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleriyle hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğu görölmektedir (Şekil 3.120 ve Şekil 3.121).

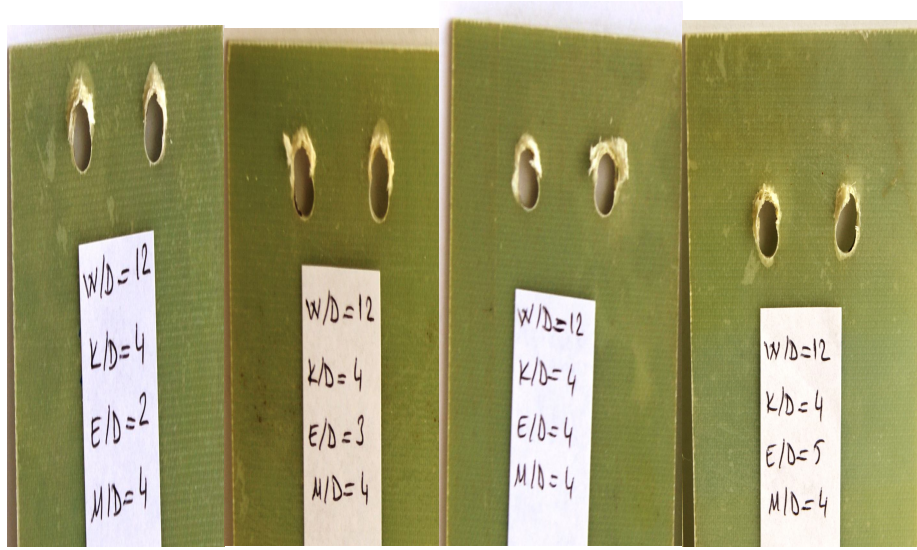


Şekil 3.120. Kuru halde $W=60$ mm, $K=20$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

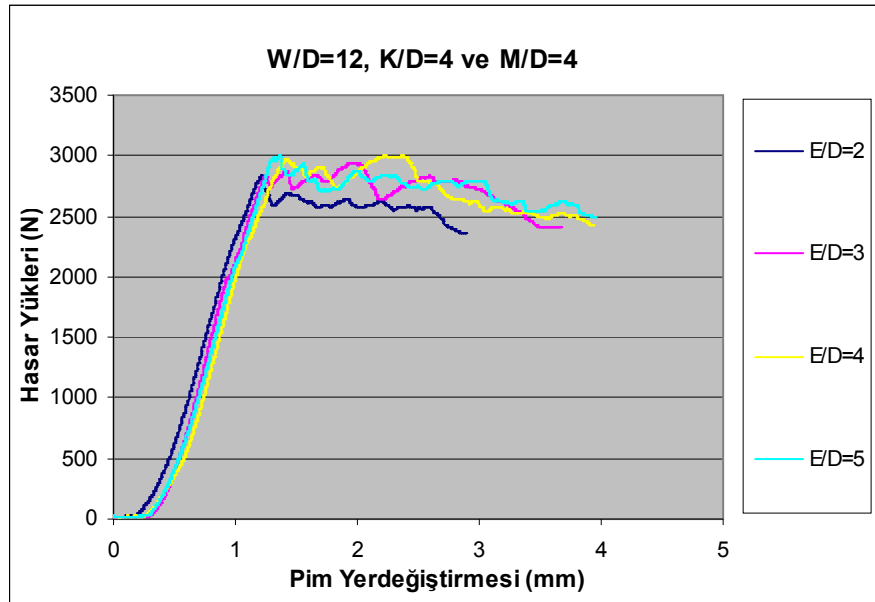


Şekil 3.121. Kuru halde $W=60$ mm, $K=20$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiği

Şekil 3.122 ve Şekil 3.123' te 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğu görülmektedir.

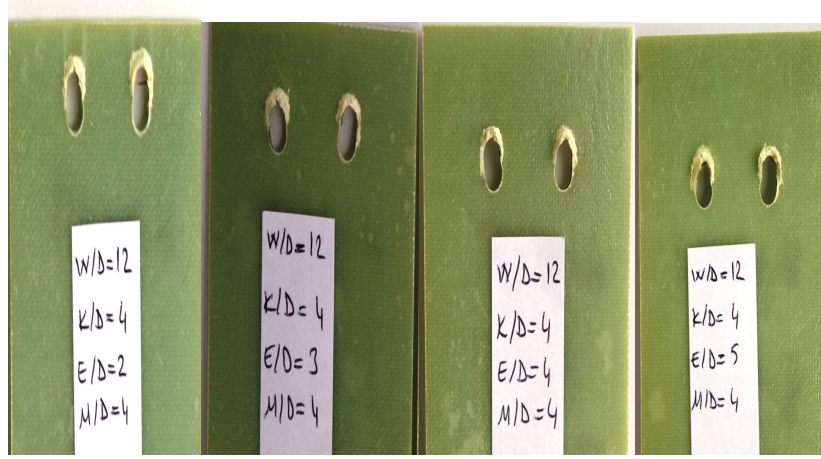


Şekil 3.122. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=60$ mm, $K=20$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları

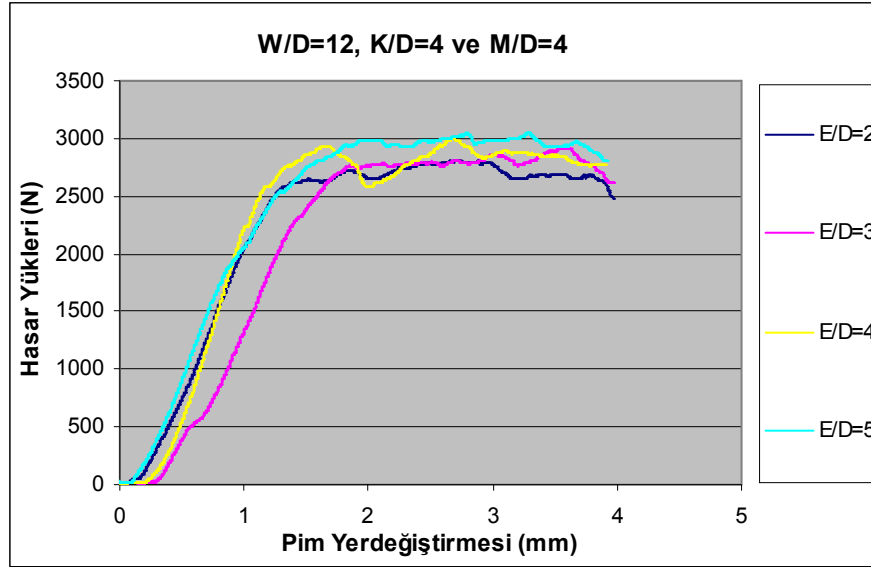


Şekil 3.123. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W=60$ mm, $K=20$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

Şekil 3.124 ve Şekil 3.125’ te 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin hasar fotoğrafları ve grafiğinin birbirleri ile hasar tipleri açısından benzerlik gösterdiği ve ezilme hasar tipi oluştuğı görülmektedir.



Şekil 3.124. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=60$ mm, $K=20$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar fotoğrafları



Şekil 3.125. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W=60$ mm, $K=20$ mm, $M=20$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm ölçülerindeki numunelerin hasar grafiğı

3.1.5. Hasar tiplerinin karşılaştırılması

Hazırlanan numuneler kuru halde iken çekme testine tabi tutularak, hasar tipleri belirlenmiştir. Aynı şekilde deniz suyu içerisinde 3 ay ve 6 ay süre ile bekletilen numunelerde her aşama sonrasında çekme testine tabi tutularak hasar tipleri belirlenmiştir. Aşağıdaki Tablo 3.5’ te deney sonrası elde edilen hasar tipleri görölmektedir. Her üç aşamada da genellikle yırtılma ve ezilme hasar tipi veya ikisi bir arada olan hasar tipleri elde edilmiştir. Yine her üç aşamada değişmeyen hasar tipleri gözlenirken, bu aşamalarda farklılık gösteren hasar tipleri de elde edilmiştir.

W=20 mm, K=10 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde her üç aşamada da (kuru, 3 ay deniz suyu, 6 ay deniz suyu) yırtılma hasar tipi meydana gelmiştir.

W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde kuru haldeki numunelerin hasar tipi yırtılma olarak gözlenirken bu durum 3 ay süre ile deniz suyunda bekletilen aynı boyutlardaki numunelerde farklılaştığı gözlenmiştir. W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10 mm boyutlarındaki numunede hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelmiştir. Aynı numunelerin E=15, 20 ve 25 mm boyutları için yırtılma hasar tipi oluşmuştur. Ancak bu durum 6 ay süre ile deniz suyuna konulan aynı boyutlardaki numunelerde farklılaşmıştır. W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarında 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numunelerde yırtılma hasar tipi meydana gelmiştir.

W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutları için kuru haldeki numunelerin çekme testine tabi tutulması sonucu elde edilen hasar tipi bütün boyutlarda yırtılma olarak elde edilmiştir. Ancak aynı boyutlarda 3 ay için deniz suyunda bekletilen numunelerde bu durumun farklılaştığı deneysel olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10 mm boyutlarındaki numunede hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak gözlenmiştir. E= 15, 20, 25 mm için ise ezilme hasar tipi meydana gelmiştir. 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen aynı boyutlardaki numunelerde hasar tipi oluşma aşamalarında değişimler gözlenmiştir. 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10 mm boyutlarındaki numunede hasar tipi yırtılma olarak tespit edilmiştir. E=15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde ise önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) hasar tipi meydana gelmiştir.

W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15 mm boyutlarındaki kuru haldeki numunelerin deney sonucu hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelmiştir. Ancak E değerinin artması ile hasar tipi ezilme olarak gözlenmiştir. Yani kuru halde E=20, 25 mm için aynı boyutlardaki numunelerde hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir. 3 ay süre ile deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir. 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numunelerdeki durum ise kuru halde elde edilen hasar tipi ile benzer şekilde meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapılan çekme testi sonucu W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15 mm boyutlarındaki numunelerde

hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) oluşurken, bu durum aynı boyutlarda E=20 ve 25 mm için ise ezilme hasar tipi olarak elde edilmiştir.

W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10 mm boyutundaki kuru haldeki numunelerde deney sonucu hasar tipi yırtılma olarak tespit edilirken, E=15, 20, 25 mm için ise ezilme hasar tipi elde edilmiştir. 3 ay süre ile deniz suyunda bekletilen W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir. 6 ay süre ile deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerde elde edilen hasar tipleri kuru halde elde edilen hasar tipi ile benzeştiği görülmüştür. Bu aşamada durumda W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10 mm için önce ezilme daha sonra yırtılma oluşurken (B+N), E=15, 20, 25 mm için ise ezilme hasar tipi oluşmuştur.

W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde her üç aşamada elde edilen hasar tipinin aynı olduğu görülmüştür. Kuru halde, 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerde deney sonrası elde edilen hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir.

W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15 mm boyutlarındaki kuru haldeki numunelerde elde edilen hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak tespit edilirken, bu durum E=20, 25 mm için ise ezilme olarak elde edilmiştir. Ancak 3 ay süre ile deniz suyu içerisinde bekletilen aynı boyutlardaki numunelerin tüm boyutlarında hasar tipi ezilme olarak elde edilmiştir. Altı ay süre ile deniz suyunda bekletilen, W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10 mm boyutundaki numunede elde edilen hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak tespit edilirken, E=15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde ise ezilme hasar tipinin meydana geldiği tespit edilmiştir.

W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10 mm boyutundaki kuru haldeki numunelerde hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma olarak (B+N) meydana gelmiştir. E=15, 20, 25 mm ölçülerinde ise hasar tipi ezilme olarak elde edilmiştir. 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde hasar tipi her iki aşamada da değişmemiş ve ezilme olarak meydana gelmiştir.

W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde her üç aşamada (kuru halde, 3 ay deniz suyu ve 6 ay deniz suyu) hasar tipi değişmemiş ve ezilme olarak meydana geldiği tespit edilmiştir.

W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15 mm boyutlarında kuru haldeki numunelerde deney sonrası hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak

meydana gelirken, E=20, 25 mm boyutundaki numunelerde ise ezilme olarak değiştiği gözlenmiştir. 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10 mm boyutundaki numunelerde hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelirken, E=15, 20, 25 mm için ise ezilme hasar tipi elde edilmiştir.

W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10 mm boyutunda kuru haldeki numunede deney sonrası hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak elde edilirken, E=15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde ise ezilme hasar tipi meydana gelmiştir. 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyu içerisinde bekletilen W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde hasar tipi ezilme olarak elde edilmiş ve değişmediği tespit edilmiştir.

W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde her üç aşamada da (kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde) ezilme hasar tipinin meydana geldiği ve değişmediği tespit edilmiştir.

Her üç aşamada elde edilen hasar tipleri gerek tablo değerlerinden gerekse fotoğraflardan incelendiğinde; M=5 mm (M/D=1) olan kuru halde ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerde meydana gelen hasar tipinin yırtılma olarak oluştuğu tespit edilmiştir.

M=10 mm (M/D=2) olan kuru haldeki ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerde hasar tiplerinin aynı olduğu ve benzer şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Bu numunelerde çoğunlukla ezilme hasar tipi meydana gelmiştir.

M=15 mm (M/D=3) olan kuru haldeki ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerde hasar tiplerinin birbirleriyle benzer özellik gösterdiği ve çoğunlukla ezilme olarak meydana geldiği tespit edilmiştir.

M=20 mm (M/D=4) olan kuru haldeki ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerde hasar tiplerinin birbirleriyle benzer özellik gösterdiği ve çoğunlukla ezilme olarak meydana geldiği tespit edilmiştir.

3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen M=10, 15, 10 mm (M/D=2, M/D=3, M/D=4) olan tüm numunelerde hasar tipinin ezilme olarak meydana geldiği tespit edilmiştir. M=5 mm (M/D=1) boyutlarındaki numunelerde ise çoğunlukla (B+N) veya yırtılma hasar tipinin meydana geldiği görölmüştür.

Sonuç olarak hasar tipleri: $M/D=1$ olduğunda hem kuru hem de deniz suyu içerisinde 6 ay süre ile bekletilen numunelerin tümünde yırtılma hasar tipi olduğu gözlenmiştir. Ancak bu durum 3 ay süre ile deniz suyuna bekletilen numunelerde farklılıklar oluşturmuştur. $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$ ve $E/D=2, 3, 4, 5$ oranları olduğunda her üç durumda da yırtılma hasar tipi olduğu gözlenmiştir. $M/D \geq 2$ olduğunda, deniz suyu içerisinde 3 ay süre ile bekletilen numunelerin tüm boyutlarında ezilme hasar tipi elde edilmiştir. $W/D=6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$, $M/D=2, 3, 4$ ve $E/D=4, 5$ oranlarında her üç durumda da ezilme hasar tipi elde edilmiştir. $W/D=8$, $K/D=4$, $M/D=2$ ve $E/D=2, 3, 4, 5$ oranlarında her üç durumda ezilme hasar tipinin olduğu gözlenmiştir. $W/D=10$, $K/D=4$, $M/D=3$ ve $E/D=3, 4, 5$ oranlarında her üç durumda da ezilme hasar tipinin meydana geldiği gözlenmiştir. $W/D=12$, $K/D=4$, $M/D=4$ ve $E/D=2, 3, 4, 5$ oranlarında her üç durumda da ezilme hasar tipi elde edildiği gözlenmiştir.

Tablo 3.5. Deniz suyunun hasar tiplerine etkisi

Numune Boyutları		Hasar Tipi		
		Kuru	Deniz suyu içinde 3 ay	Deniz suyu içinde 6 ay
$W/D=4$ $K/D=2$ $M/D=1$	$E/D=2$	N	N	N
	$E/D=3$	N	N	N
	$E/D=4$	N	N	N
	$E/D=5$	N	N	N
$W/D=5$ $K/D=3$ $M/D=1$	$E/D=2$	N	B+N	N
	$E/D=3$	N	B	N
	$E/D=4$	N	B	N
	$E/D=5$	N	B	N
$W/D=6$ $K/D=4$ $M/D=1$	$E/D=2$	N	B+N	N
	$E/D=3$	N	B	B+N
	$E/D=4$	N	B	B+N
	$E/D=5$	N	B	B+N
$W/D=6$ $K/D=2$ $M/D=2$	$E/D=2$	B+N	B	B+N
	$E/D=3$	B+N	B	B+N
	$E/D=4$	B	B	B
	$E/D=5$	B	B	B
$W/D=7$ $K/D=3$ $M/D=2$	$E/D=2$	N	B	B+N
	$E/D=3$	B	B	B
	$E/D=4$	B	B	B
	$E/D=5$	B	B	B

Tablo 3.5.'in devamı

W/D=8 K/D=4 M/D=2	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=8 K/D=2 M/D=3	E/D=2	B+N	B	B+N
	E/D=3	B+N	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=9 K/D=3 M/D=3	E/D=2	B+N	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=10 K/D=4 M/D=3	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=10 K/D=2 M/D=4	E/D=2	B+N	B	B+N
	E/D=3	B+N	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=11 K/D=3 M/D=4	E/D=2	B+N	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=12 K/D=4 M/D=4	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B

3.2. Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizinin Sayısal Çözümü

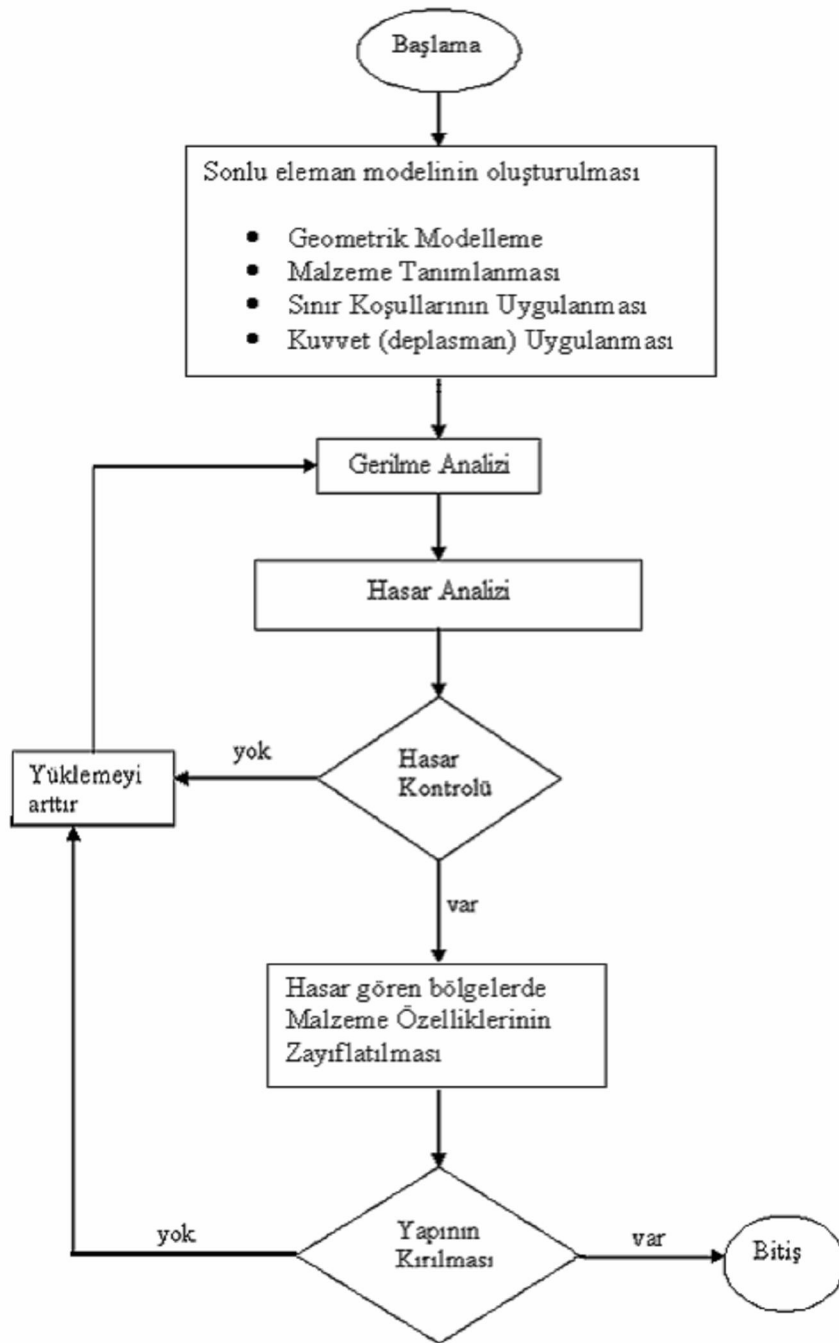
Bu kısımda pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelere çevre şartlarının etkisi, sonlu elemanlar metodu kullanılarak ANSYS 11.0 paket programında incelenmiştir. İki paralel pim bağlantılı tüm numunelerin sonlu eleman modelleri ANSYS 11.0 sonlu eleman yazılım paketi kullanılarak oluşturulmuştur. Hasar analizi, ANSYS programında, ilerlemeli hasar analizi metodu kullanılarak yapılmıştır. ANSYS programında sayısal çalışmanın

yapılabilmesi için APDL kodları kullanılarak yazılmış olan alt program kullanılmıştır. ANSYS Parametric Design Language (APDL) kullanılarak hazırlanan program, ANSYS sonlu elemanlar analiz yazılımı içerisinde çalışmaktadır. Program, iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerde kullanılmaktadır.

Pim bağlantılarının sayısal analizi ile ilgili çalışmalar incelendiği zaman birçok araştırmacının sayısal çözüm metodu olarak hasar analizi kullanıldığı görülmektedir [15, 18, 22, 26, 28, 29, 32, 36, 38].

İki ya da üç boyutlu olarak yapılmış olan modellemelerde genellikle takip edilen yol aşağıdaki Şekil 3.126' de verilmiştir.

Bu çalışmada iki boyutlu modelleme yapılarak, sayısal analiz yapılmıştır. Deneysel çalışmada olduğu gibi sayısal çalışmada üç aşamada gerçekleşmiştir. Birinci aşamada deneysel çalışmada kuru numunelerden elde edilen mekanik özellikler programa girilerek sayısal analiz yapılmıştır. İkinci aşamada yine deneysel olarak 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen mekanik özellikler programa girilerek sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada da deneysel olarak 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen mekanik özellikler programa girilerek sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. İzlenen yöntem Şekil 3.126' de görülen akış şemasına uyacak şekilde hazırlanmıştır. İlk olarak her üç aşama için katı cismin modeli oluşturularak gerekli sınır şartları uygulanmıştır. İkinci adımda her üç aşamada gerilme analizi yapılmış ve her bir eleman için elde edilen gerilme değerleri elde edilmiştir. Son adımda ise yine her üç aşamada Tsai–Wu hasar kriteri kullanılarak elemanda meydana gelen hasarın türüne göre malzeme özellikleri indirgenmiş ve son hasar yüküne ulaşılması durumunda program sonlandırılmıştır.



Şekil 3.126. Hasar ilerleme algoritması [15, 69, 77, 78].

3.2.1. Tabakalı kompozit malzemelerde hasar analizi

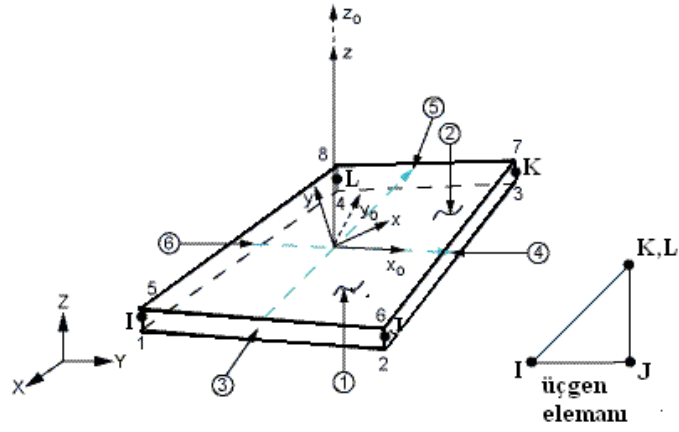
3.2.1.1. Sonlu elemanlar modelinin hazırlanması

Pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerin sonlu elemanlar modelinin ANSYS programında modellenmesi aşağıdaki adımlar takip edilerek yapılmıştır:

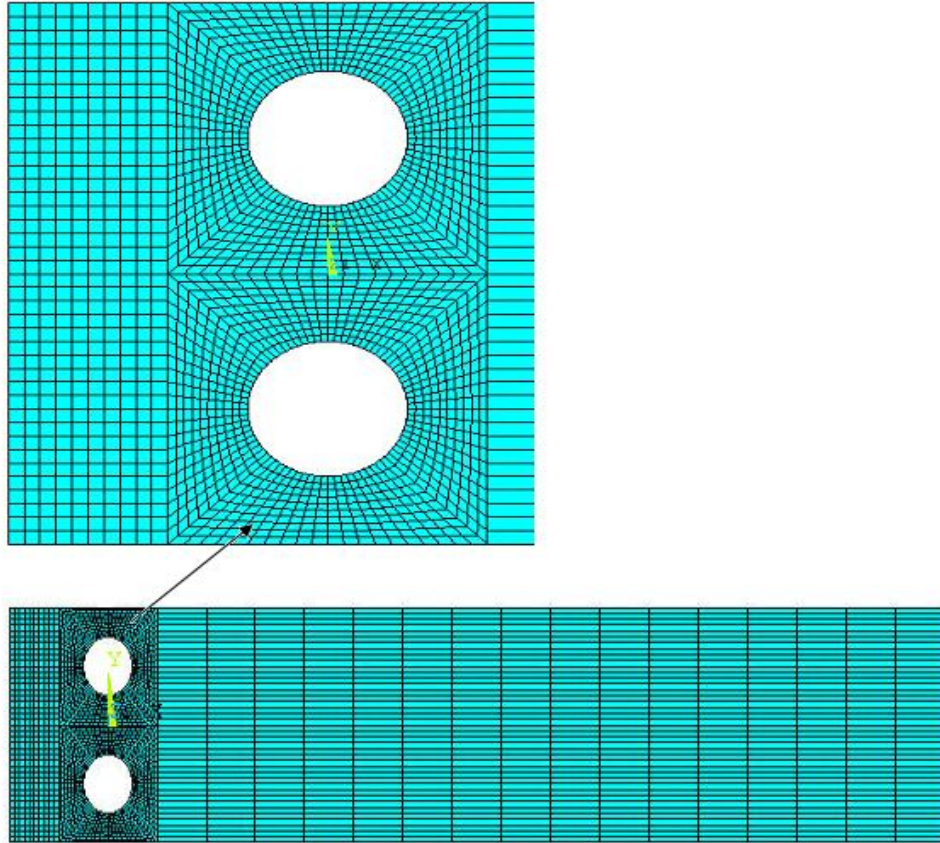
1. Kullanılacak sonlu eleman tipinin programa girilmesi.
2. Katı cismin oluşturulması.
3. Malzeme özelliklerinin programa girilmesi.
4. Katı cismin sonlu elemanlara bölünmesi.
5. Sınır şartlarının oluşturulması ve yüklemelerin yapılması.
6. Her bir elemana ait gerilme bileşenlerinin hesaplanması.
7. Tsai-Wu hasar kriterine göre o elemana ait hasar kontrolünün yapılması.
8. Eğer hasar varsa o elemana ait malzeme indirgemesinin yapılması.
9. Yıkıcı hasar yükünün son elemana ulaşmaması halinde yükün artırılarak 5. maddeye dönülmesi.
10. Yıkıcı hasar yükünün son elemana ulaşması halinde programın durdurulması [78].

Sayısal analiz için ANSYS programında sonlu eleman tipi olarak Shell 181 elemanı kullanılmıştır. Shell 181 eleman tipi orta- kalın kabuk yapıları için ince analiz yapmak için kullanılmaktadır. x, y, z yönlerindeki çeviriler ve x, y, z eksenleri rotasyonlarına sahip; her düğüm noktasında altı serbestlik dereceli 4 düğümlü bir elemandır. Shell 181 eleman tipi kullanımı doğrusal olmayan büyük gerilmeler veya lineer büyük rotasyonlar için oldukça uygundur. Doğrusal olmayan analizlerde plaka kalınlığındaki değişim hesaplanmaktadır. Shell 181 uygulanan yük etkisini hesaplar. Shell 181 elemanın etki alanında, hem tam hem de azaltılmış bir entegrasyon programları ile desteklenmektedir. Shell 181 sandviç konstrüksiyon veya tabakalı kompozit kabukların modellenmesi için tabakalı uygulamalar için kullanılabilir. Plaka genişliği ve uzunluğu ile karşılaştırıldığında plaka kalınlığı küçük olmalıdır ve uygulanan yük orta tabakaya göre simetrik ve düzlem olmalıdır [79].

Katı cisim oluşturulduktan sonra mekanik testlerle tespit edilmiş olan malzemenin mekanik özellikleri ve değerleri (Elastisite, Kayma modülü, Poisson oranı ile çekme, basma ve kayma mukavemeti) programa girilerek mekanik davranışı belirlenmiştir. Katı cisim sonlu elemanlara bölünmüş ve daha sonra sınır şartları programa girilmiştir. Sınır şartları sayısal analiz ve probleme yaklaşım şeklinin belirlenmesinde en uygun ve gerçekçi modellemenin yapılabilmesi için önemlidir. Bu amaçla modelde sayısal analiz için pim deliğinden uzak olan bölgelerdeki elemanlar büyük, pim deliğine yakın hassas bölgeler ise daha sık elemanlar kullanılarak sonlu elemanlara bölünmüştür. Şekil 3.128’ da $W/D=4$, $E/D=2$, $K/D=2$, $M/D=1$ boyutlarındaki plakanın sonlu elemanlara bölünmüş durumu görülmektedir.

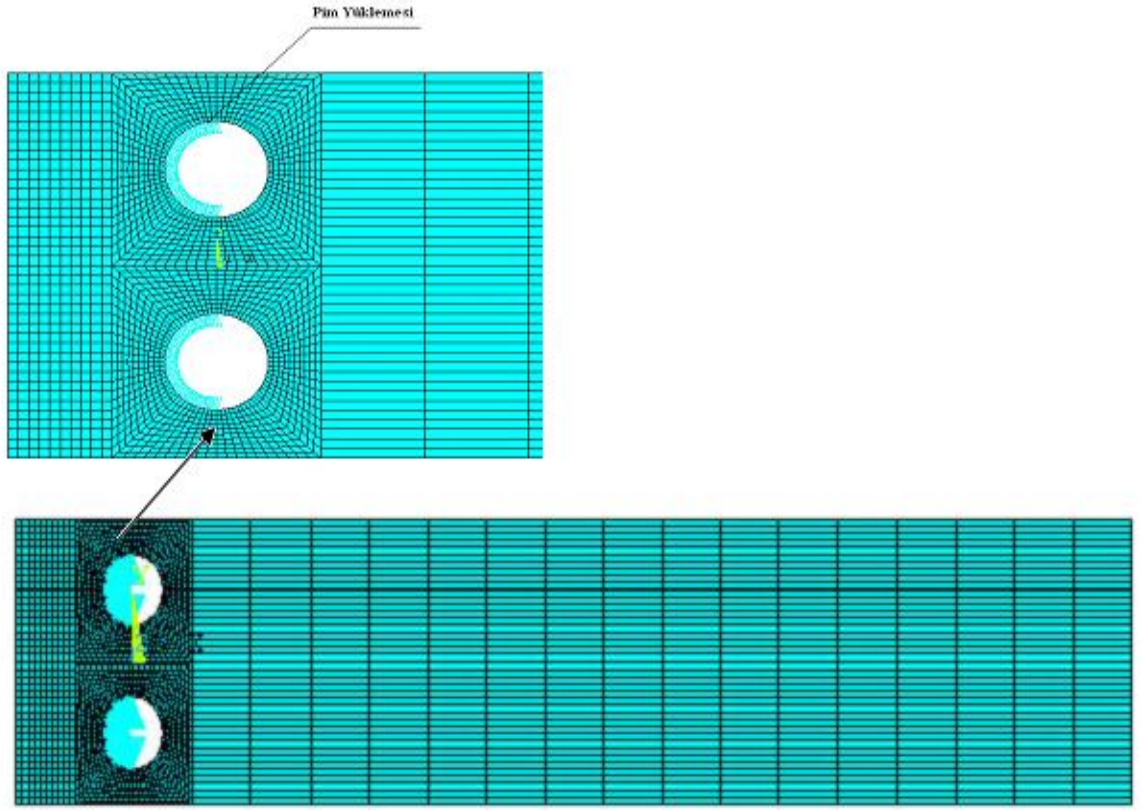


Şekil 3.127. Katı modelin sonlu elemanlara bölünmesi için kullanılan Shell 181 elemanı

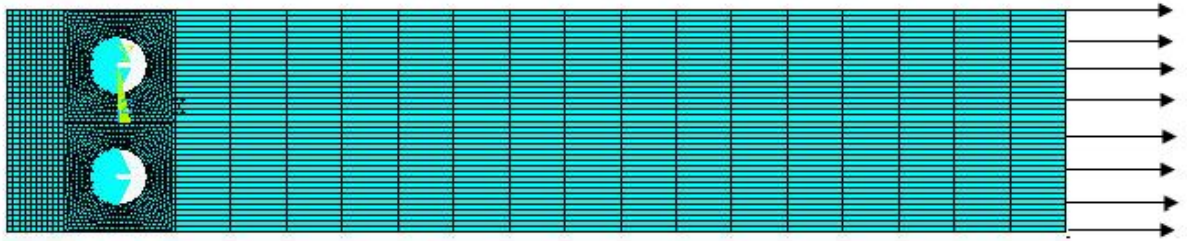


Şekil 3.128. Kompozit levhanın sonlu elemanlara bölme işlemi

Şekil 3.129 ve Şekil 3.130’ da ise aynı boyutlardaki kompozit plakanın sınır şartları ve yükleme koşulları görülmektedir.



Şekil 3.129. Sonlu eleman modelinde levhaya radyal sınır şartı uygulanması



Şekil 3.130. Sonlu eleman modelinde levhanın sınır ve yükleme koşulları

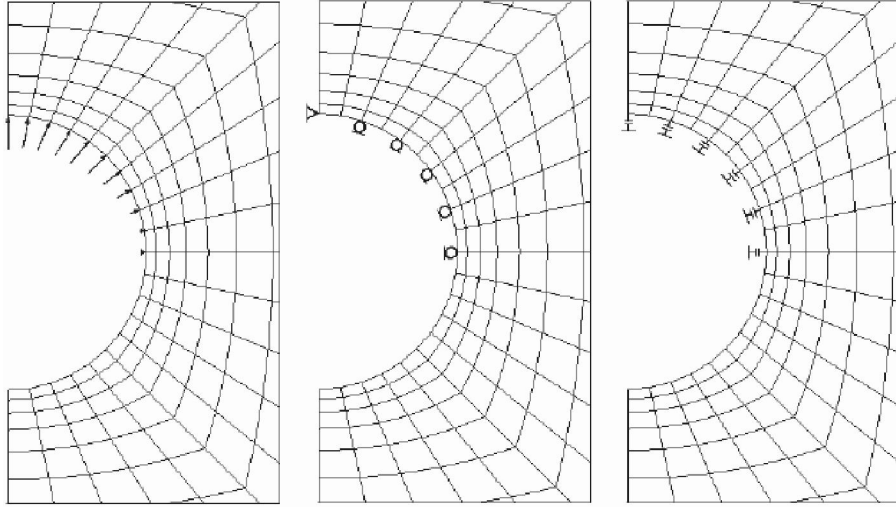
Plakanın tipik sonlu eleman modeli Şekil 3.128’ de gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi sonlu elemanlara bölme işlemi pim deliklerinin olduğu bölgeyi bir kare içerisine alacak şekilde ve pim deliklerinden uzak bölgeyi de bir dikdörtgen içerisinde olacak şekilde iki temel bölgeye bölünerek yapılmıştır. Sınır koşullarını uygulamak için her iki deliğin serbest kenarında radyal hatlar sabitlenmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiği zaman pim bağlantılı kompozit levhaların çözümünde en önemli sınır şartının pimin modellenmesi olarak görülmektedir. Yine çalışmalarda üç farklı pim modellenmesi olduğu görülmektedir. Bu çalışmada pim modelleme yöntemlerinden biri olan radyal sınır şartı uygulanmıştır. Bu sınır şartı pimin

katı cisim olarak modellenmesinin yerine kullanılarak pimin temas ettiği levha delik yüzeyi etrafındaki elemanların normali doğrultusunda yer değiştirmelerin olmadığı kabul edilmesi yoluyla modelleme yapılmasıdır [69]. Diğer pim modelleme yöntemi; pimin katı cisim olarak modellenmesinin yerine, pimin temas ettiği kompozit levha delik kenarına etkiyeceği basınç kuvvetini kosinüsoidal yük dağılımı olarak uygulanmasıdır [69, 78]. Üçüncü pim modelleme yöntemi ise; pimin katı cisim olarak modellenerek pim ile levha arasındaki yüzeyin kontak elemanları kullanılarak modellenmesidir [69, 78].

Bu yöntemlerle ilgili model örnekleri aşağıda gösterilmektedir.

Şekil 3.131’ den de görüldüğü gibi; birinci yöntem ile yapılan modellemede diğer iki yöntemden farklı olarak pim deliğine yük uygulanarak levha uzun kenarından sabitlenmektedir. Bu yöntem ile yapılan modellemelerde çok tutarlı sonuçlar elde edilememekte olup; radyal sınır şartlarının ve kontak modelinin kullanıldığı sayısal modellerden kosinüsoidal yük dağılımı metoduna göre daha uyumlu sonuçlar elde edilmektedir [69, 78].



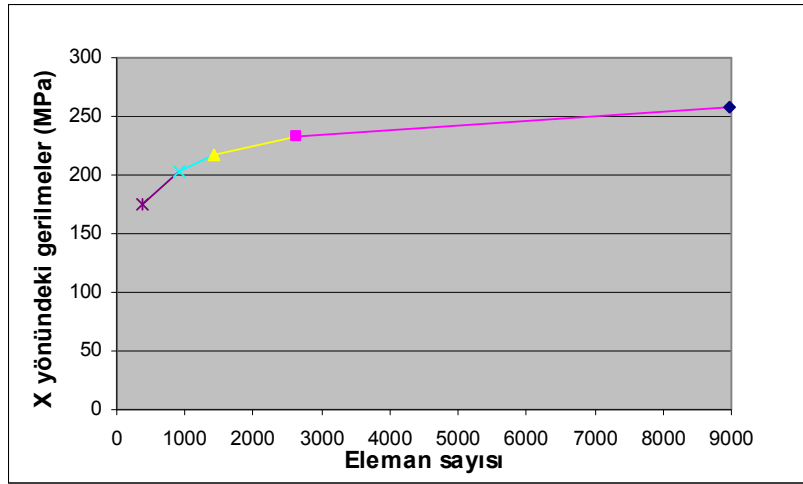
Şekil 3.131. Pim ile levha arasındaki bağlantının modellendiği üç farklı durum (a) Kosinüsoidal yük dağılımı metodu, b) Radyal sınır şartı modeli, c) Temas elemanları ile modellemenin yapılması [69, 78].

3.2.1.2. Sayısal analiz çalışmasında sonlu eleman sayısı

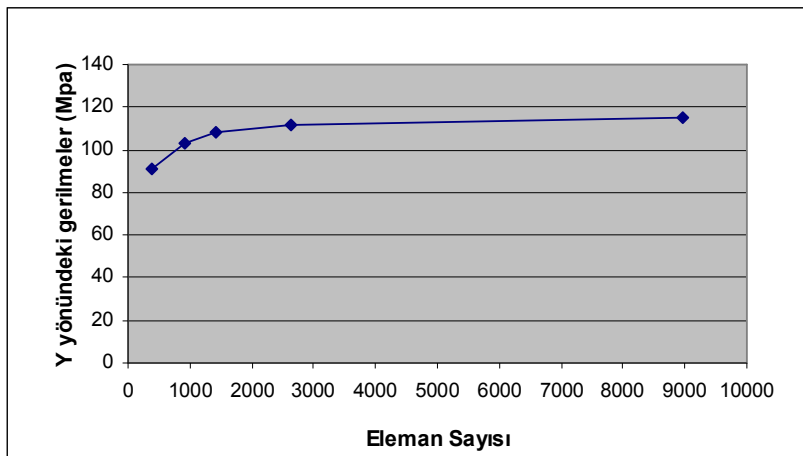
Pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde sayısal çalışmada kullanılan ilerlemeli hasar analizinden elde edilen sonuçların, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla uyumlu olması oldukça önemlidir. Levhalarda bağlantı elemanının kullanılması, levha üzerinde açılan deliklerin gerilme yığılmalarını arttırmasından dolayı delik

etrafındaki gerilmelerin incelenmesi önemlidir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerde kullanılan düğüm ve eleman sayısı çözümün tutarlılık ve hassasiyetini etkilemektedir.

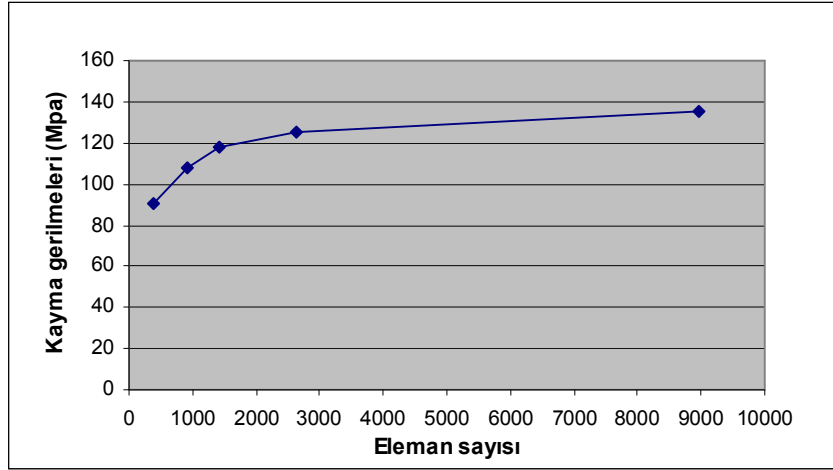
Bu çalışmada eleman sayısı ile düğüm sayısının artırılarak sonuçlar karşılaştırılmış, elde edilen sonuçların farklılık göstermediği noktada daha fazla eleman kullanılmamıştır. Sonlu elemanlara bölünen katı cismin analizinde meydana gelen x yönündeki gerilmenin maksimum değeri referans alınarak çözüm, eleman sayısı artırılarak tekrarlanmıştır. $W/D=4$, $E/D=2$, $K/D=2$, $M/D=1$ geometrik parametrelerine sahip model için eleman sayısına karşılık elde edilen en büyük x yönündeki gerilme değerleri, y yönündeki gerilmeler ve kayma gerilmeleri sırasıyla grafik Şekil 3.132, Şekil 3.133, Şekil 3.134' te gösterilmiştir.



Şekil 3.132. 100 MPa gerilme değeri ile yüklenme durumu için en büyük x yönündeki gerilmelerine karşılık eleman sayısı değişimi



Şekil 3.133. 100 MPa gerilme değeri ile yüklenme durumu için en büyük y yönündeki gerilmelerine karşılık eleman sayısı değişimi



Şekil 3.134. 100 MPa gerilme değeri ile yüklenme durumu için en büyük kayma gerilmelerine karşılık eleman sayısı değişimi

Şekil 3.133, Şekil 3.134, Şekil 3.135’ deki durum göz önüne alınarak eleman sayısı 2640 olan model çözümde kullanılmıştır.

Tablo 3.6. Sayısal çözümde kullanılan modellerin sonlu eleman sayılarının geometrik parametrelere göre değişimi tablosu

<i>Geometrik Parametreler</i>	E/D=2	E/D=3	E/D=4	E/D=5
W/D=4, K/D=2, M/D=1	2640	3000	3360	3720
W/D=5, K/D=3, M/D=1	2850	3050	3250	3450
W/D=6, K/D=4, M/D=1	2850	3500	3740	3980
W/D=6, K/D=2, M/D=2	3260	3500	3740	3980
W/D=7, K/D=3, M/D=2	3670	3950	4230	3950
W/D=8, K/D=4, M/D=2	4080	4400	4720	5040
W/D=8, K/D=2, M/D=3	4080	4080	4720	5040
W/D=9, K/D=3, M/D=3	4490	4850	5210	5570
W/D=10, K/D=4, M/D=3	4900	5300	5700	6100
W/D=10, K/D=2, M/D=4	4900	5300	5700	6100
W/D=11, K/D=3, M/D=4	5310	5750	6190	6630
W/D=12, K/D=4, M/D=4	5720	6200	6680	7160

3.2.2. Pim bağlantılı tabakalı kompozitlerde ilerlemeli hasar analizi

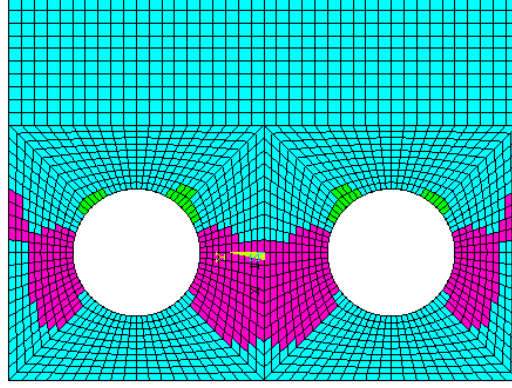
Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhaların hasar analizi Şekil 3.126’ da akış diyagramı verilen metoda göre yapılmıştır. İlerlemeli hasar analizi adı verilen bu metotta Tsai-Wu hasar kriteri ve APDL kodları ile ANSYS 11.0 programında sayısal olarak modellenmiştir. İlerlemeli hasar analizinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için sayısal modelde kullanılan sonlu eleman sayısı, yük artım oranı, malzeme indirgeme katsayısı ve sınır şartlarının doğru bir orantı ile kullanılması gerekmektedir. Tablo 3.6’ da verilen sonlu eleman sayıları ve radyal sınır şartı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli hazırlandıktan sonra, geliştirilen hasar ilerleme programı ANSYS yazılımı içerisinde çalıştırılarak hasar analizi yapılmıştır. Kademeli yüklemeye bağlı olarak gerilme analizi yapılırken, sonlu elemanlar modeline uygulanan yüklemelerin belirli bir oranda arttırılması gerekmektedir. Bu amaçla sayısal model için en uygun yük artırım oranı %2.5 olarak belirlenmiştir. Yük artırım oranı analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir.

Gerilme analizi tamamlandıktan sonra hasar analizine geçilmiştir. Hasar analizinde Tsai-Wu hasar kriteri uygulanmıştır. Hasara uğrayan elemanın tüm malzeme özellikleri zayıflatılmaktadır. Bu zayıflatma malzeme indirgenme katsayısının kullanımı ile ilgilidir. Bu çalışmada malzeme indirgeme katsayısı 10^{-7} olarak alınmıştır. Malzeme indirgeme katsayısı I ile gösterilmiştir. Buradaki amaç sıfıra yaklaştırmak olarak kabul edildiğinden indirgeme katsayısı da 10^{-7} olarak seçilmiştir.

Tsai-Wu hasar kriteri; tabakalardaki hasar ilerlemesinin çekme veya basmadan dolayı fiber hasarı ya da çekme veya basmadan dolayı matriks hasarı olup olmadığını ayırt edememektedir [36]. Bu çalışmada da hasar ilerlemesi ve tipleri gözlemlenerek tespit edilmiştir. Bu amaçla hasar analizi sonucunda hasara uğrayan elemanları tespit edebilmek için hasar gören elemanlar hasar şekline göre farklı renklerde tanımlanmıştır. Hasar şekillerine göre tanımlanan renk kodları ve numaralandırma Tablo 3.7’ de belirtilmiştir. Analizlerde açık mavi hasarsızlık durumunu, pembe ve yeşil renkler ise hasar olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.135’ de hasar durumu örnek olarak gösterilmiştir. Uygulanan hasar analizinde; yırtılma hasarı, pim bağlantılı kompozit levhadaki hasarın, levhanın serbest kenarına ulaşmasıyla gerçekleşmiştir. Yırtılma hasarında hasar, uygulanan kuvvete dik yönde ilerleyerek levhanın serbest kenarına ulaştığında, levha artık yük taşıyamaz. Bu durum pembe renk ile gösterilmiştir. Ezilme hasarında, hasarın, pim deliğinin merkezinden

2R'lik alanın dışına taşmasıyla meydana geldiği kabul edilmiştir (Burada R, delik yarıçapını ifade etmektedir). Bu hasar durumu ise yeşil renk ile gösterilmektedir.



Şekil 3.135. Hasar durum grafiğinde renkler

Tablo 3.7. Hasar analizi sonucu ortaya çıkan hasar tiplerindeki renklerin anlamı

Tsai-Wu genel bağıntısı	Hasar durum renkleri	I (malzeme indirgeme katsayısı)
$(F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} \geq 1)$	 Hasara uğramamış normal eleman	1
	 $\sigma_1 > 0$ çekme hasarına uğramış eleman	$\times 10^{-7}$
	 $\sigma_1 < 0$ basma hasarına uğramış eleman	$\times 10^{-7}$

Tablo 3.7' de ifade edilen malzeme indirgeme katsayısı (I), malzemenin mekanik özellikleri ile çarpılarak,

$$E_{11}=E_{11} \times 0.0000001, E_{22}=E_{22} \times 0.0000001, E_{33}=E_{33} \times 0.0000001$$

$$G_{12}=G_{12} \times 0.0000001, G_{23}=G_{23} \times 0.0000001, G_{13}=G_{13} \times 0.0000001$$

$$v_{12}=v_{12} \times 0.0000001, v_{23}=v_{23} \times 0.0000001, v_{13}=v_{13} \times 0.0000001,$$

şeklinde hasar ilerleme analizi gerçekleştirilir.

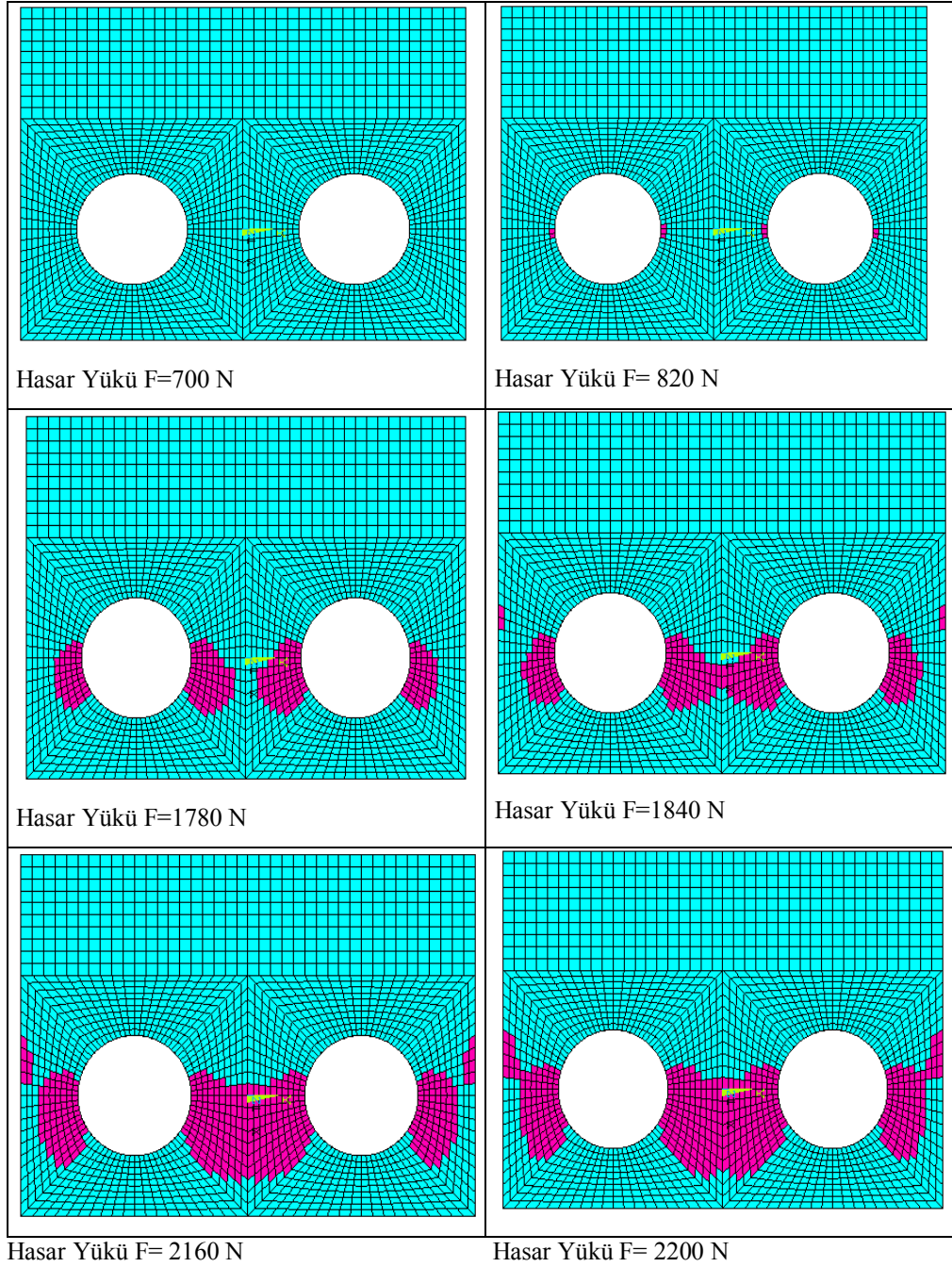
ANSYS 11.0 programı kullanılarak yapılan ilerlemeli hasar analizi çalışmasında kuru şartlarda, 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyu şartlarında bekletilen numunelerden elde edilen mekanik özellikler doğrultusunda; numunelerin hem modellemesi hem de analizleri tek tek yapılmıştır. Her aşamada 48 adet numune olup, toplamında ise 144 adet analiz ve modelleme yapılmıştır. Bu analizler sonucunda seçilen her parametrede ilerlemeli olarak hasar yükleri ve hasar tipleri elde edilmiştir.

3.2.3. Pim bağlantılı kompozit levhalarda ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Çekme yükü tesirindeki düz bir levhada yer alan delik gerilme yığılmalarına ve hasara neden olmaktadır. Bu çalışmada ortasında dairesel delik bulunan sekiz tabakalı cam fiber takviyeli kompozit bir levhada hasar analizi sayısal ve deneysel olarak yapılmıştır. Sayısal çalışma için ANSYS sonlu eleman paket programında APDL kodları kullanılarak hasar ilerlemesini modelleyen bir program geliştirilmiştir. Sayısal çalışmada problemin iki boyutlu bir katı modeli ANSYS programında oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinde Shell 181 eleman tipi kullanılmıştır. Sonlu elemanlara bölme işleminde gerilme yığılmalarının olduğu bölge olan delik kenarı daha sık elemanlara bölünmüştür. Sınır şartı olarak, plakanın serbest kenarından düzgün yayılı çekme yükü uygulanmış.

Şekil 3.136' da $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$, $E/D=2$ boyutlarındaki kompozit levha için hasar ilerlemesi ve son hasar yüküne ulaşması örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 3.136' da sayısal analiz sonucunda elde edilen hasar yükleri ve son hasar yükü çeşitli renkler kullanılarak ifade edilmiştir. Burada temsil edilen renkler ANSYS programında hasar analizi neticesinde değişen eleman özelliklerini temsil etmekte ve program tarafından yapılan renklendirme neticesinde elde edilmektedir. Şekil 3.136' da da yükleme artırıldığı zaman çekme hasarına uğrayan eleman sayısı artmış ve hasar ilerlemesi pembe renk ile gösterilmiştir. Kompozit levhaya uygulanan yük etkisiyle ilerleyen hasarın levha kenarına

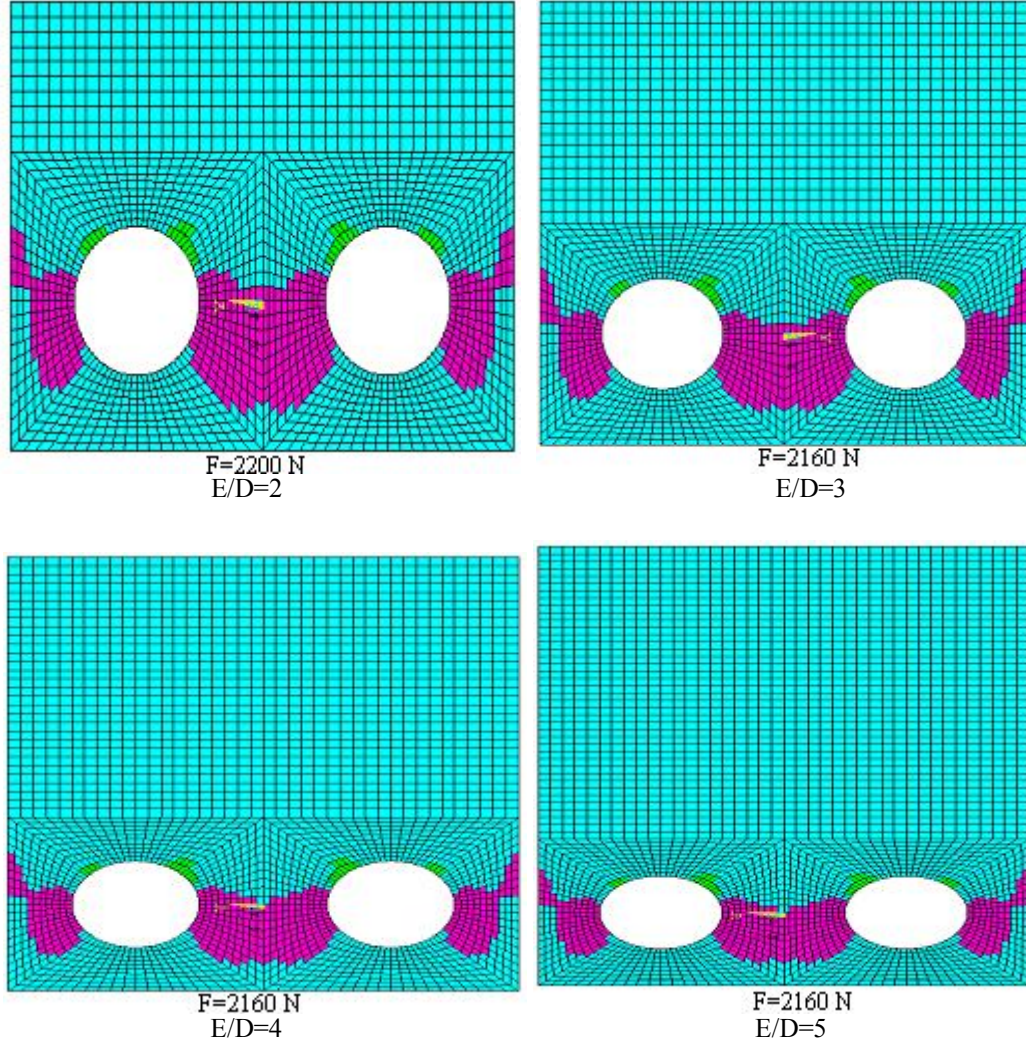
ulaşması (yıkıcı hasar: levha kenarına ulaşırsa) ile analiz sona erdirilmiştir. Meydana gelen hasar tipinin yırtılma olduğu görülmektedir.



Şekil 3.136. $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$, $E/D=2$ boyutlarındaki kompozit levhada hasar başlangıcı ve ilerlemesi

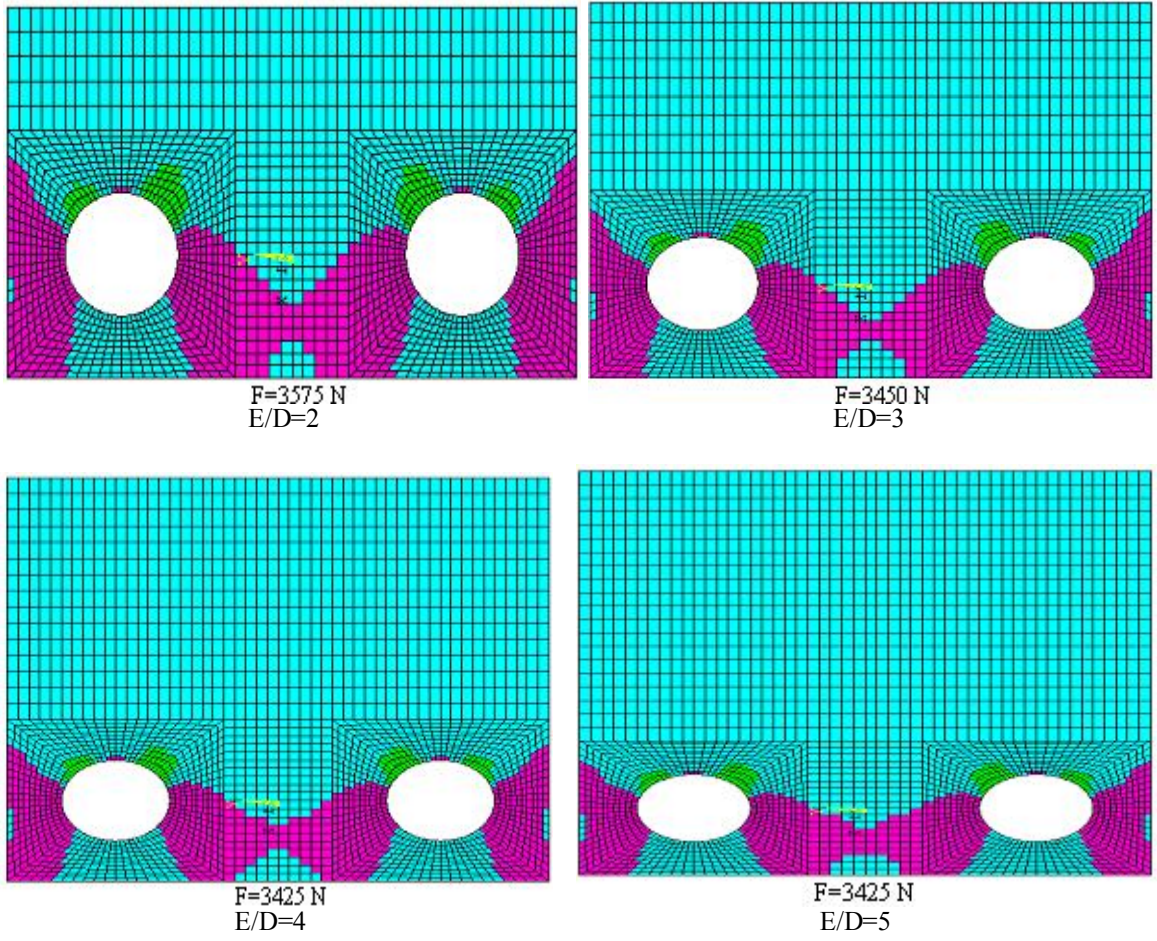
3.2.3.1. Kuru numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Aşağıdaki şekillerde geometrik boyutlardaki numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen son hasar yük fotoğrafları yer almaktadır. Şekil 3.137’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar K mesafesinde birleşerek iki deliğin kenarlara kadar ilerleyerek 2200 N’ luk yük altında son bulmuştur. Hasar tipi yırtılma olarak görülmektedir.



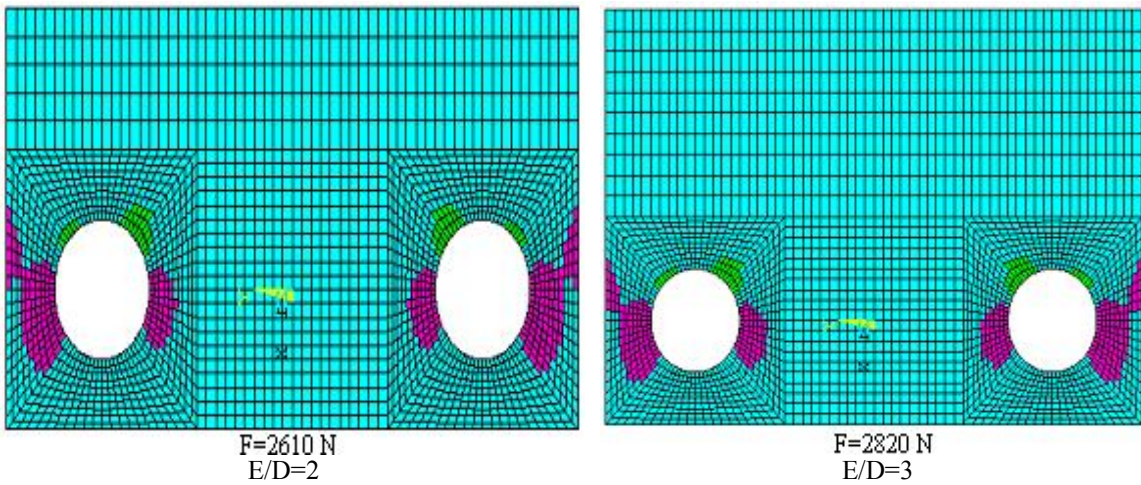
Şekil 3.137. $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

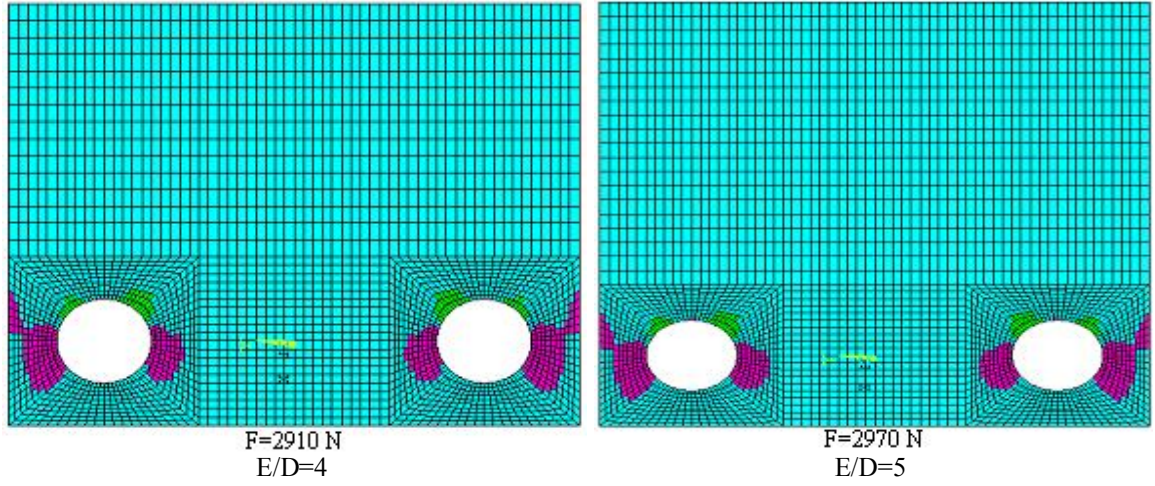
Şekil 3.138’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılmaya dönüşmüştür. Hasar delik kenarlarından başlayıp K mesafesine kadar ilerleyip birleşerek 3575 N’ luk yük altında son bulmuştur.



Şekil 3.138. $W/D=5$, $K/D=3$, $M/D=1$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

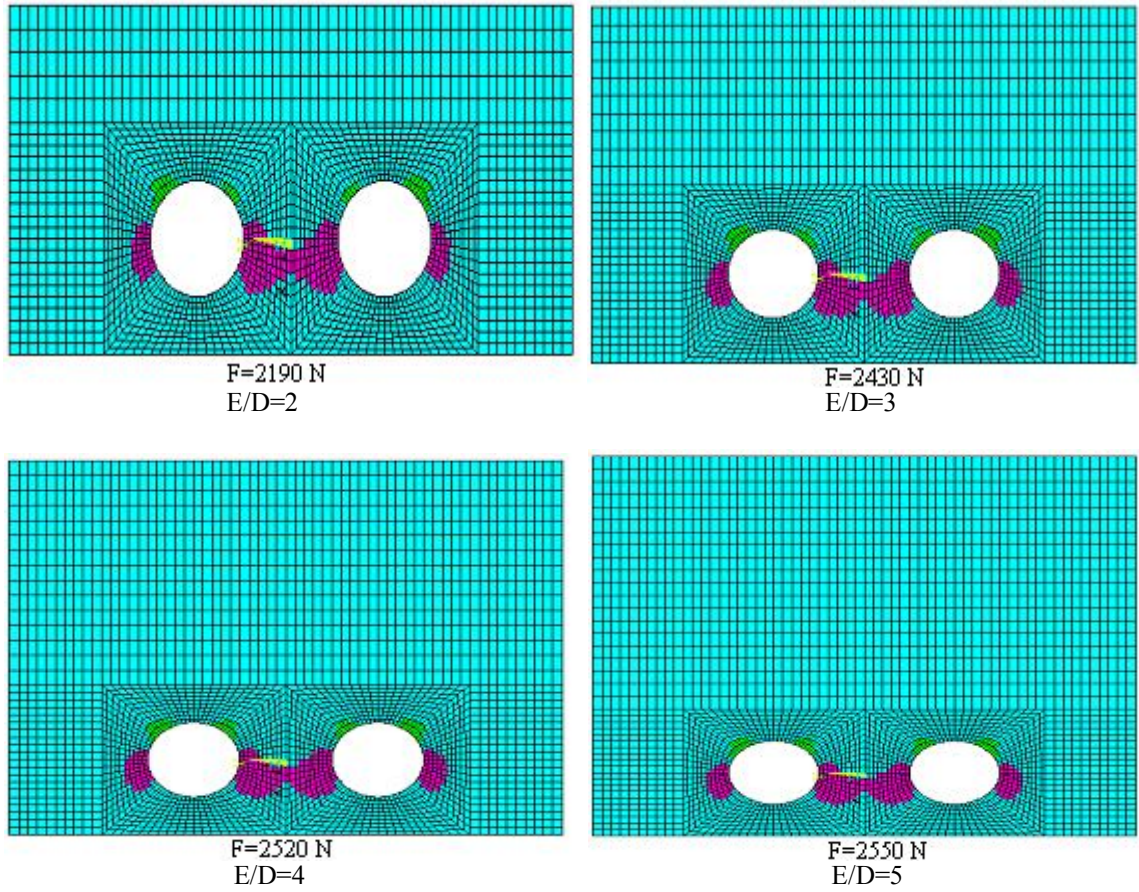
Şekil 3.139’ da görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılmaya dönüşmüştür. Hasar her iki delik kenarlarından başlayıp, 2610 N’ luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2820 N, 2910 N, 2970 N yüklerde son bulmuştur.





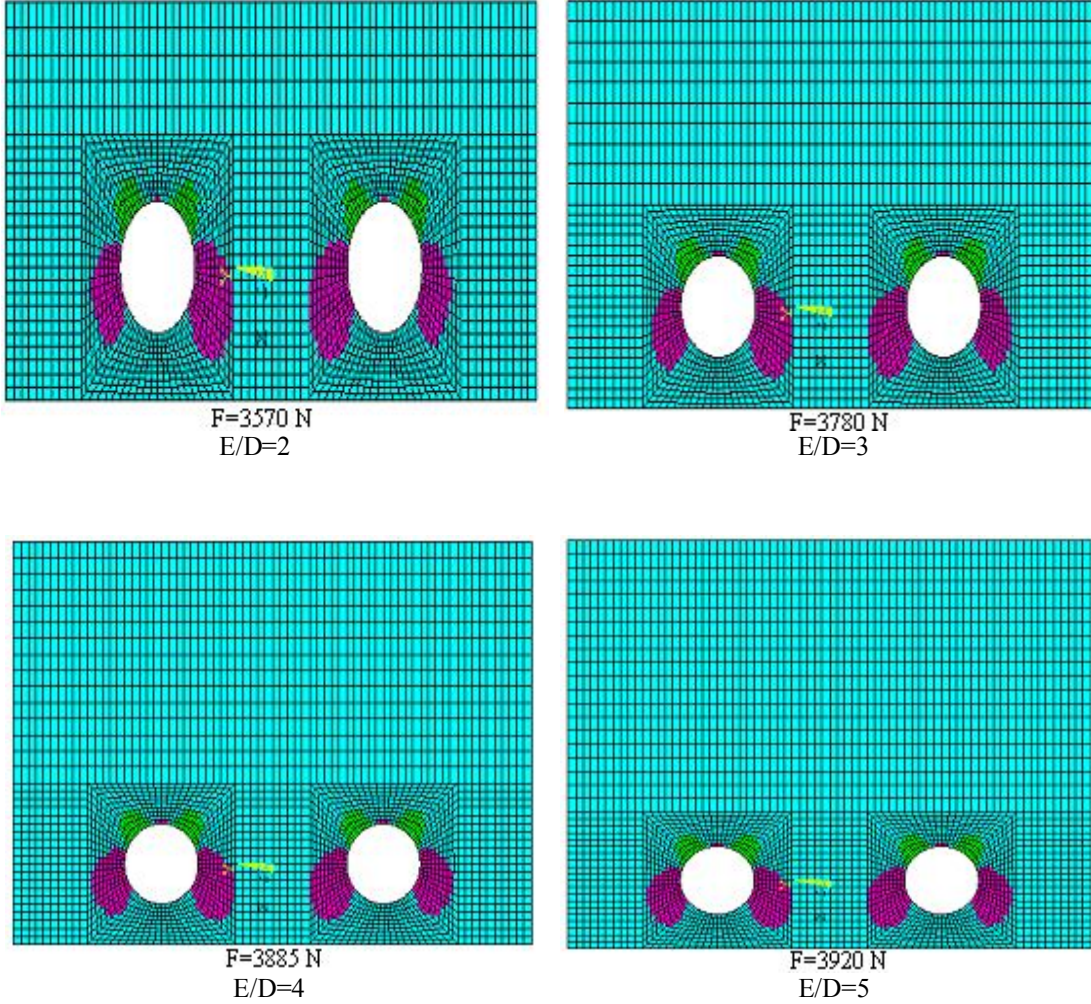
Şekil 3.139. $W/D=6$, $K/D=4$, $M/D=1$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.140' de görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılmaya dönüşmüştür. Hasar her iki deliğin K mesafesine kadar ilerlemiş ve 2190 N' luk yük altında birleşerek son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2430 N, 2520 N, 2550 N yüklerde artarak son bulmuştur.



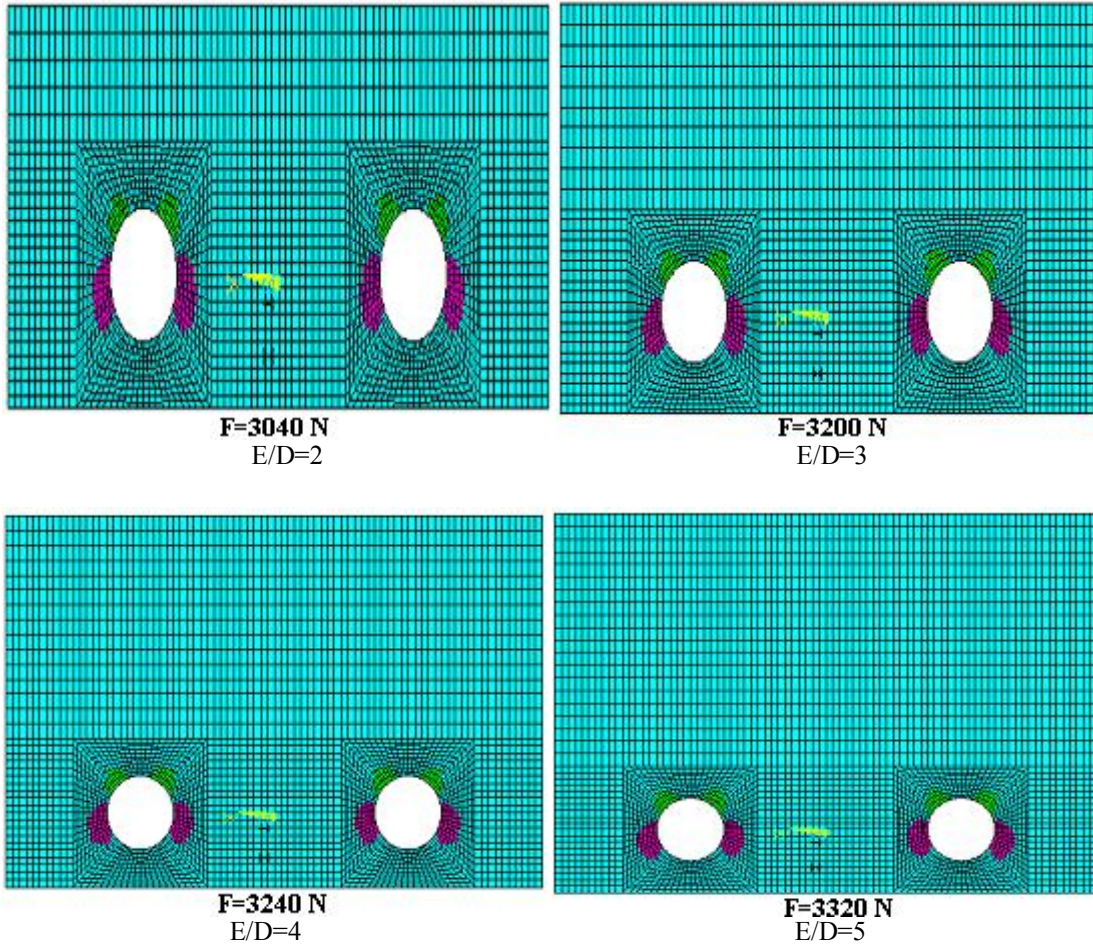
Şekil 3.140. $W/D=6$, $K/D=2$, $M/D=2$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.141’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar ezilme hasarı olarak görülmüştür. Hasar her iki deliğin kenarında yırtılma olarak gözükürken ezilme hasar tipi olarak devam etmiştir. 3570 N’ luk yük altında hasara son verilmiştir. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3780 N, 3885 N, 3920 N yükler altında son verilmiştir.



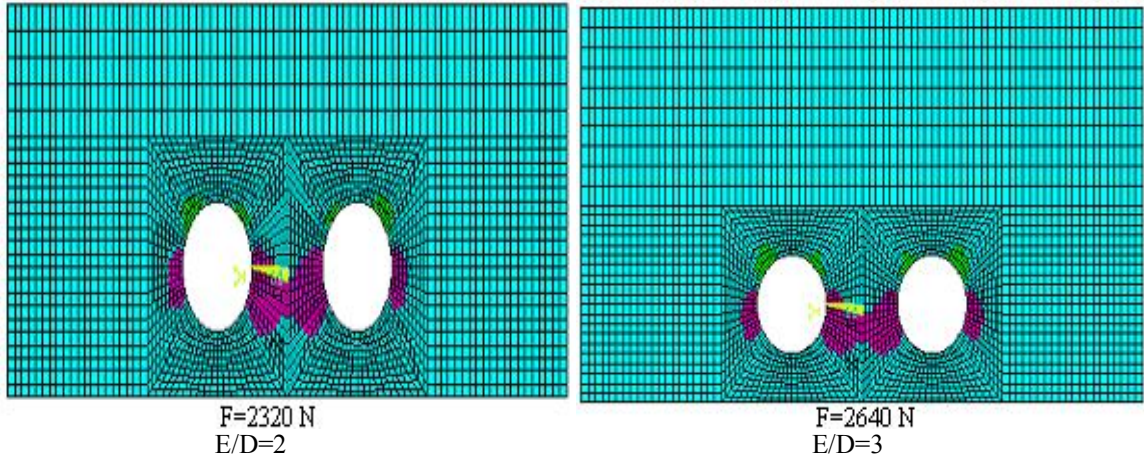
Şekil 3.141. $W/D=7, K/D=3, M/D=2$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

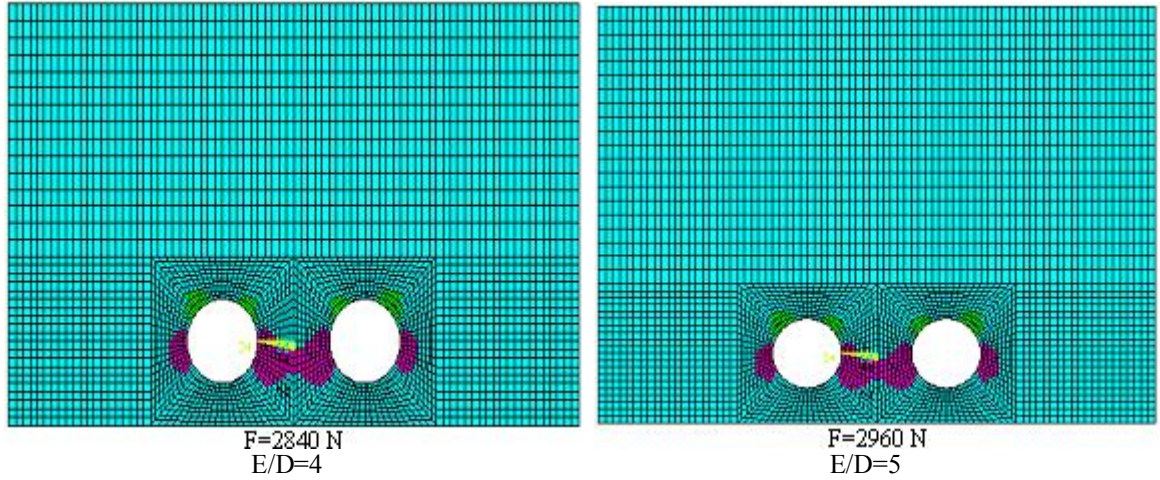
Şekil 3.142’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar ezilme hasarı olarak görülmüştür. Hasar her iki deliğin kenarında yırtılma olarak gözükürken ezilme hasar tipi olarak devam etmiştir. 3040 N’ luk yük altında hasara son verilmiştir. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3200 N, 3240 N, 3320 N yükleri altında son verilmiştir.



Şekil 3.142. $W/D=8$, $K/D=4$, $M/D=2$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

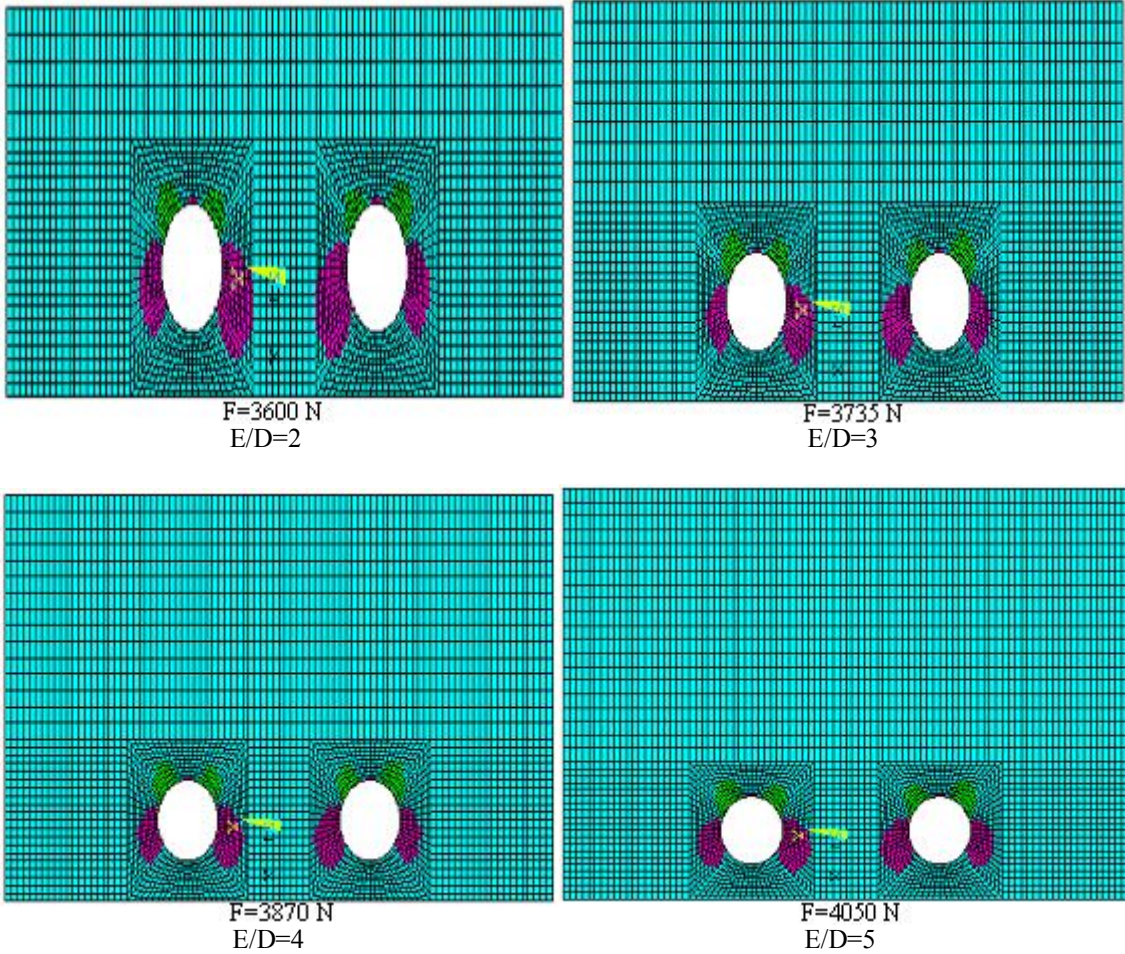
Şekil 3.143' te görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar önce ezilme hasarı olarak başlasa da daha sonra iki delik arası K mesafesinde ilerlemiştir. Hasar K mesafesi merkezinde yırtılma hasar tipi olarak 2320 N' luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2640 N, 2840 N, 2960 N yükleri altında son bulmuştur.





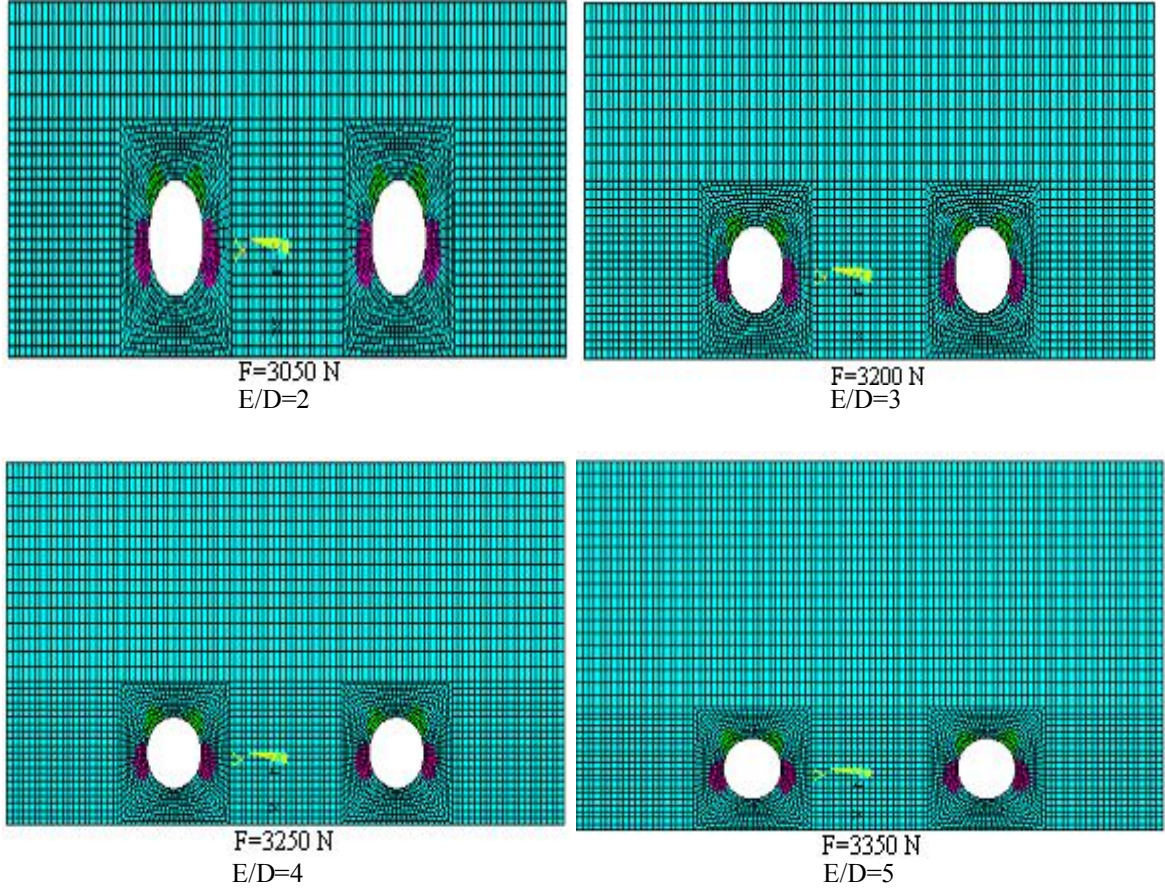
Şekil 3.143. $W/D=8$, $K/D=2$, $M/D=3$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.144' te görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 3600 N' luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3$, 4, 5 için sırasıyla 3735 N, 3870 N, 4050 N yükleri altında son bulmuştur.



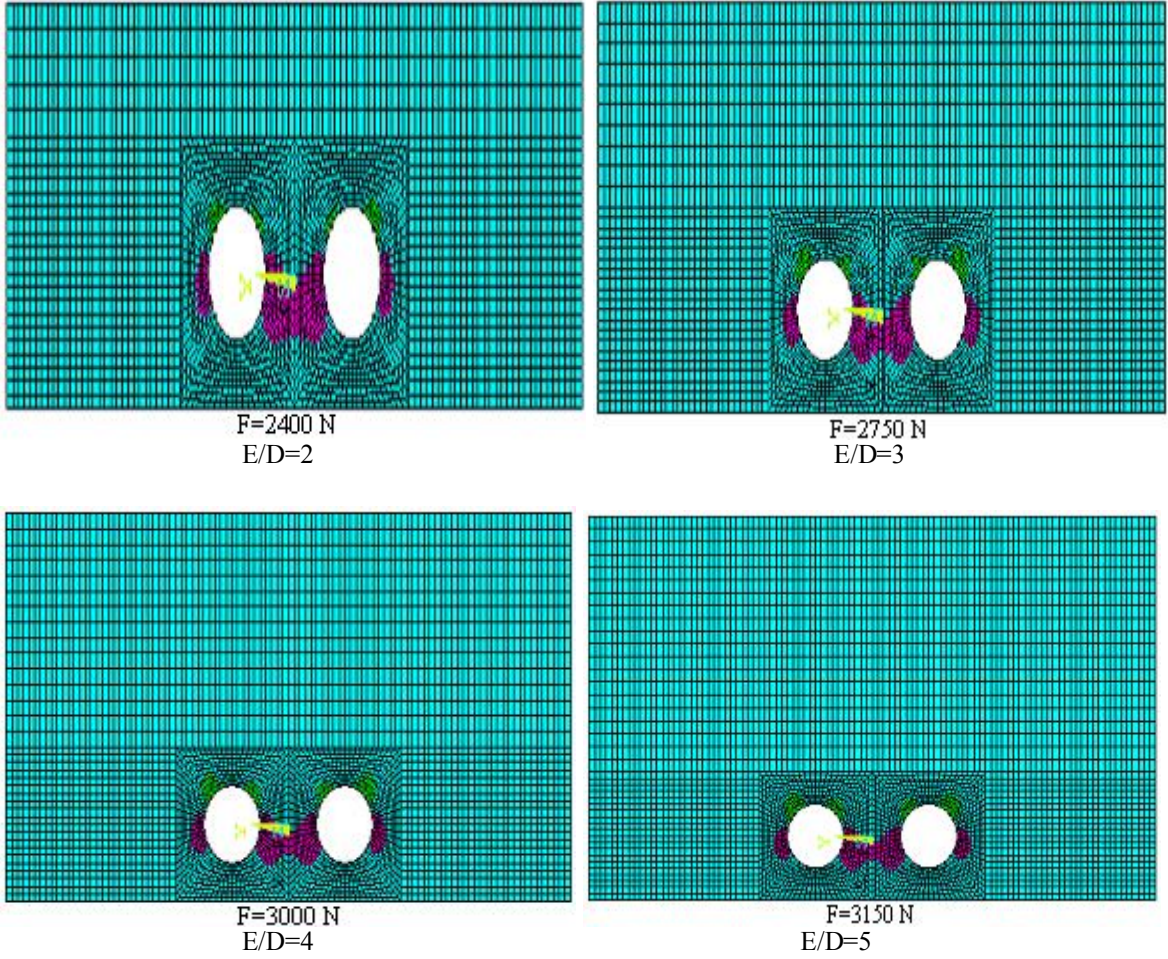
Şekil 3.144. $W/D=9$, $K/D=3$, $M/D=3$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.145’ te görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 3050 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3200 N, 3250 N, 3350 N yükleri altında son bulmuştur.



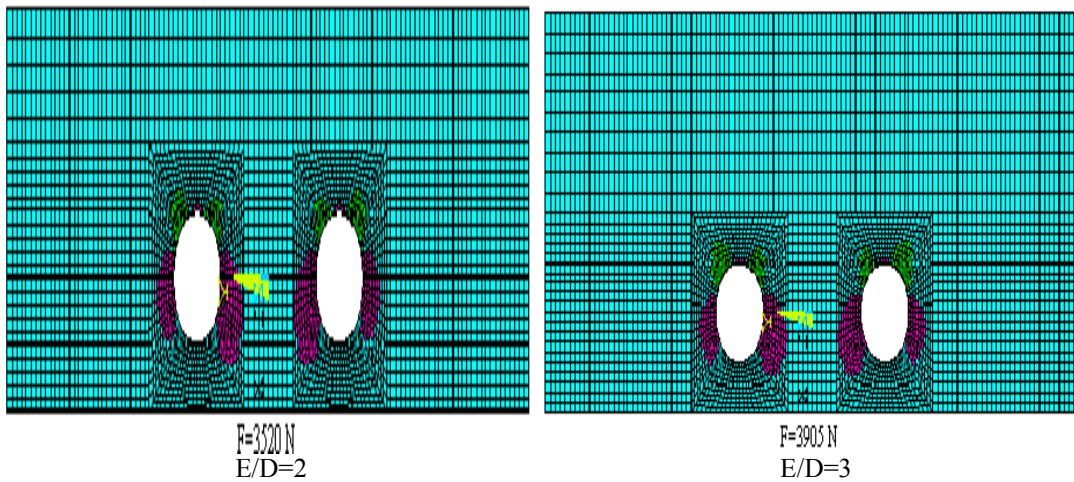
Şekil 3.145. $W/D=10, K/D=4, M/D=3$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

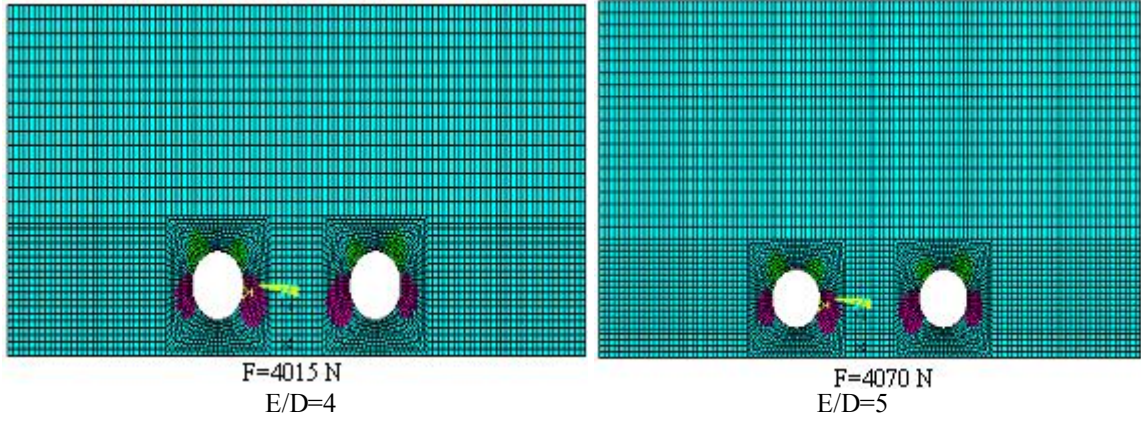
Şekil 3.146’ da görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de önce ezilme hasarı olarak başlasa da yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar iki delik arası K mesafesi merkezinde birleşerek 2400 N’ luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2750 N, 3000 N, 3150 N yükleri altında son bulmuştur.



Şekil 3.146. $W/D=10$, $K/D=2$, $M/D=4$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

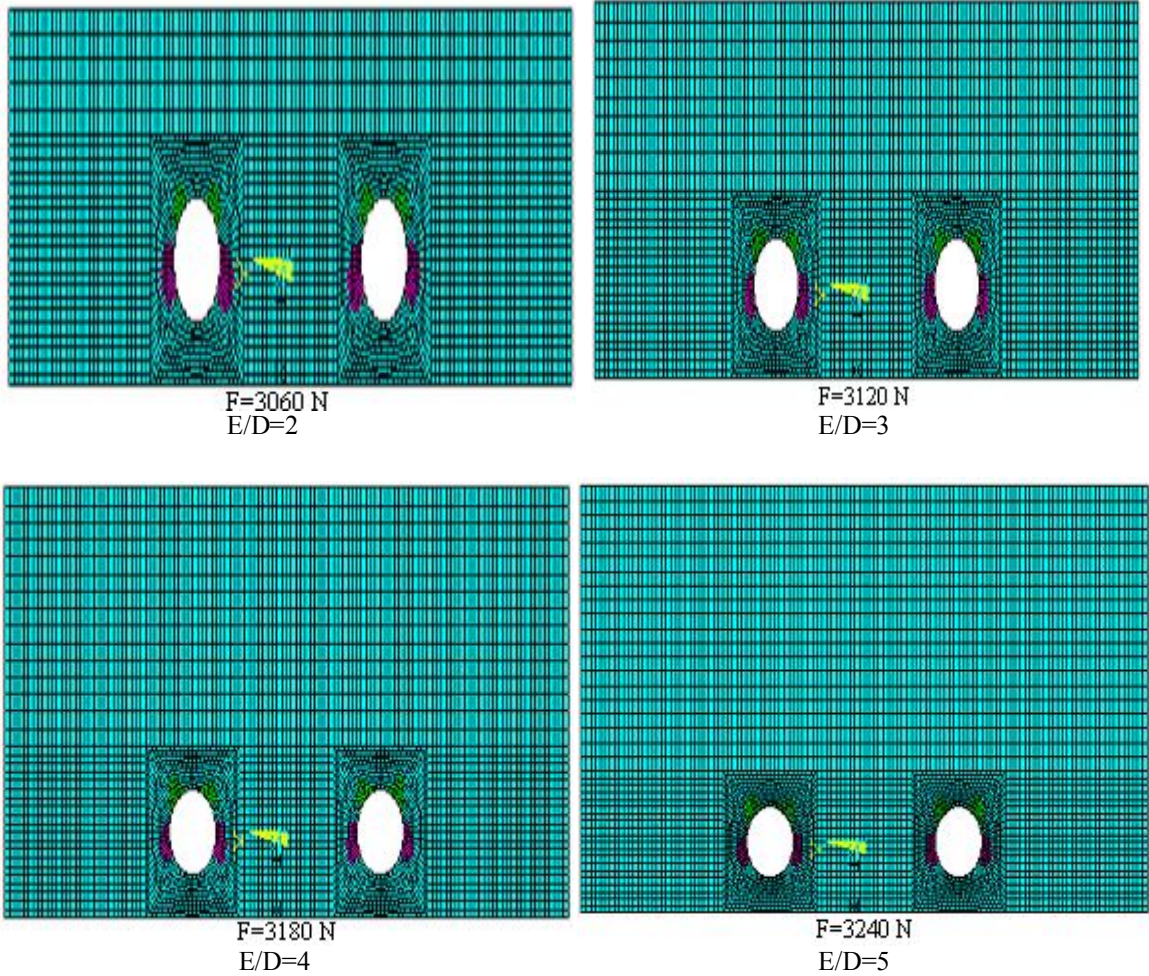
Şekil 3.147’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma hasarı olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 3520 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3905 N, 4015 N, 4070 N yükleri altında son bulmuştur.





Şekil 3.147. $W/D=11$, $K/D=3$, $M/D=4$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.148’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma hasarı olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 3060 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3120 N, 3180 N, 3240 N yükleri altında son bulmuştur.

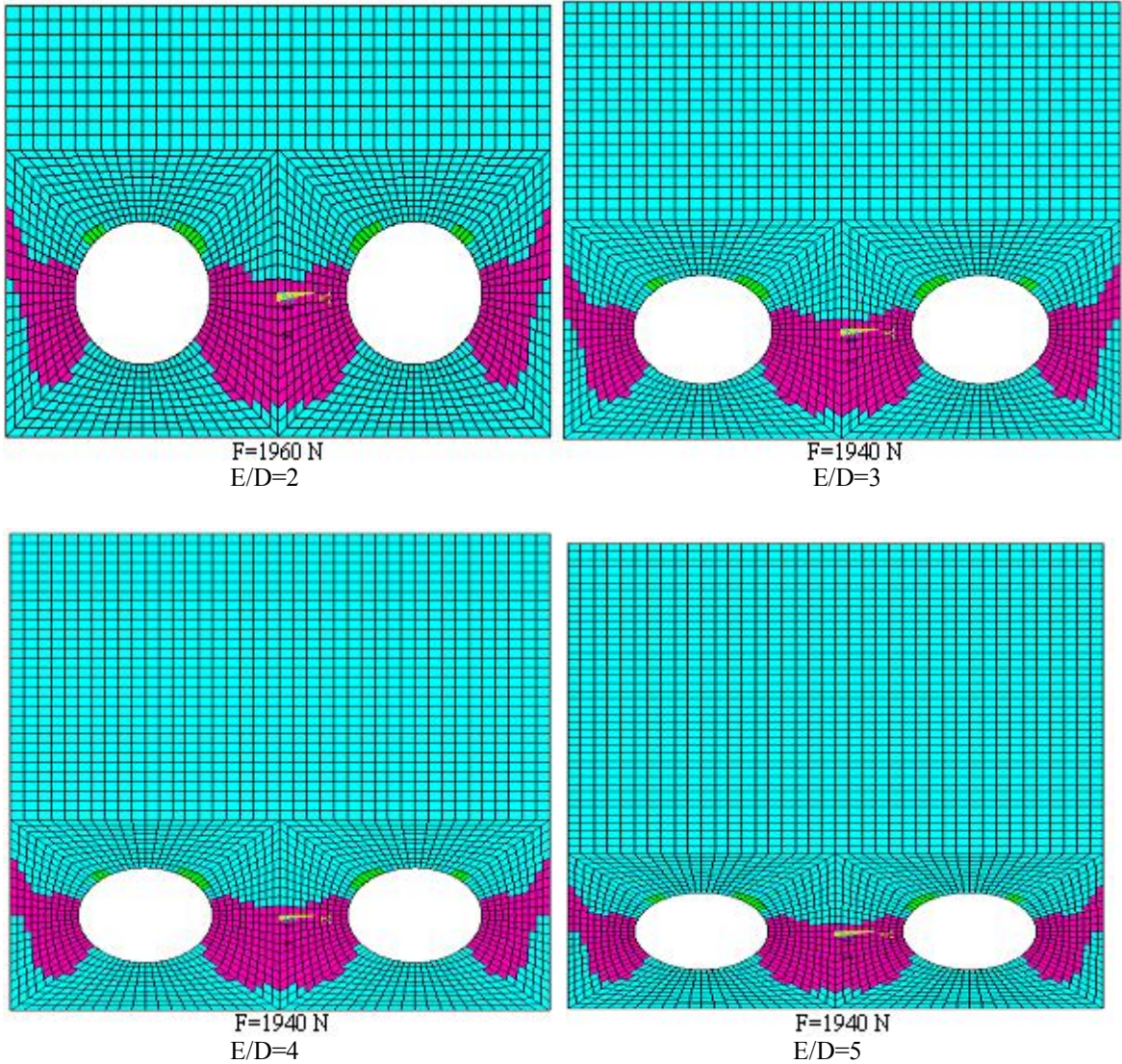


Şekil 3.148. $W/D=12$, $K/D=4$, $M/D=4$ için ilerlemeli hasar analizi sonuçları

3.2.3.2. 3 ay deniz suyuunda bırakılan numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

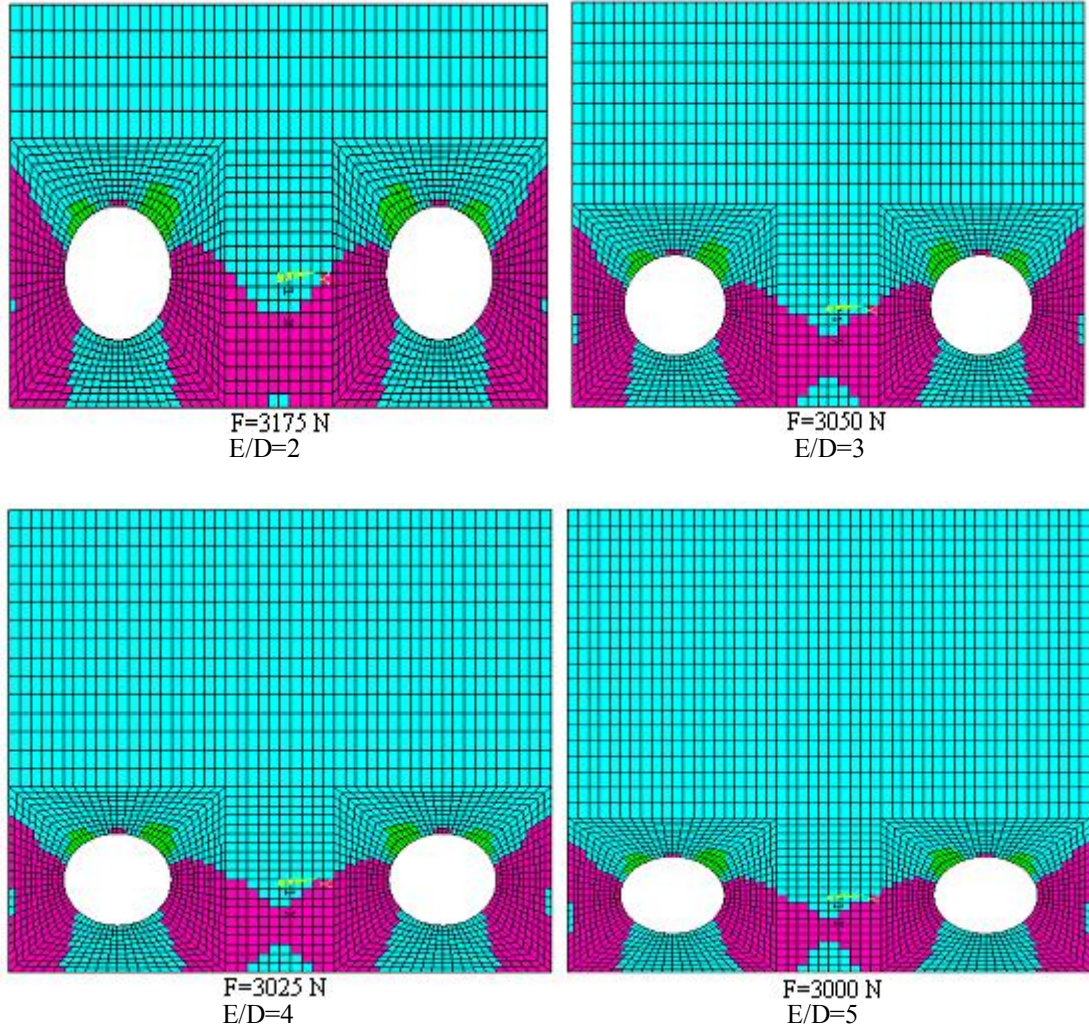
3 ay deniz suyu içerisinde bırakılan numuneler çekme testine tabi tutularak mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Tespit edilen özellikler ANSYS 11.0 programına yerleştirilerek ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümleme adımları kuru numunelerde yapılan adımlarla aynı işlemlerden geçirilmiştir. Tüm numunelerin modellenmesi ve analizleri tek tek yapılmıştır. Aşağıdaki şekillerde numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen son hasar yük resimleri yer almaktadır.

Şekil 3.149’ da görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar K mesafesinde birleşerek iki deliğin kenarlara kadar ilerleyerek 1960 N’ luk yük altında son bulmuştur. Hasar tipi yırtılma olarak görülmektedir.



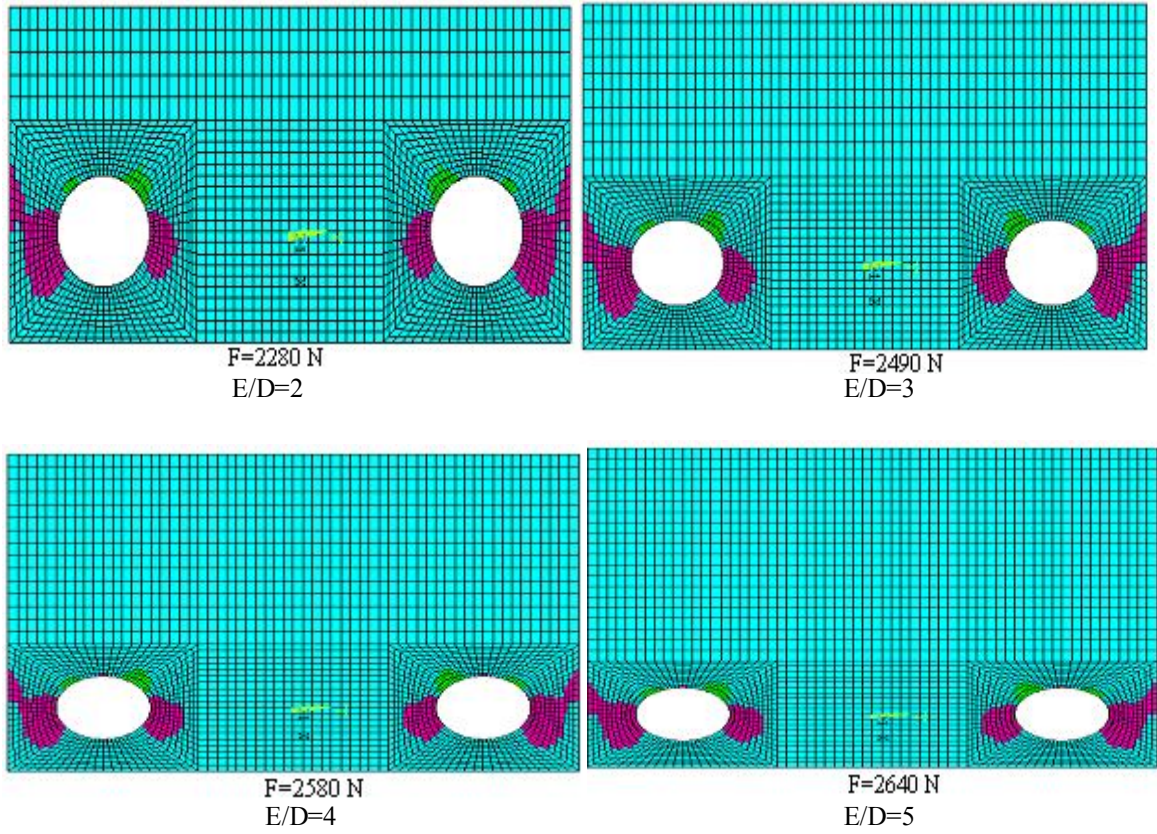
Şekil 3.149. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.150' de görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar delik kenarlarından başlayıp K mesafesine kadar ilerleyip, birleşerek 3155 N' luk yük altında son bulmuştur. $E/D=3, 4, 5$ olduğu zaman hasar 3050 N, 3025 N, 3000 N yük altında sonlanmıştır.



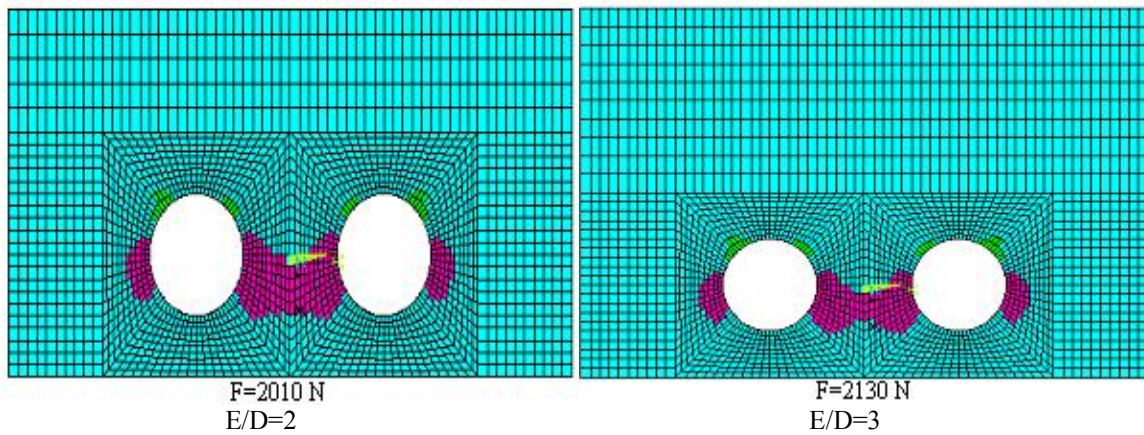
Şekil 3.150. 3 ay deniz suyu bekletilen $W/D=5$, $K/D=3$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

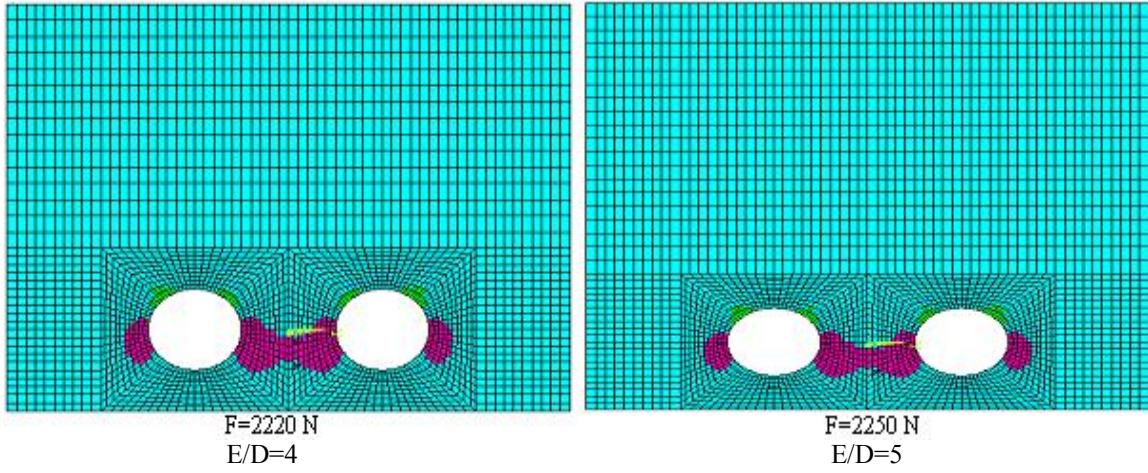
Şekil 3.151' de görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar her iki delik kenarlarından başlayıp, kenarda 2280 N' luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2490 N, 2580 N, 2640 N' luk yüklerde son bulmuştur.



Şekil 3.151. 3 ay deniz suyunda bekletilen $W/D=6$, $K/D=4$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

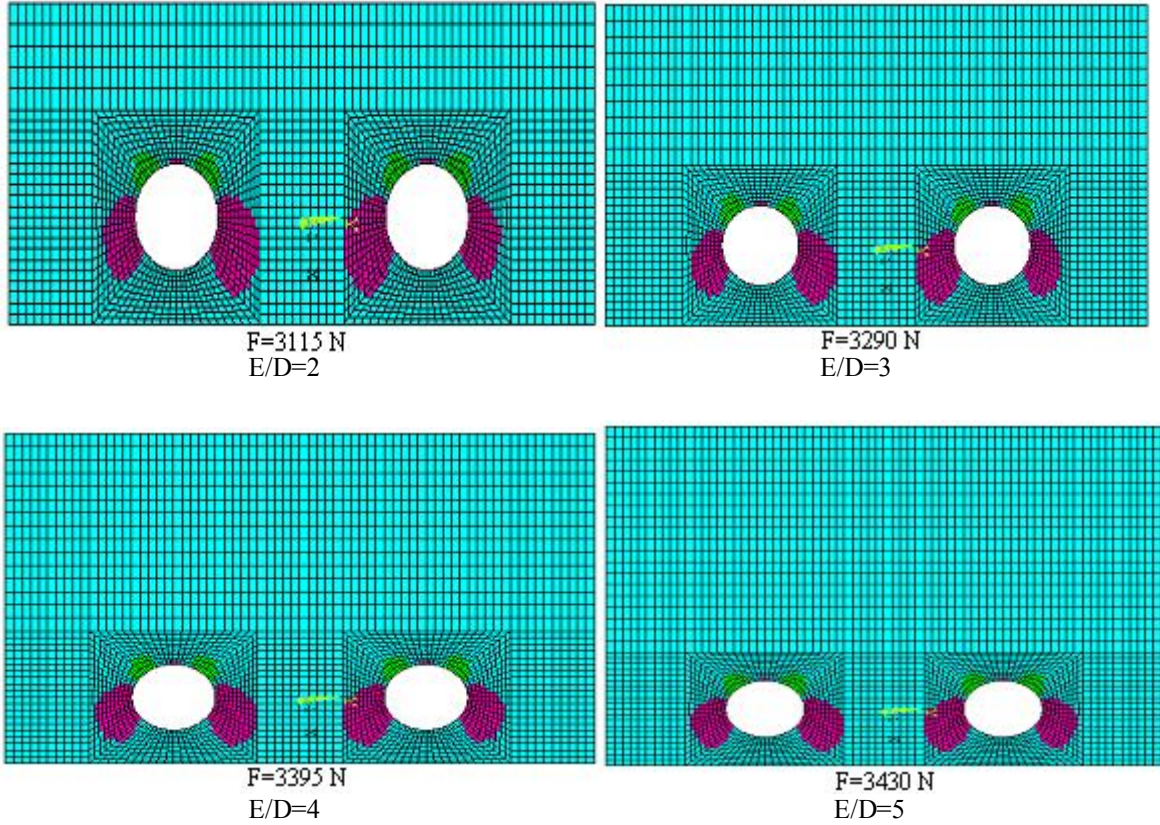
Şekil 3.152' de görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar her iki deliğin K mesafesine doğru ilerlemiş ve 2010 N' luk yük altında birleşerek son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2130 N, 2220 N, 2250 N' luk yüklerde artarak son bulmuştur.





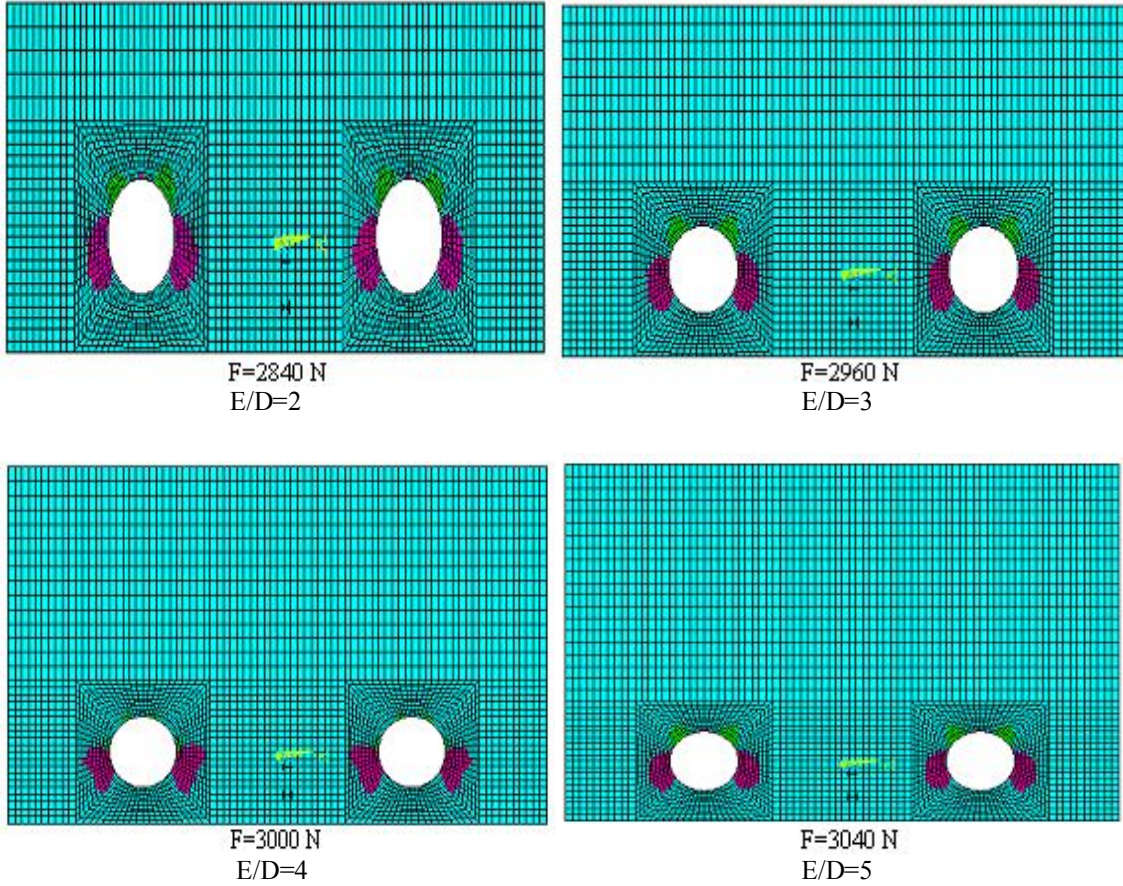
Şekil 3.152. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=6$, $K/D=2$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.153' te görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar ezilme hasarı olarak görülmüştür. Hasar her iki deliğin kenarında yırtılma olarak gözükürken ezilme hasar tipi olarak devam etmiştir. 3115 N' luk yük altında hasara son verilmiştir. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3290 N, 3395 N, 3430 N yükler altında son verilmiştir.



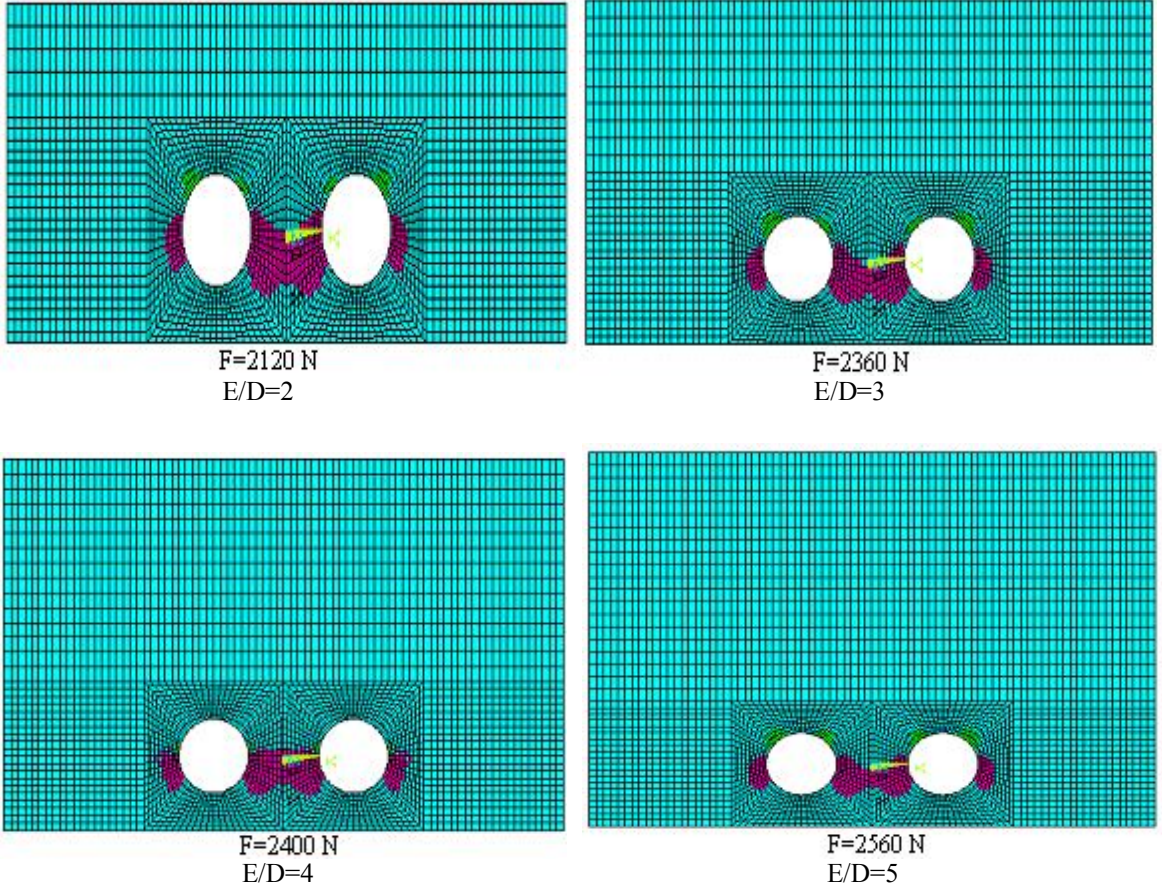
Şekil 3.153. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=7$, $K/D=3$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.154’ te görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar ezilme hasarı olarak görülmüştür. Hasar her iki deliğin kenarında yırtılma hasarı olarak gözükürken ezilme hasar tipi olarak devam etmiştir. 2840 N’ luk yük altında hasara son verilmiştir. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2960 N, 3000 N, 3040 N yükleri altında son verilmiştir.



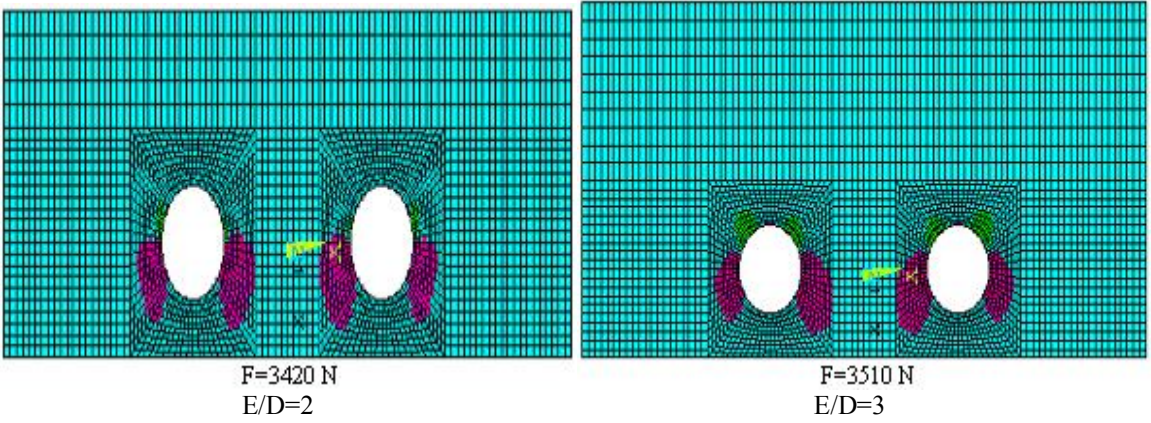
Şekil 3.154. 3 ay deniz suyu bekletilen $W/D=8$, $K/D=4$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

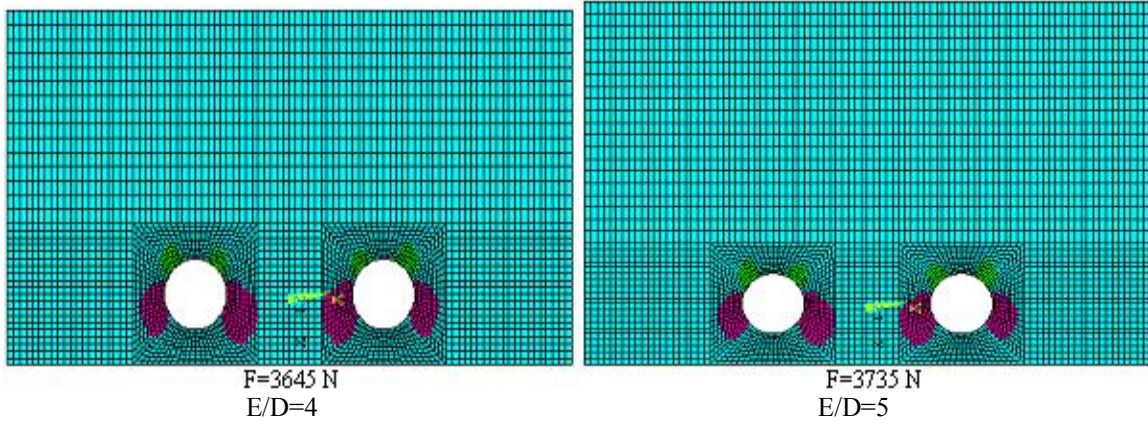
Şekil 3.155’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak başlasa da daha sonra iki delik arası K mesafesinde ilerlemiştir. Hasar K mesafesi merkezinde yırtılma hasar tipi olarak 2320 N’ luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2640 N, 2840 N, 2960 N yükleri altında son bulmuştur.



Şekil 3.155. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=8$, $K/D=2$, $M/D=3$ numunenin ilerlemeli hasar analizi Sonuçları

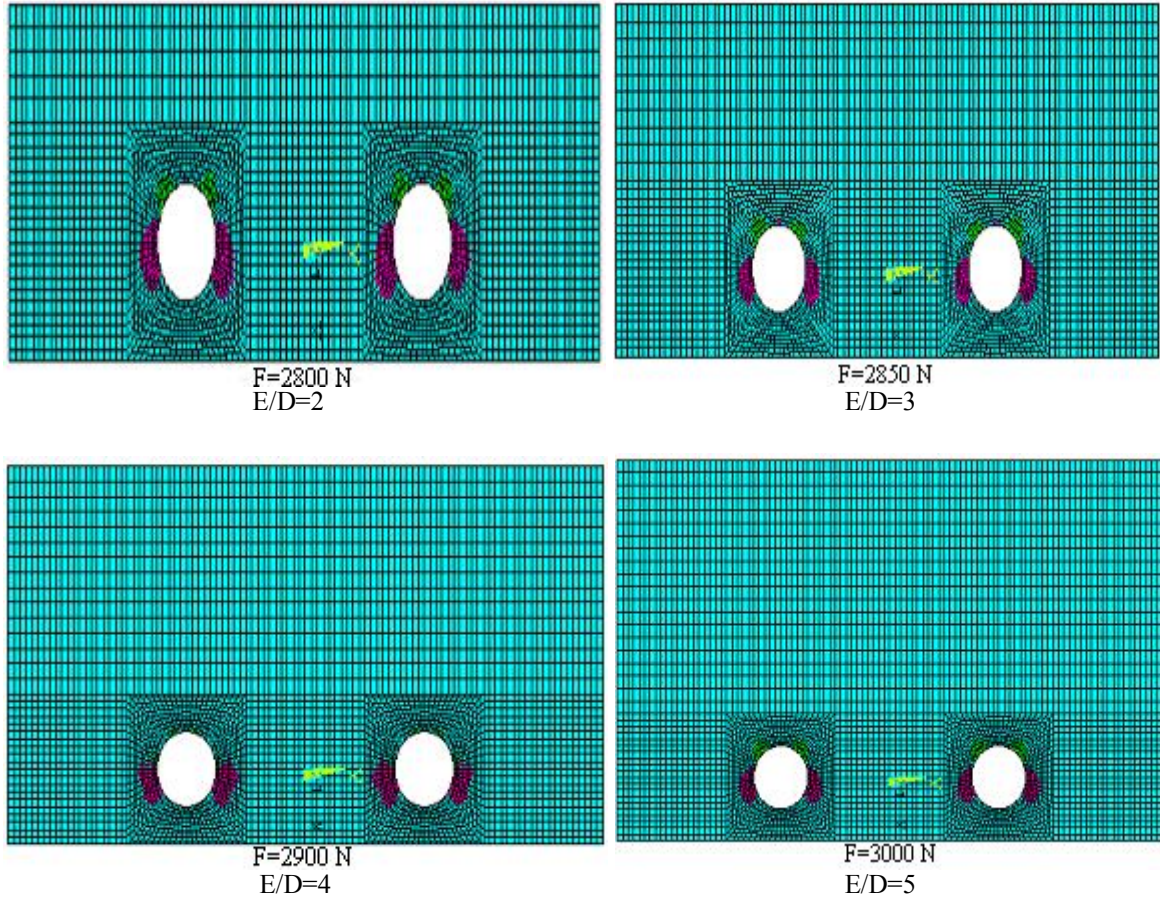
Şekil 3.156' da görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma hasarı olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 3420 N ' luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3510 N , 3645 N , 3735 N ' luk yükler altında son bulmuştur.





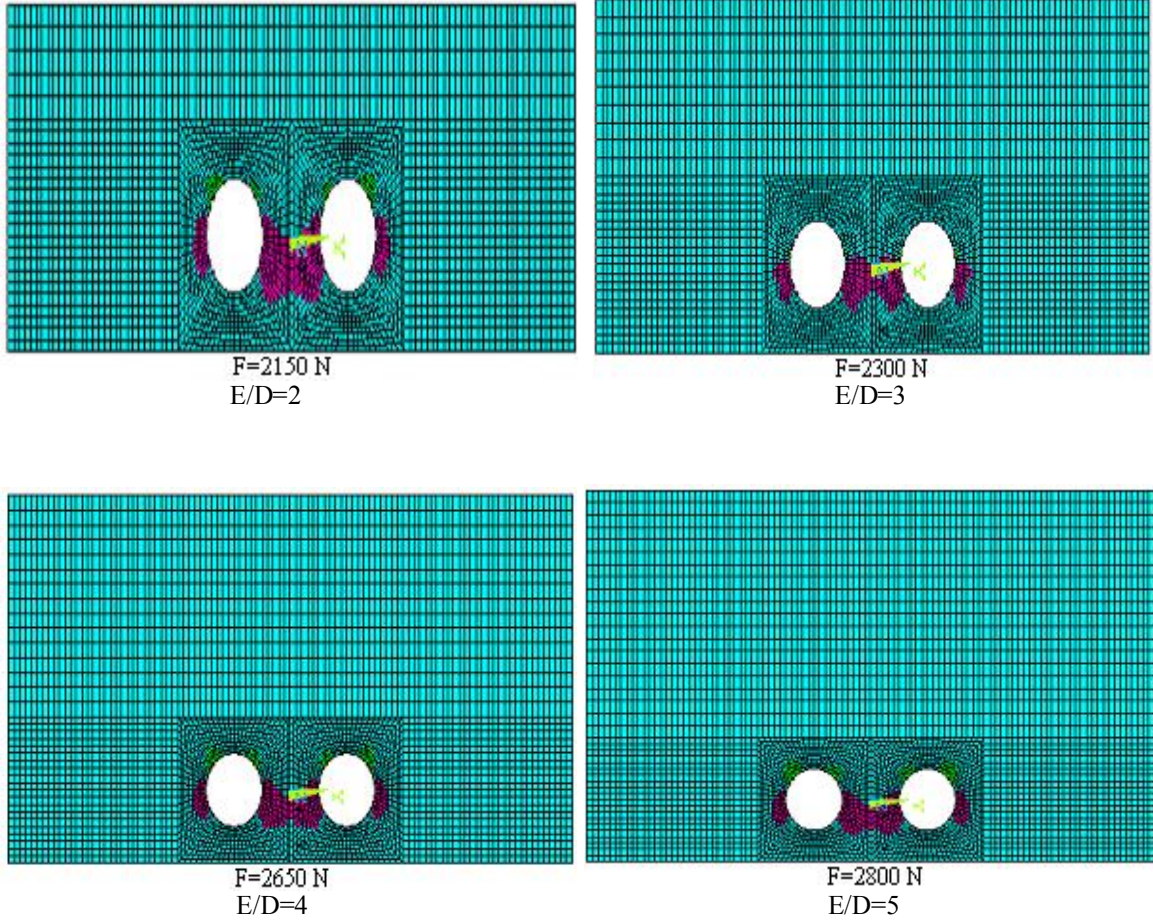
Şekil 3.156. 3 ay deniz suyuunda bekletilen W/D=9, K/D=3, M/D=3 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.157' de görüldüğü gibi E/D=2' de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma hasarı olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 2800 N' luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum E/D=3, 4, 5 için sırasıyla 2850 N, 2900 N, 3000 N' luk yükler altında son bulmuştur.



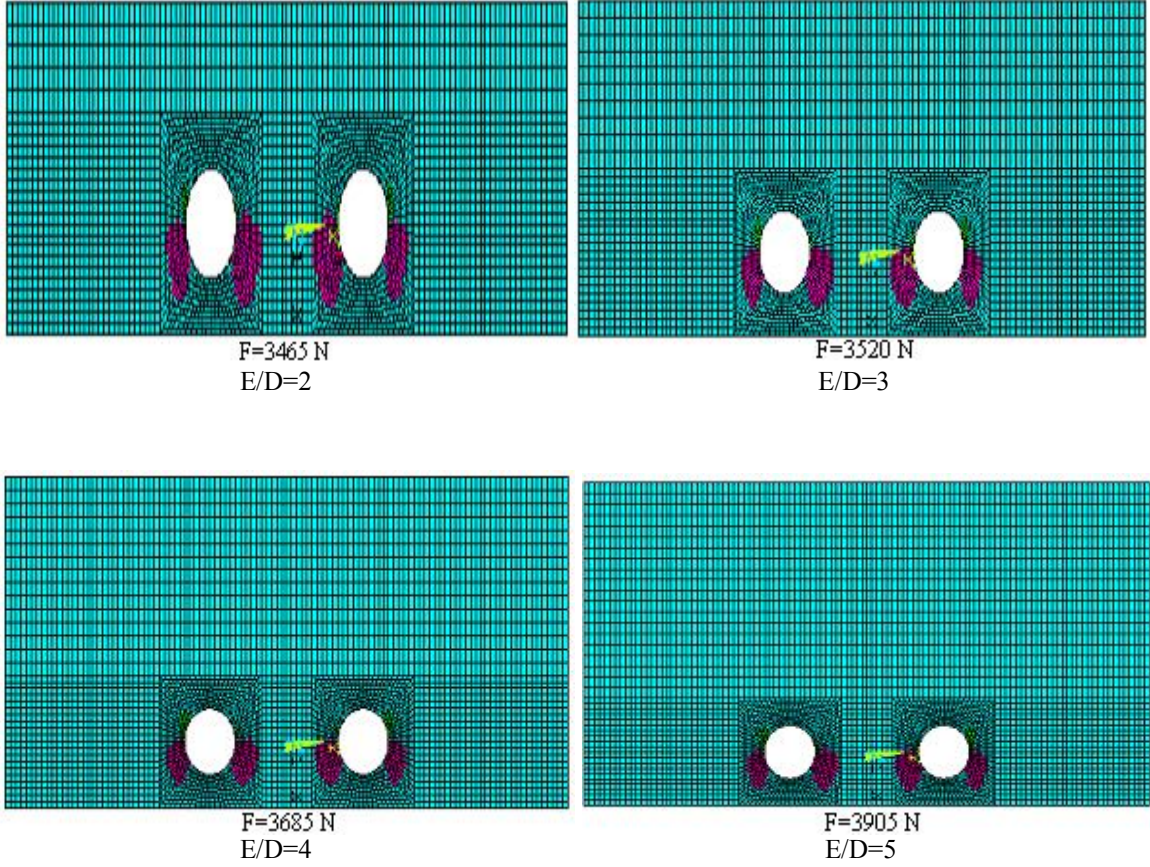
Şekil 3.157. 3 ay deniz suyuunda bekletilen W/D=10, K/D=4, M/D=3 numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.158’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak başlasa da yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar iki delik arası K mesafesi merkezinde birleşerek 2150 N’ luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2300 N, 2650 N, 2800 N yükleri altında son bulmuştur.



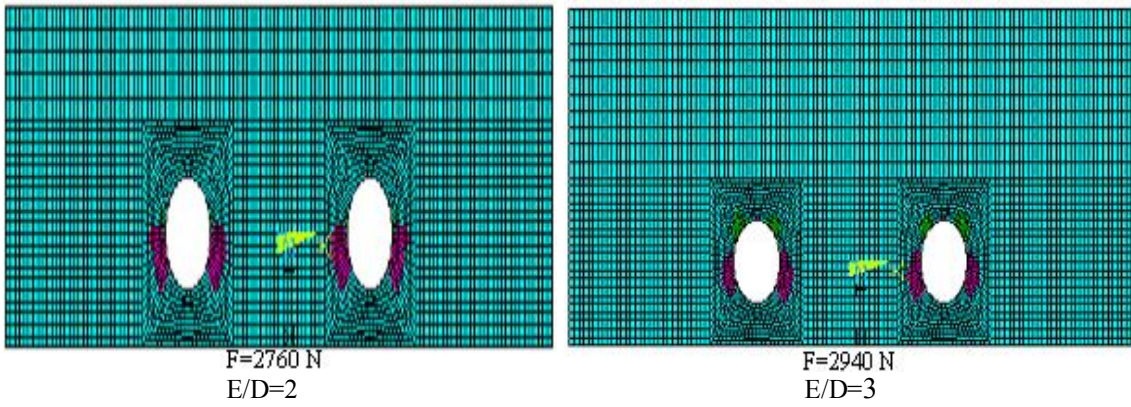
Şekil 3.158. 3 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=10$, $K/D=2$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

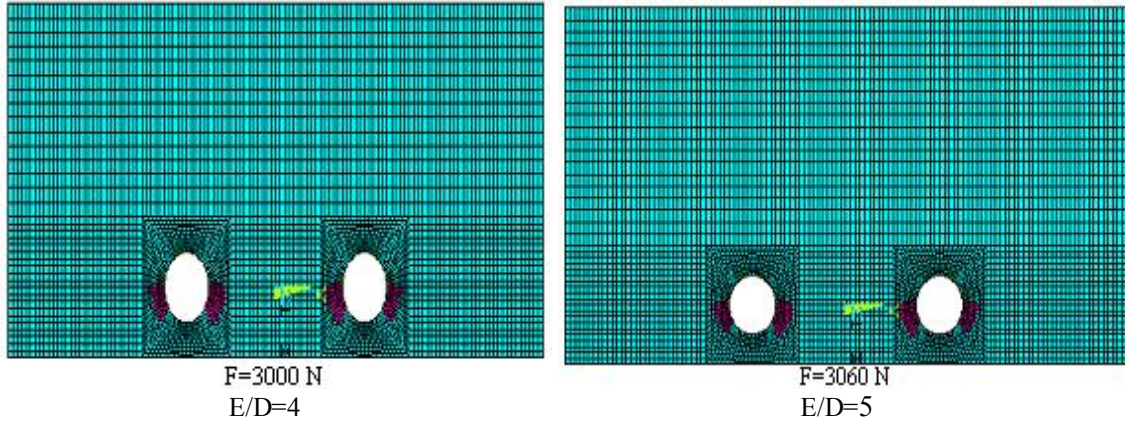
Şekil 3.159’ da görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma hasarı olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 3465 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3520 N, 3685 N, 3905 N yükler altında son bulmuştur.



Şekil 3.159. 3 ay deniz suyu bekletilen $W/D=11$, $K/D=3$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.160' da görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de ezilme hasarı oluşmuştur. Bu hasar 2760 N' luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2940 N, 3000 N, 3060 N yükleri altında son bulmuştur.



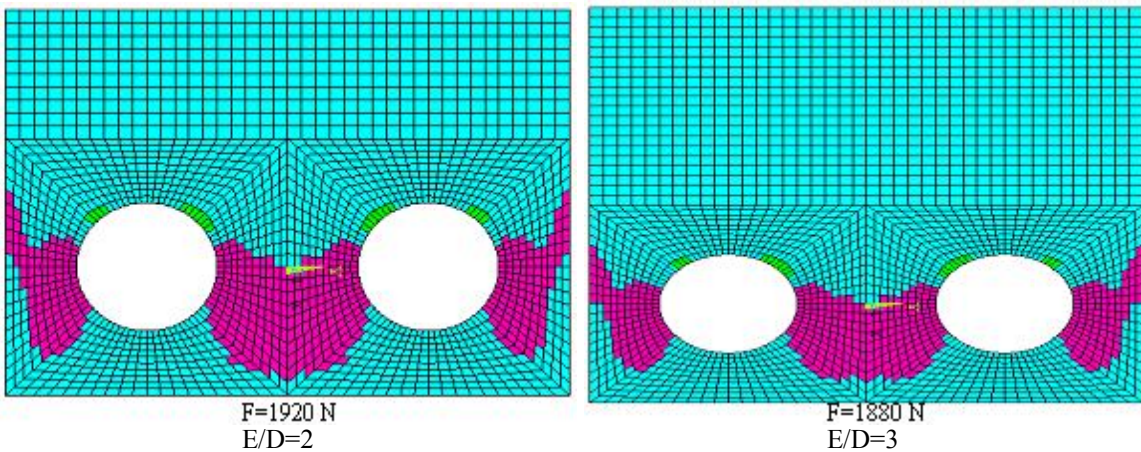


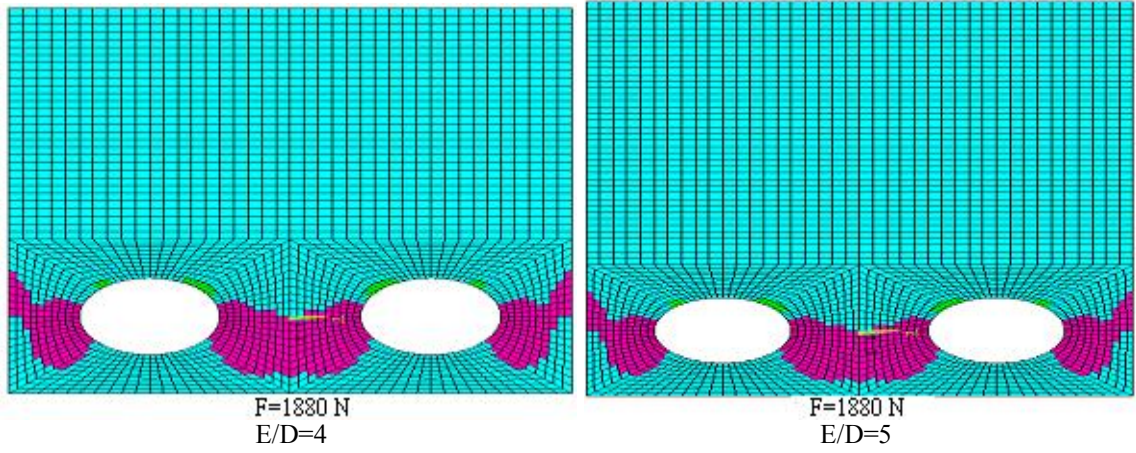
Şekil 3.160. 3 ay deniz suyu bekletilen $W/D=12$, $K/D=4$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

3.2.3.3. 6 ay deniz suyu bırakılan numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

6 ay deniz suyu içerisine bırakılan numuneler çekme testine tabi tutularak mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Tespit edilen özellikler ANSYS 11.0 programına yerleştirilerek ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde numunelerin ilerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen son hasar yük resimleri yer almaktadır.

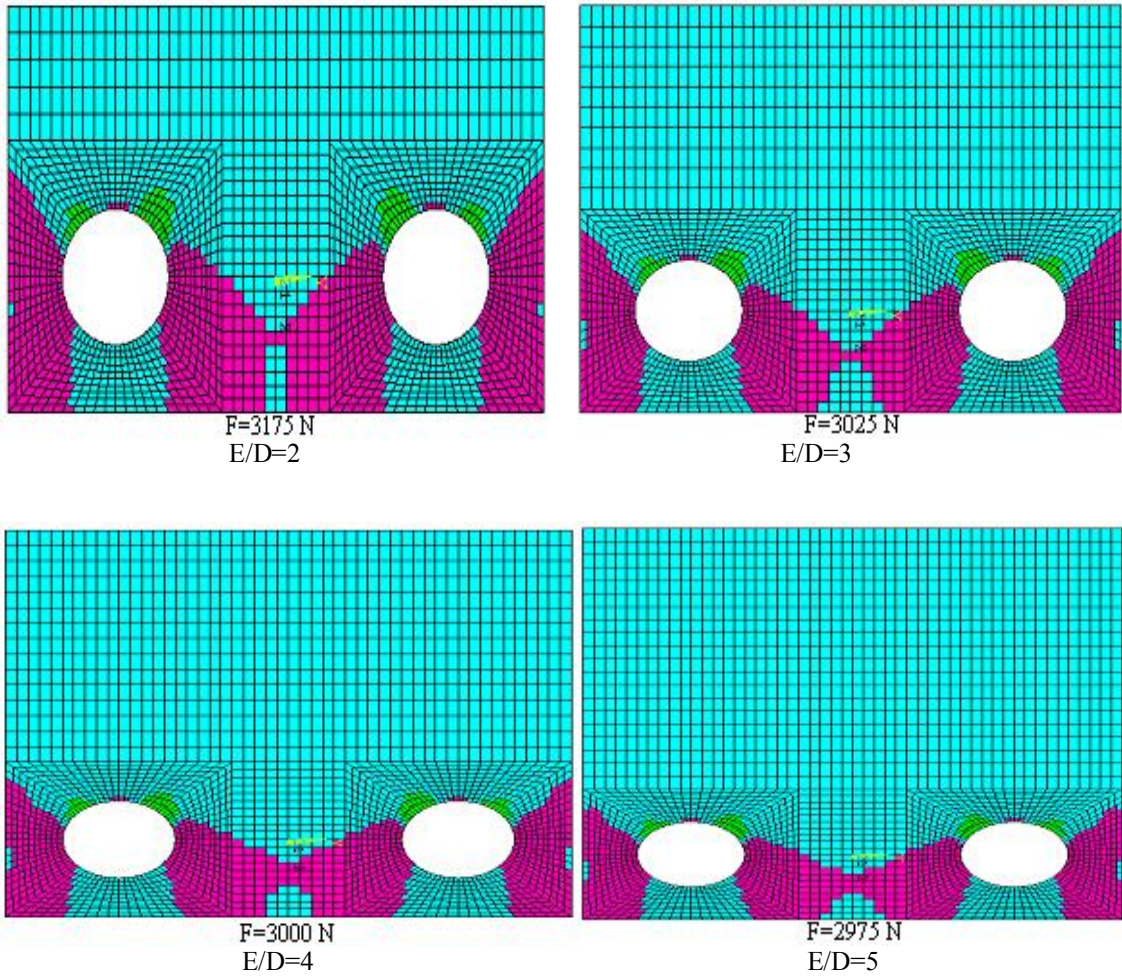
Şekil 3.161’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar K mesafesinde birleşerek iki deliğin kenarlara kadar ilerleyerek 1920 N’ luk yük altında son bulmuştur. Hasar tipi yırtılma olarak görülmektedir.





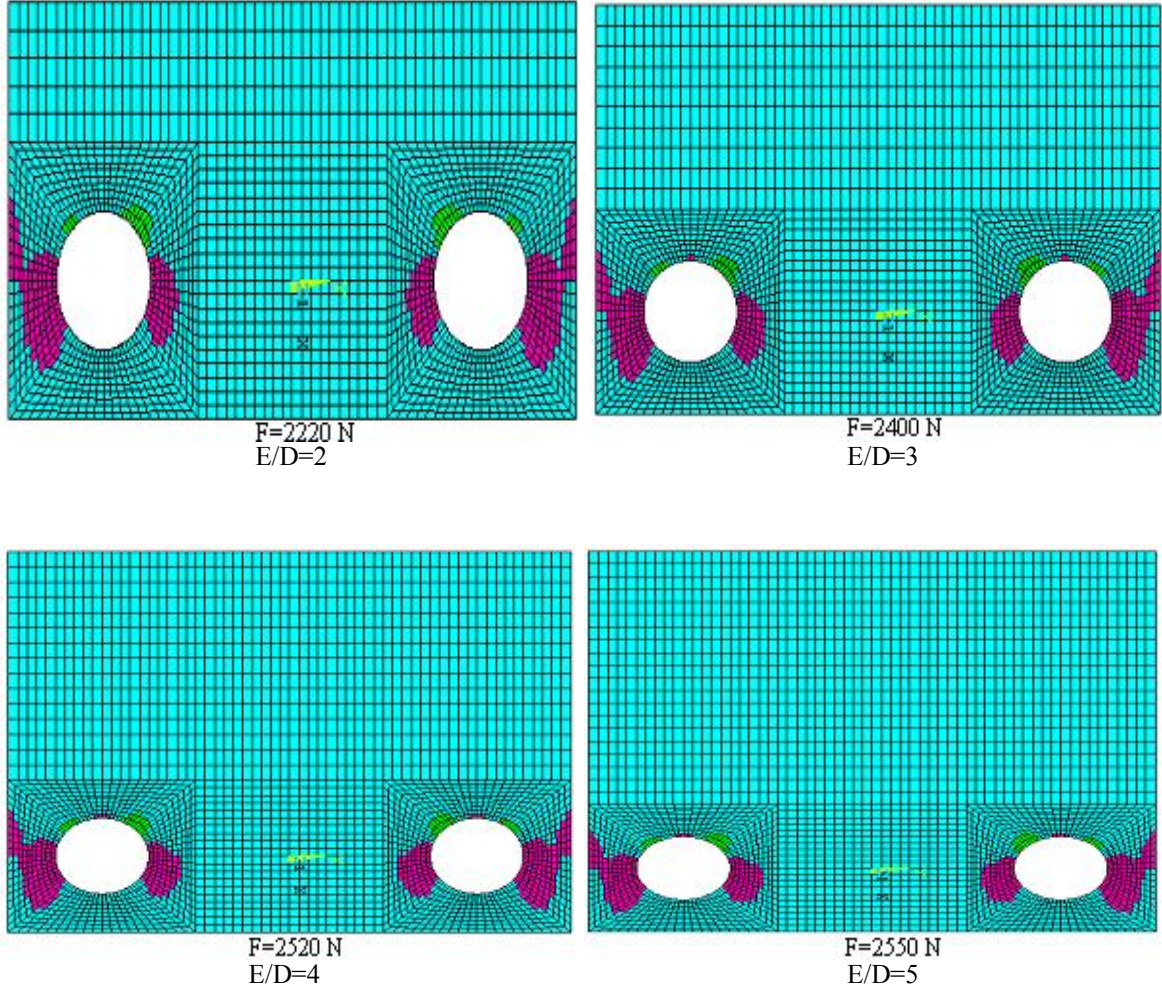
Şekil 3.161. 6 ay deniz suyu bekletilen $W/D=4$, $K/D=2$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.162’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar delik kenarlarından başlayıp K mesafesine kadar ilerleyip, birleşerek 3175 N’ luk yük altında son bulmuştur.



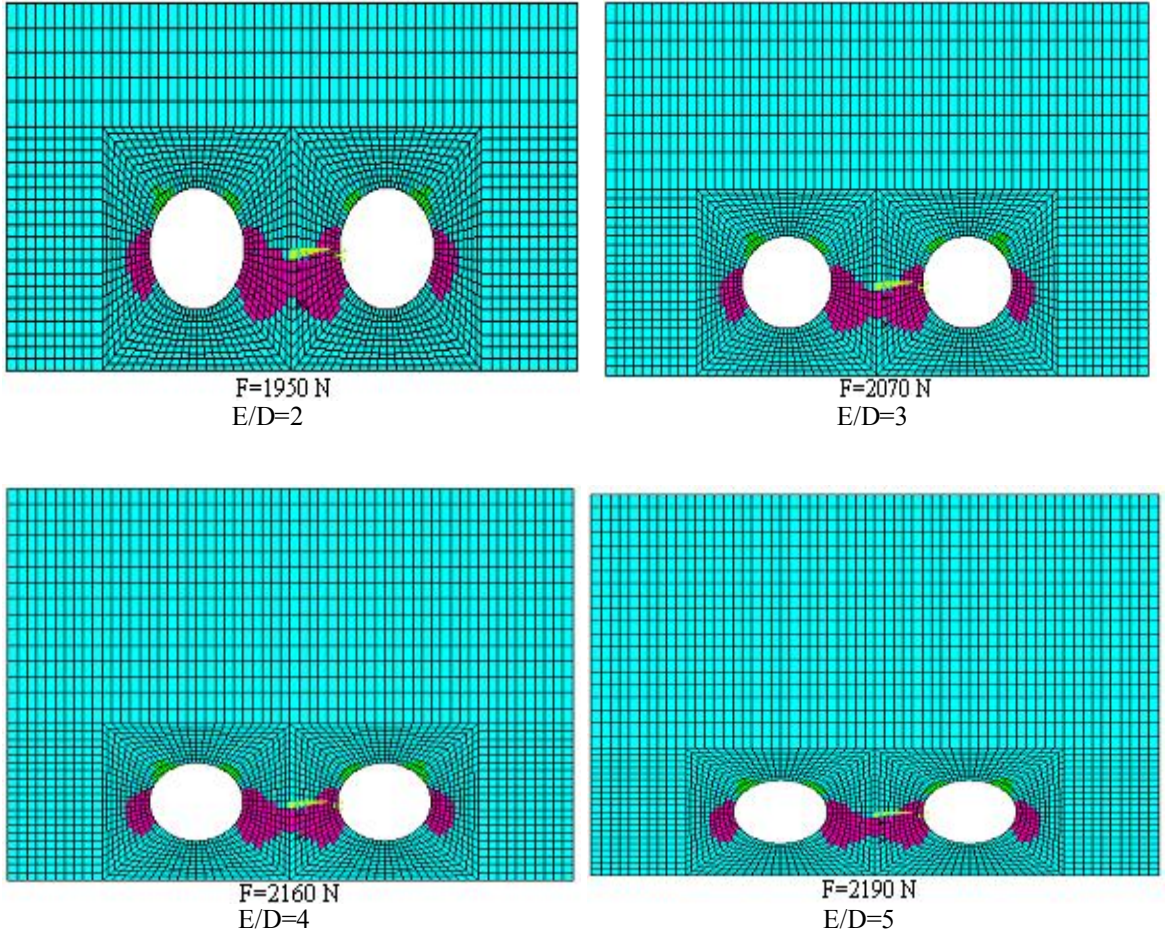
Şekil 3.162. 6 ay deniz suyu bekletilen $W/D=5$, $K/D=3$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.163’ te görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar delik kenarlarından başlayıp, 2220 N’ luk yük altında son bulmuştur. $E/D=3, 4, 5$ olduğu zaman hasar 2400 N, 2520 N, 2550 N yük altında sonlanmıştır.



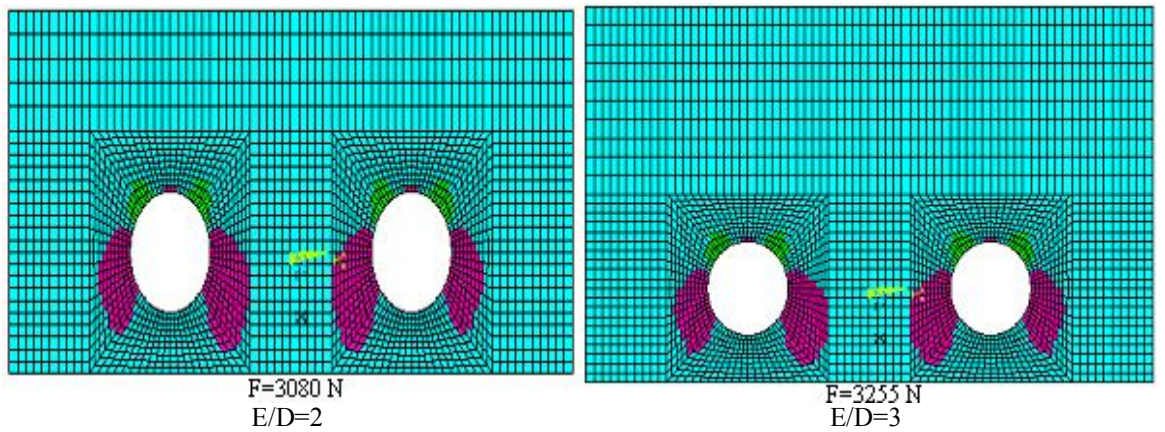
Şekil 3.163. 6 ay deniz suyu bekletilen $W/D=6$, $K/D=4$, $M/D=1$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

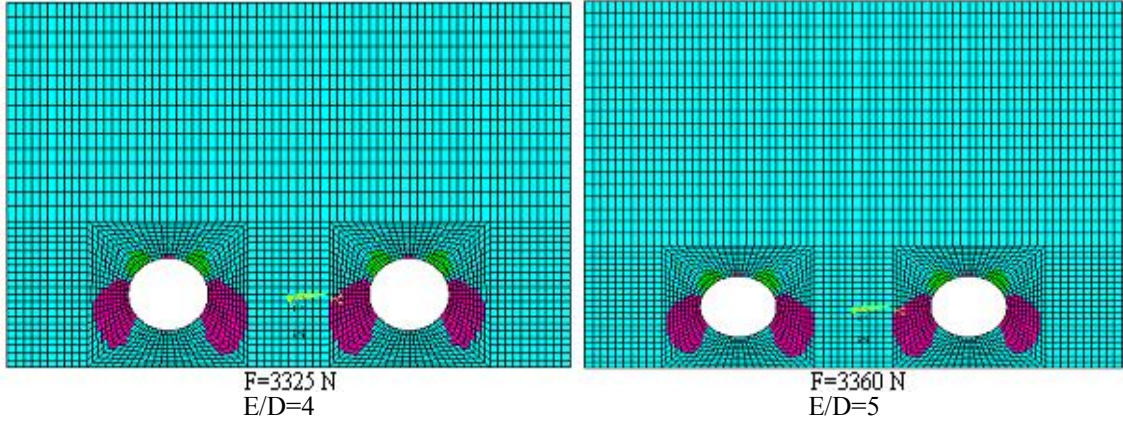
Şekil 3.164’ te görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak görülmüş ancak daha sonra yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar iki delik arası K mesafesinde ilerleyerek birleştiği noktada 1950 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2070 N, 2160 N, 2190 N yüklerde son bulmuştur.



Şekil 3.164. 6 ay deniz suyu bekletilen $W/D=6$, $K/D=2$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

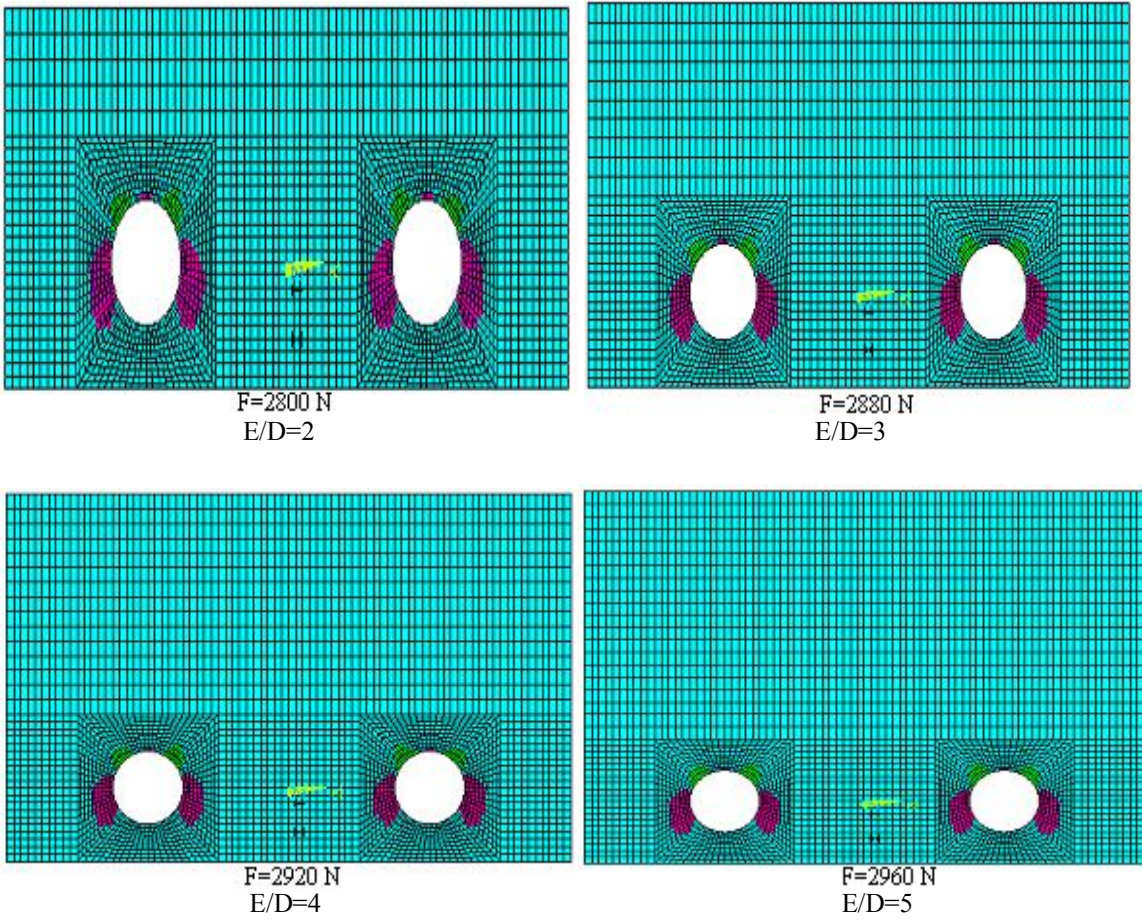
Şekil 3.165’ te görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar ezilme hasarı olarak görülmüştür. 3080 N’ luk yük altında hasara son verilmiştir. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3255 N, 3325 N, 3360 N yükler altında son verilmiştir.





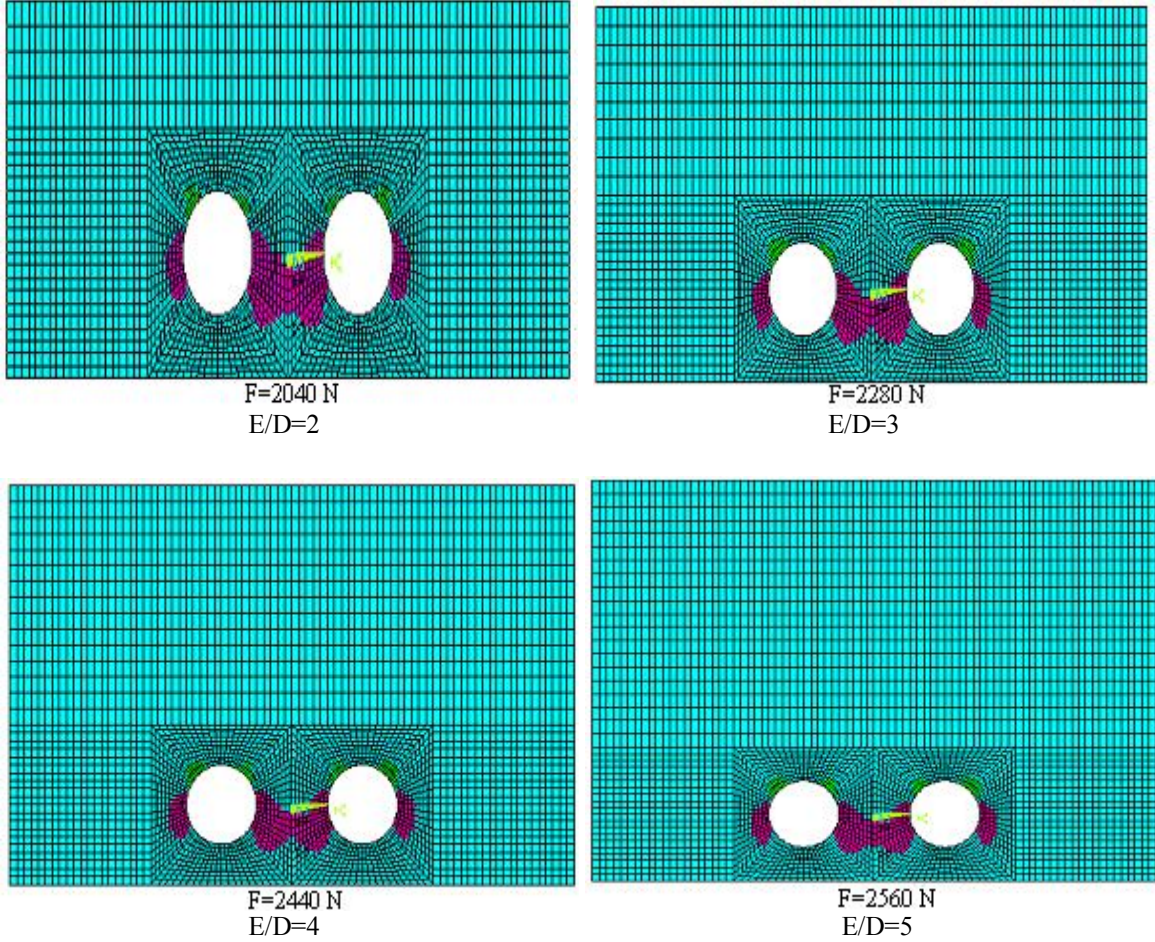
Şekil 3.165. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=7$, $K/D=3$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.166' da görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar ezilme hasarı olarak görülmüştür. 2800 N' luk yük altında hasara son verilmiştir. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2880 N, 2920 N, 2960 N yükleri altında son verilmiştir.



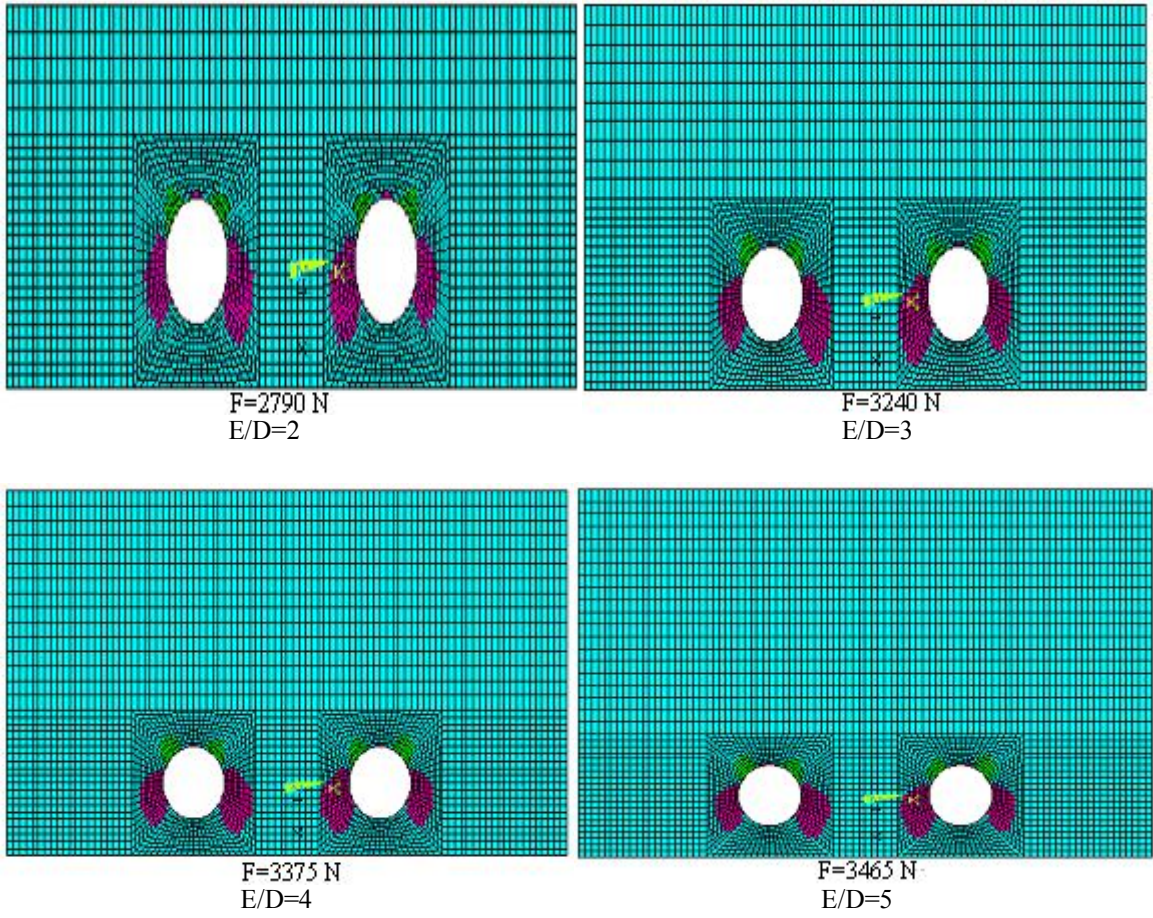
Şekil 3.166. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=8$, $K/D=4$, $M/D=2$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.167’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de hasar önce ezilme hasarı olarak başlasa da daha sonra iki delik arası K mesafesinde ilerlemiştir. Hasar K mesafesi merkezinde yırtılma hasar tipi olarak 2040 N’ luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2280 N, 2440 N, 2560 N yükleri altında son bulmuştur.



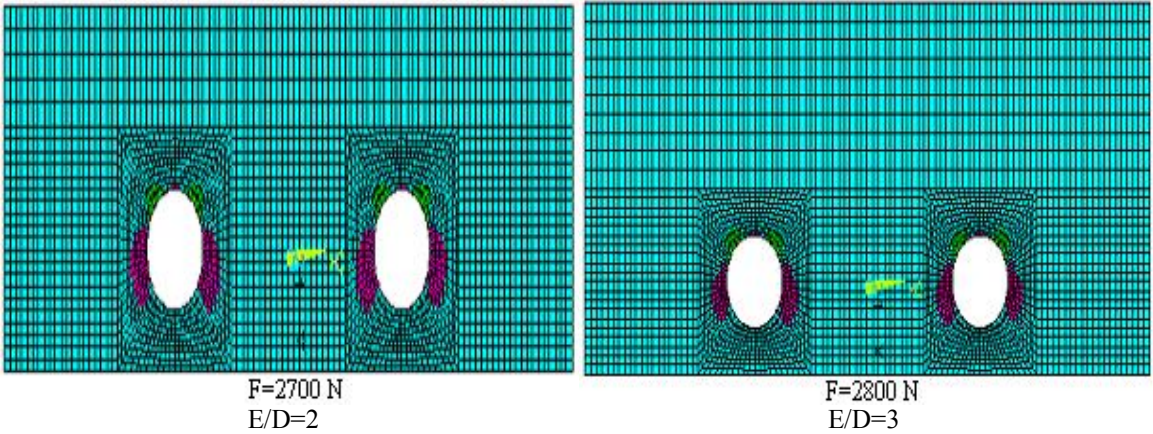
Şekil 3.167. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=8$, $K/D=2$, $M/D=3$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

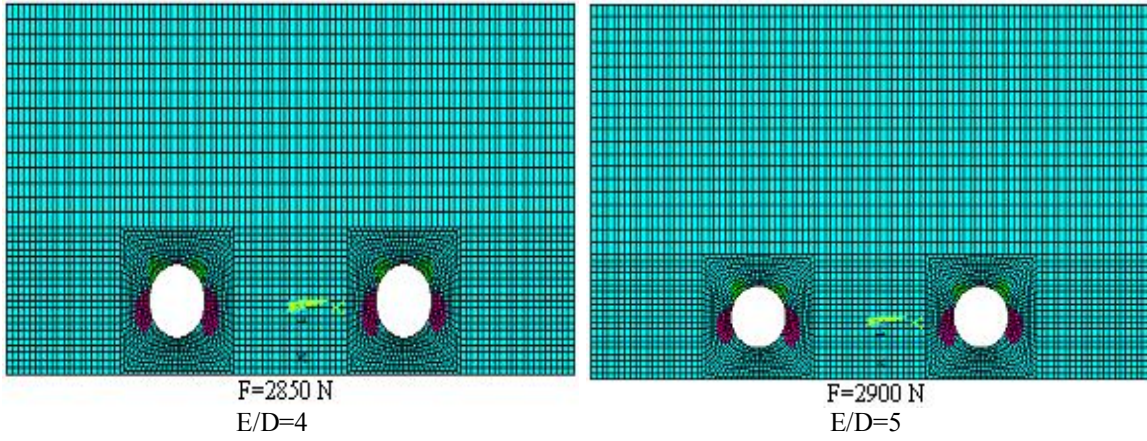
Şekil 3.168’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Hasar 2790 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3240 N, 3375 N, 3465 N’ luk yükleri altında son bulmuştur.



Şekil 3.168. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=9$, $K/D=3$, $M/D=3$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

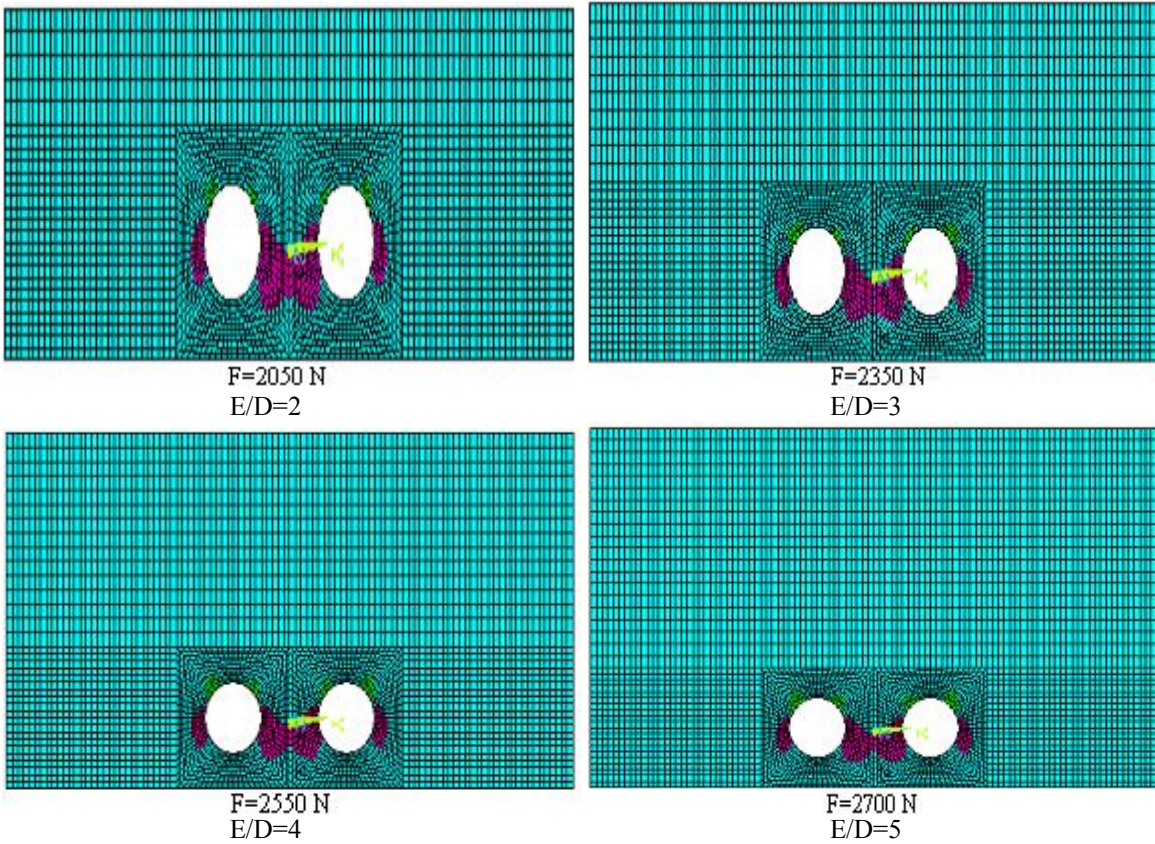
Şekil 3.169’ da görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Bu hasar 2700 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3$, 4, 5 için sırasıyla 2800 N, 2850 N, 2900 N’ luk yükler altında son bulmuştur.





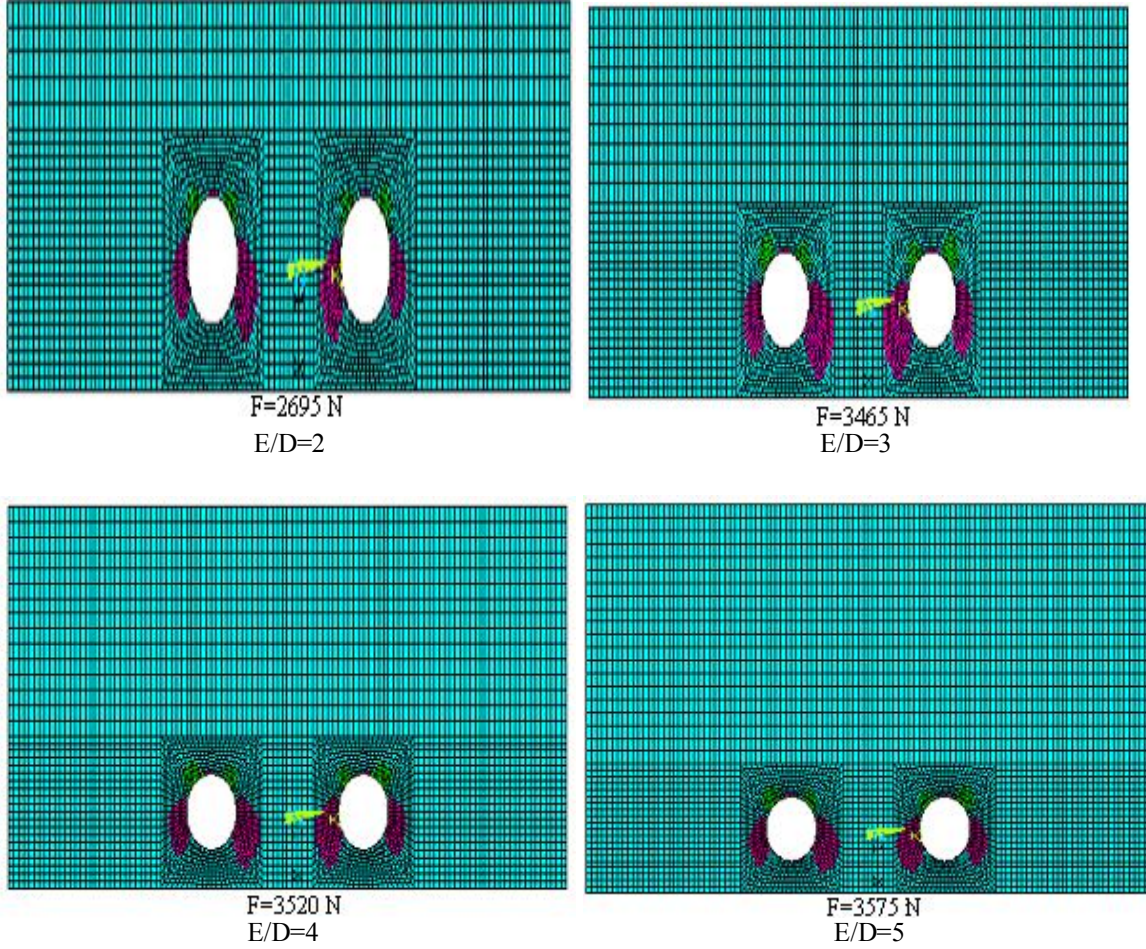
Şekil 3.169. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=10$, $K/D=4$, $M/D=3$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.170' te görüldüğü gibi $E/D=2$ ' de hasar önce ezilme hasarı olarak başlasa da yırtılma hasarına dönüşmüştür. Hasar iki delik arası K mesafesi merkezinde birleşerek 2050 N' luk yük altında son bulmuştur. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2350 N, 2550 N, 2700 N yükler altında son bulmuştur.



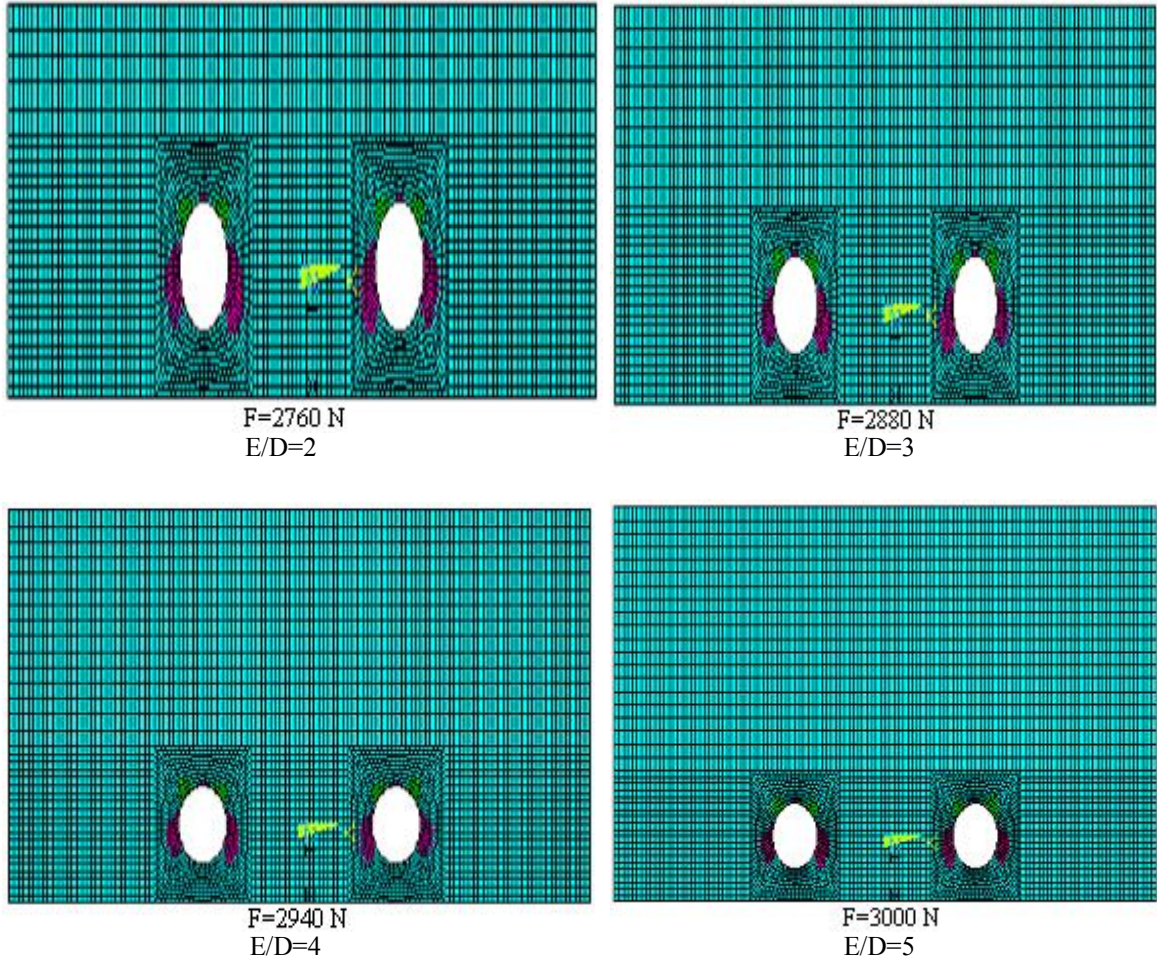
Şekil 3.170. 6 ay deniz suyuunda bekletilen $W/D=10$, $K/D=2$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.171’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Önce yırtılma hasarı olarak başlasa da daha sonra ezilme hasarı meydana gelmiştir. Bu hasar 2695 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 3465 N, 3520 N, 3575 N yükler altında son bulmuştur.



Şekil 3.171. 6 ay deniz suyu bekletilen $W/D=11$, $K/D=3$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

Şekil 3.172’ de görüldüğü gibi $E/D=2$ ’ de ezilme hasarı oluşmuştur. Bu hasar 2760 N’ luk yük altında sonlandırılmıştır. Bu durum $E/D=3, 4, 5$ için sırasıyla 2880 N, 2940 N, 3000 N yükler altında son bulmuştur.



Şekil 3.172. 6 ay deniz suyu bekletilen $W/D=12$, $K/D=4$, $M/D=4$ numunenin ilerlemeli hasar analizi sonuçları

İlerlemeli hasar analizi sonuçları değerlendirildiği zaman, E/D oranı arttığı zaman hasar yüklerinin de arttığı tespit edilmiştir.

3.2.4. İlerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen hasar tipleri

Deneye tabi tutulan tüm numunelerin her aşamadaki (kuru, 3 ay ve 6 ay deniz suyu şartlarında) hasar tipleri ilerlemeli hasar analizi ile tespit edilmiştir. ANSYS ilerlemeli hasar analizi sonucu tespit edilen hasar tipleri Tablo 3.8’ de görülmektedir.

$W=20$ mm, $K=10$ mm, $M=5$ mm ve $E=10, 15, 20, 25$ mm boyutlarındaki numunelerde her üç aşamada da (kuru, 3 ay deniz suyu, 6 ay deniz suyu) yırtılma hasar tipi elde edilmiştir.

W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki numunelerde kuru haldeki numunelerin hasar tipi yırtılma olarak elde edilirken, bu durum 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyuna konulan aynı boyutlardaki numunelerde hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana geldiği görülmüştür.

W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutları için her üç aşamada hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak tespit edilmiştir.

W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E= 10, 15, 20, 25 mm boyutları için her üç aşamada hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak tespit edilmiştir.

W=35, 40 mm, K=15, 20 mm, M=10 mm ve E= 10, 15, 20, 25 mm boyutları için her üç aşamada da hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir.

W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutları için her üç aşamadaki numunelerde hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak tespit edilmiştir.

W=45, 50 mm, K=15, 20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutları için her üç aşamadaki numunelerde hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir.

W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutları için her üç aşamadaki numunelerde hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak tespit edilmiştir.

W=55, 60 mm, K=15, 20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarında numunelerde her üç aşamada hasar tipleri ezilme olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3.8. ANSYS ilerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen hasar tipleri

Numune boyutları		İlerlemeli hasar analizi sonucu elde edilen hasar tipleri		
		Kuru	Deniz suyu içinde 3 ay	Deniz suyu içinde 6 ay
W/D=4 K/D=2 M/D=1	E/D=2	N	N	N
	E/D=3	N	N	N
	E/D=4	N	N	N
	E/D=5	N	N	N
W/D=5 K/D=3 M/D=1	E/D=2	N	B+N	B+N
	E/D=3	N	B+N	B+N
	E/D=4	N	B+N	B+N
	E/D=5	N	B+N	B+N
W/D=6 K/D=4 M/D=1	E/D=2	B+N	B+N	N
	E/D=3	B+N	B+N	B+N
	E/D=4	B+N	B+N	B+N
	E/D=5	B+N	B+N	B+N
W/D=6 K/D=2 M/D=2	E/D=2	B+N	B+N	B+N
	E/D=3	B+N	B+N	B+N
	E/D=4	B+N	B+N	B+N
	E/D=5	B+N	B+N	B+N
W/D=7 K/D=3 M/D=2	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=8 K/D=4 M/D=2	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=8 K/D=2 M/D=3	E/D=2	B+N	B+N	B+N
	E/D=3	B+N	B+N	B+N
	E/D=4	B+N	B+N	B+N
	E/D=5	B+N	B+N	B+N
W/D=9 K/D=3 M/D=3	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=10 K/D=4 M/D=3	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B

Tablo 3.8' in devamı

W/D=10 K/D=2 M/D=4	E/D=2	B+N	B+N	B+N
	E/D=3	B+N	B+N	B+N
	E/D=4	B+N	B+N	B+N
	E/D=5	B+N	B+N	B+N
W/D=11 K/D=3 M/D=4	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B
W/D=12 K/D=4 M/D=4	E/D=2	B	B	B
	E/D=3	B	B	B
	E/D=4	B	B	B
	E/D=5	B	B	B

Sonuç olarak ilerlemeli hasar analizi ile elde edilen hasar tipleri:

M/D=1 ve K/D=2, 3, 4 olduğu zaman her üç aşamada elde edilen hasar tipleri değişmemiş olup, hasar tipleri yırtılma veya ezilme+yırtılma olarak tespit edilmiştir.

M/D=2 ve K/D=2 olduğu zaman her üç aşamada elde edilen hasar tipleri değişmemiş olup, hasar tipi ezilme+yırtılma olarak tespit edilmiştir.

M/D=2 ve K/D≥3 olduğu zaman her üç aşamada meydana gelen hasar tipleri değişmemiş olup, ezilme hasar tipi elde edilmiştir.

M/D=3 ve K/D=2 olduğu zaman her üç aşamada elde edilen hasar tipleri değişmemiş olup, hasar tipi ezilme+yırtılma olarak tespit edilmiştir.

M/D ≥ 3 ve K/D≥3 olduğu zaman her üç aşamada meydana gelen hasar tipleri değişmemiş olup, ezilme hasar tipi elde edilmiştir.

M/D= 4 ve K/D=2 olduğu zaman her üç aşamada elde edilen hasar tipleri değişmemiş olup, hasar tipi ezilme+yırtılma olarak tespit edilmiştir.

3.2.5. Sayısal sonuçlarda geometrik parametrelerin etkisi

Pim bağlantılı iki paralel delikli sekiz tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar kuru şartlarda, 3 ay ve 6 ay deniz suyu şartlarında bekletilmişlerdir. Her aşamada malzemenin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Sayısal çözümleme ANSYS 11.0 programında Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak, ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır. Her aşamada elde edilen malzemenin mekanik özellikleri ANSYS programına tek tek

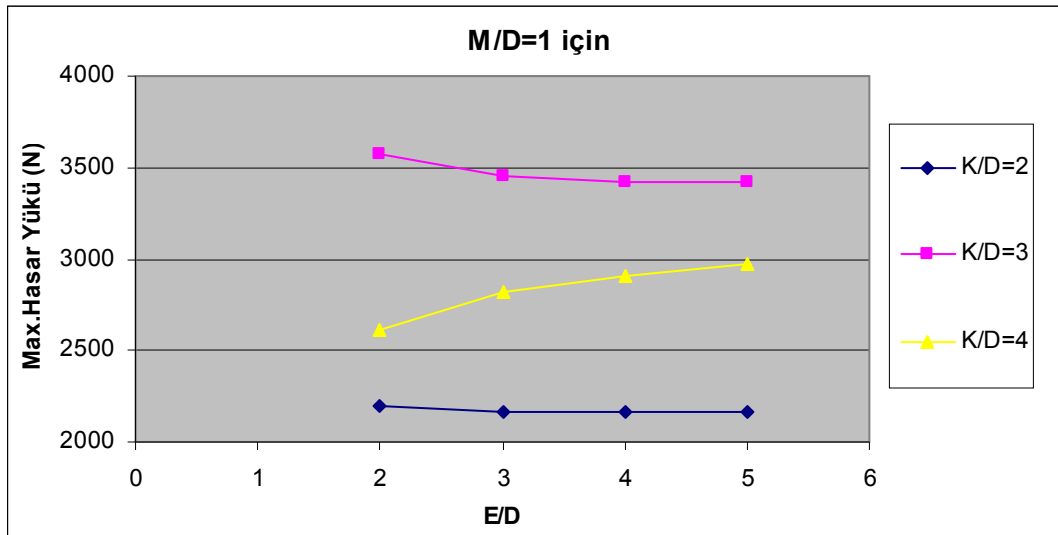
girilerek analiz tüm numune boyutları için gerçekleştirilmiştir. Aşağıda sayısal sonuçlardan elde edilen veriler ışığında hazırlanan grafikler görülmektedir.

3.2.5.1. Sayısal sonuçlarda kuru numuneler üzerinde geometrik parametrelerin etkisi

Kuru numunelerde M/D, K/D, E/D oranlarının malzemenin hasar yüküne etkisi sayısal analiz ile araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

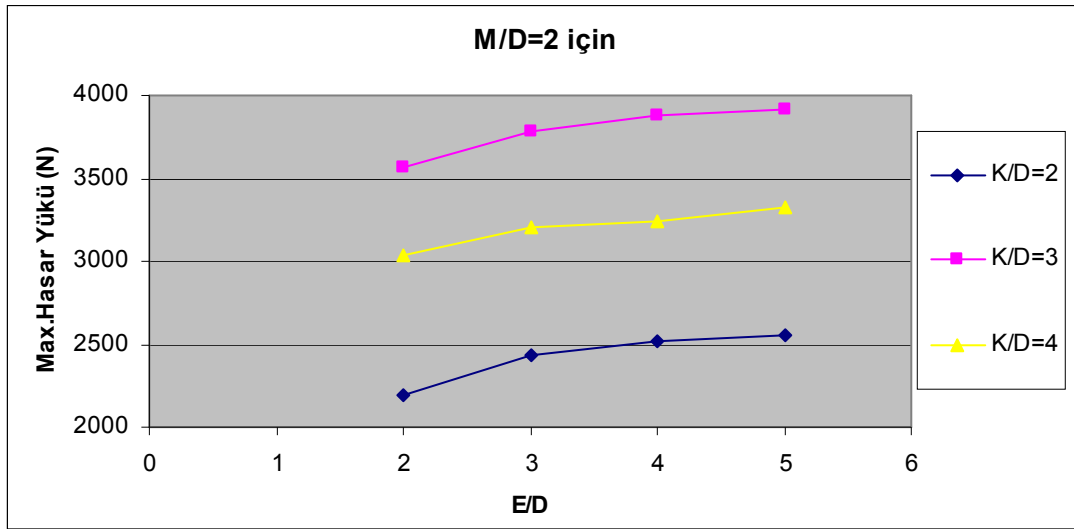
a) E/D oranının etkisi

Şekil 3.173' te M/D=1 olduğunda E/D' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. E/D=2 olduğunda hasar yükleri arasındaki değişim çok az olmakta olup, birbirlerine yakın değerler oluşmuştur. Örneğin; K/D=2 için ve E/D=2 olduğunda maksimum hasar yükü 2200 N elde edilirken, E/D=5 olduğunda 2160 N' luk hasar yükü elde edilmiştir. Benzer durum K/D=3 olduğunda görülmüştür. E/D=2, 5 için sırasıyla 3575 N, 3425 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda ise E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı sayısal olarak elde edilmiştir. Bu durum E/D=2, 5 için sırasıyla 2610 N, 2970 N olarak kendini göstermiştir.



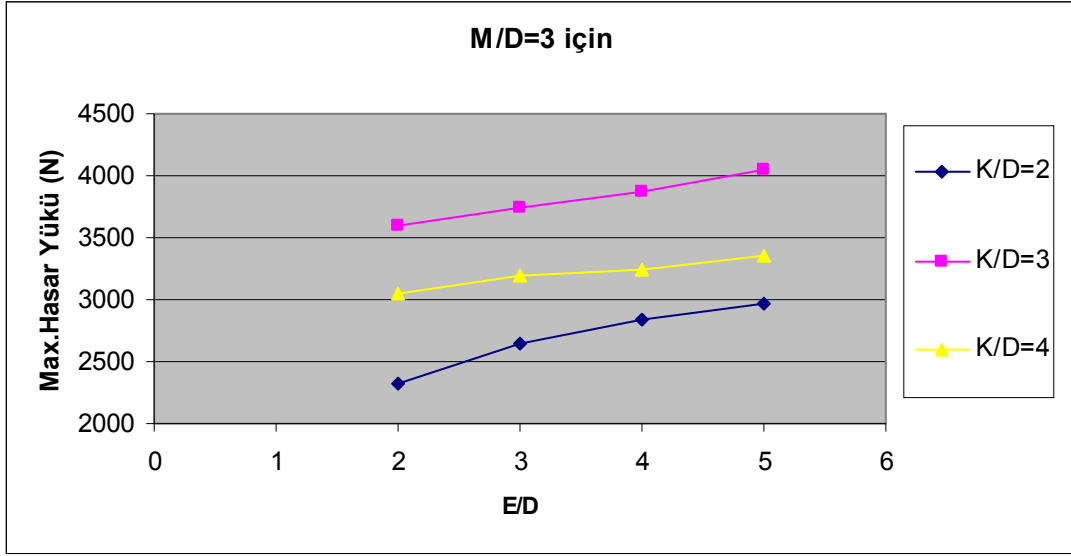
Şekil 3.173. M/D=1 için E/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.174' de $M/D=2$ ve K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olduğunda E/D ' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $E/D=5$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $K/D=2$ için $E/D=2, 5$ için sırasıyla maksimum hasar yükü 2190 N, 2550 N elde edilmiştir. $K/D=3$ için $E/D = 2, 5$ için sırasıyla 3570 N, 3920 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ için $E/D=2, 5$ için ise sırasıyla 3040 N, 3320 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafik incelendiği zaman E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



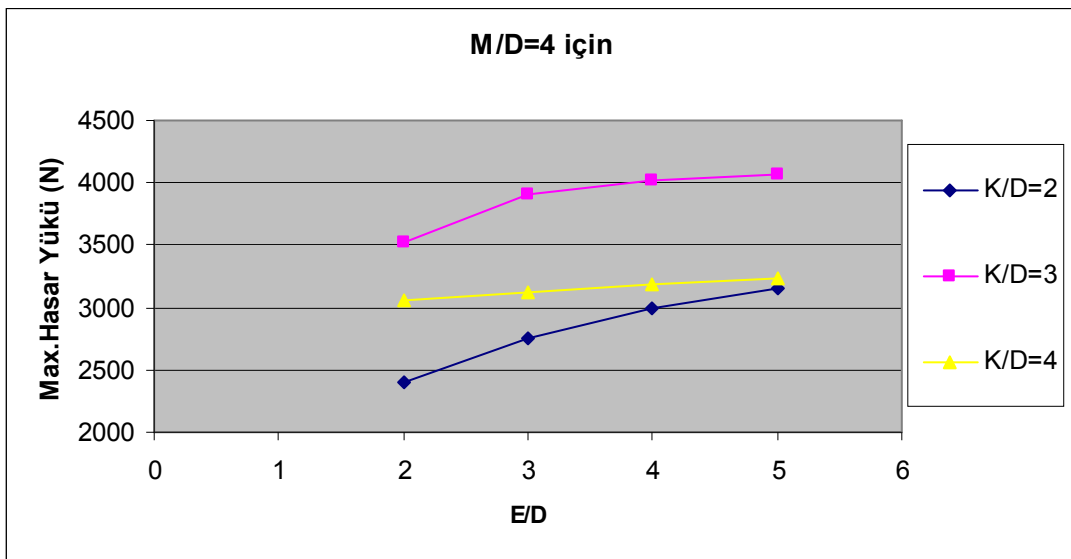
Şekil 3.174. $M/D=2$ için E/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.175' de $M/D=3$ ve K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olduğunda E/D ' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $E/D=5$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $K/D=2$ için $E/D=2, 5$ için sırasıyla maksimum hasar yükü 2320 N, 2960 N elde edilmiştir. $K/D=3$ için $E/D=2, 5$ için sırasıyla 3600 N, 4050 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ için $E/D=2, 5$ için ise sırasıyla 3050 N, 3350 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafik incelendiği zaman E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.175. M/D=3 için E/D oranının hasar yüküne etkisi

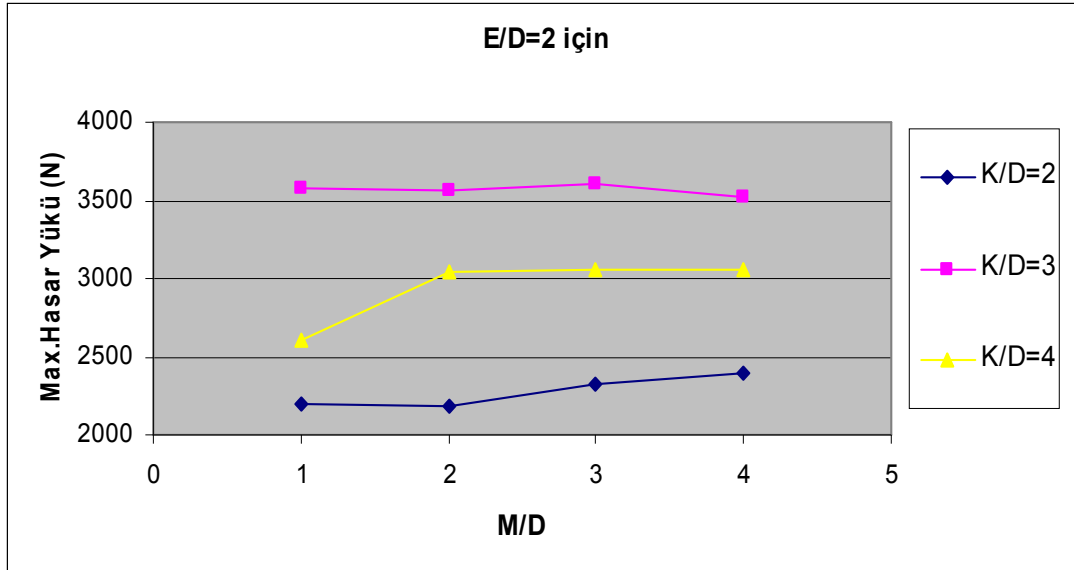
Şekil 3.176' da M/D=4 ve K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olduğunda E/D' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; K/D=2 için E/D=2, 5 için sırasıyla maksimum hasar yükü 2400 N, 3150 N elde edilmiştir. K/D=3 için E/D=2, 5 için sırasıyla 3520 N, 4070 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 için E/D=2, 5 için ise sırasıyla 3060 N, 3240 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafik incelendiği zaman E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.176. M/D=4 için E/D oranının hasar yüküne etkisi

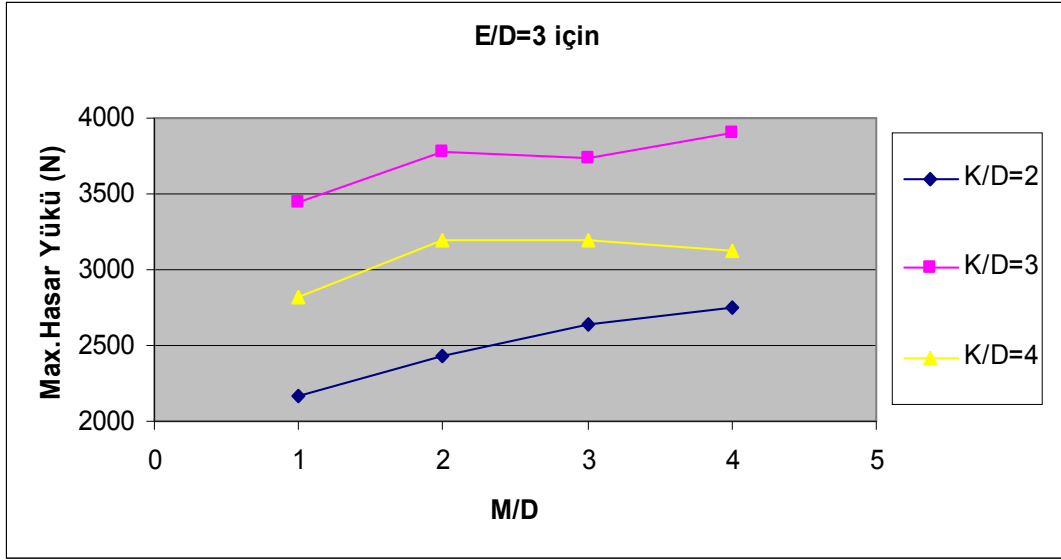
b) M/D oranının etkisi

Şekil 3.177’ de $E/D=2$ olduğunda M/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi değişimi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D oranı 1 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $M/D=4$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $K/D=2$ için $M/D=1, 4$ için sırasıyla maksimum hasar yükü 2200 N, 2400 N olarak elde edilmiştir. $K/D=3$ için $M/D=1, 4$ için sırasıyla 3575 N, 3520 N olarak elde edilmiştir. Buradaki farkın oldukça az olduğu görülmektedir. $K/D=4$ için $M/D=1, 4$ için ise sırasıyla 2610 N, 3060 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafik incelendiği zaman M/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



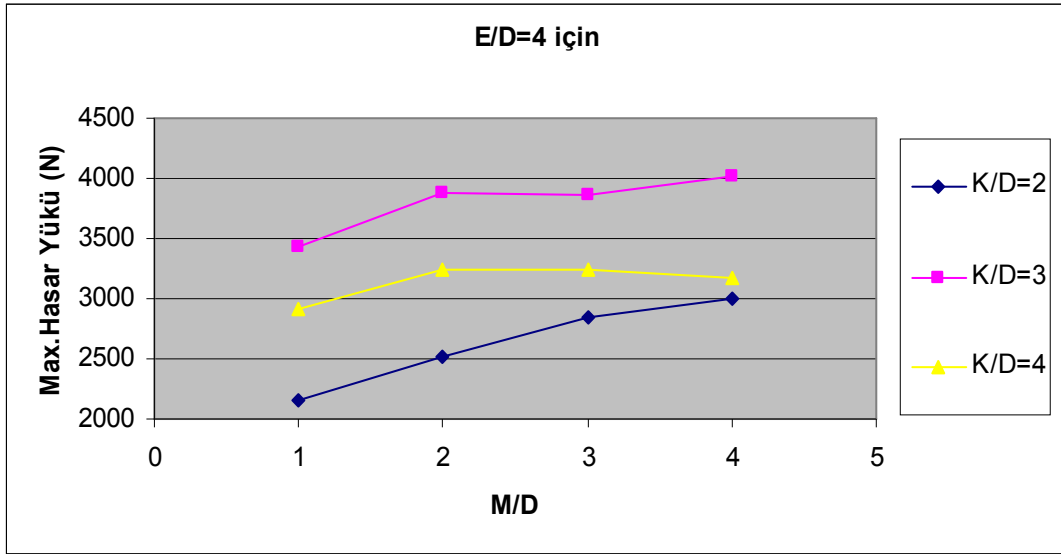
Şekil 3.177. $E/D=2$ için M/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.178’ de $E/D=3$ olduğunda M/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $K/D=2$ için $M/D=1, 4$ için sırasıyla maksimum hasar yükü 2160 N, 2750 N olarak elde edilmiştir. $K/D=3$ için $M/D=1, 4$ için sırasıyla 3450 N, 3905 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ için $M/D=1, 4$ için ise sırasıyla 2820 N, 3120 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafik incelendiği zaman M/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



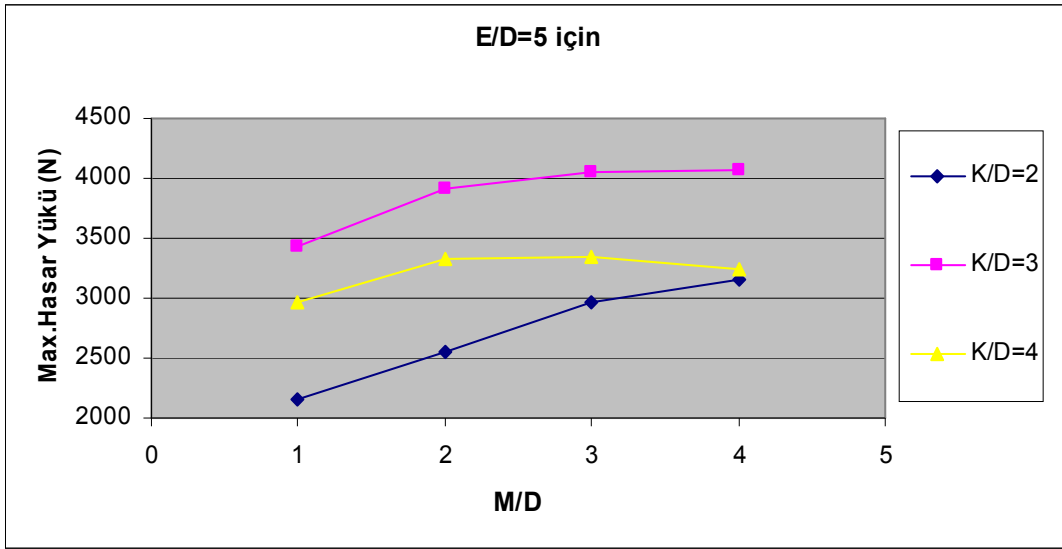
Şekil 3.178. E/D=3 için M/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.179’ da E/D=4 olduğunda M/D’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için M/D=1, 4 için sırasıyla maksimum hasar yükü 2160 N, 3000 N olarak elde edilmiştir. K/D=3 için M/D=1, 4 için sırasıyla 3425 N, 4015 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 için M/D=1, 4 için ise sırasıyla 2910 N, 3180 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafik incelendiği zaman M/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.179. E/D=4 için M/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.180’ de $E/D=5$ olduğunda M/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $K/D=2$ için $M/D=1, 4$ için sırasıyla maksimum hasar yükü 2160 N, 3150 N olarak elde edilmiştir. $K/D=3$ için $M/D=1, 4$ için sırasıyla 3425 N, 4070 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ için $M/D=1, 4$ için ise sırasıyla 2970 N, 3240 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafik incelendiği zaman M/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.

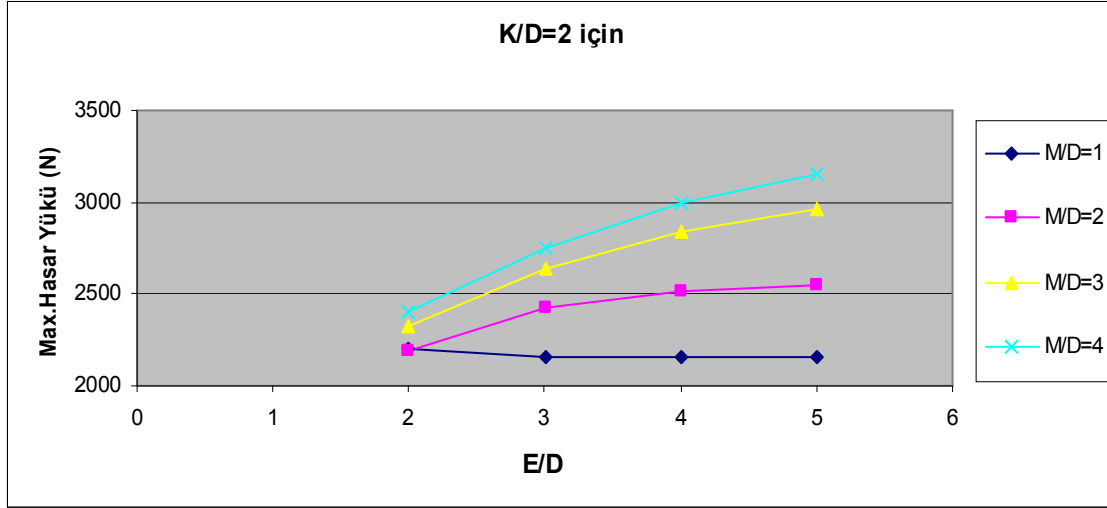


Şekil 3.180. $E/D=5$ için M/D oranının hasar yüküne etkisi

Genel olarak M/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı gözlenmiştir. Ancak bu artış E/D oranı kadar ayırt edici değildir.

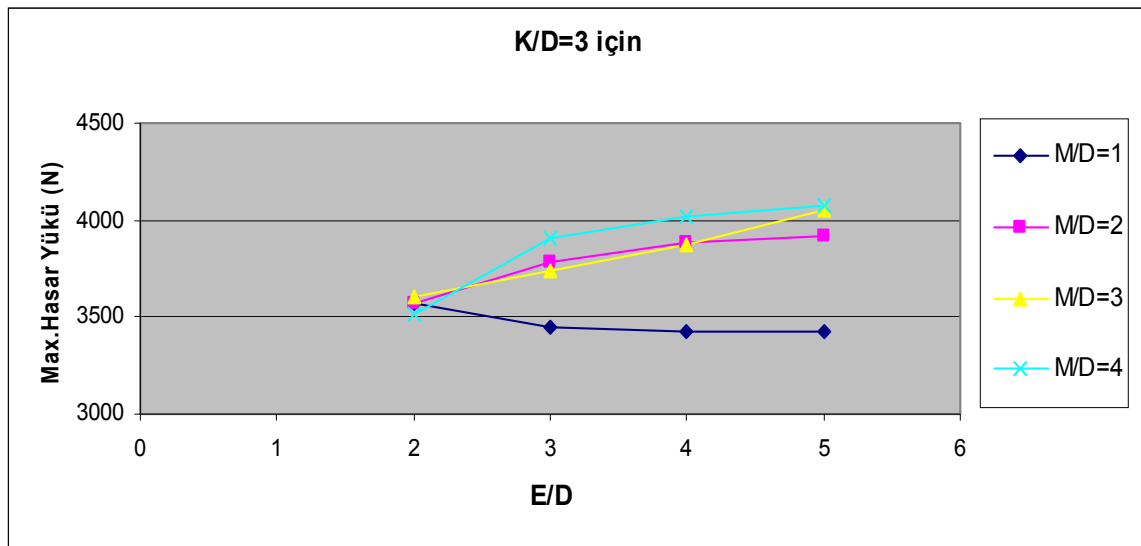
c) E/D , M/D , K/D oranları arasındaki ilişki ve hasar yüküne etkisi

Şekil 3.181’ de $K/D=2$ olduğunda E/D ’ nin ve M/D ’ ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $M/D= 4$ ve $E/D=5$ olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; $M/D=1$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 2200 N, 2160 N elde edilmiştir. Benzer şekilde $M/D=2$ için $E/D=2, 5$ olduğunda sırasıyla 2190 N, 2550 N elde edilirken; $M/D=3$ için $E/D=2, 5$ olduğunda sırasıyla 2320 N, 2960 N elde edilmiştir. $M/D=4$ için $E/D=2, 5$ olduğunda ise sırasıyla 2400 N, 3150 N elde edilmiştir.



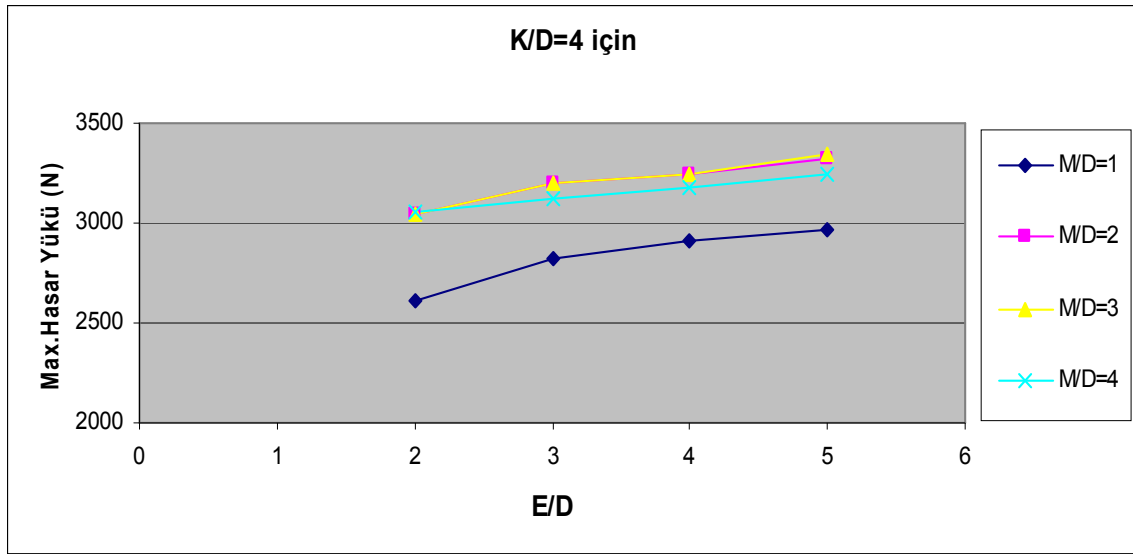
Şekil 3.181. K/D=2 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.182’ de K/D=3 olduğunda E/D’ nin ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D=4 ve E/D=5 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. Örneğin; M/D=1 için E/D=2, 5 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 3575 N, 3425 N elde edilirken; M/D=2 için E/D=2, 5 olduğunda maksimum hasar yükü 3570 N, 3920 N olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde M/D=3 için E/D=2, 5 olduğunda maksimum hasar yükü 3600 N, 4050 N olarak, M/D=4 için E/D=2, 5 olduğunda ise maksimum hasar yükü 3520 N, 4070 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.182. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.183’ te $K/D=4$ olduğunda E/D ’ nin ve M/D ’ ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 2610 N, 2970 N elde edilirken, $M/D=2$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 3040 N, 3320 N elde edilmiştir. Benzer şekilde $M/D=3, 4$ için $E/D=2, 3, 4, 5$ oranlarına bağlı olarak hasar yükü bir artış içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.183. $K/D=4$ için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

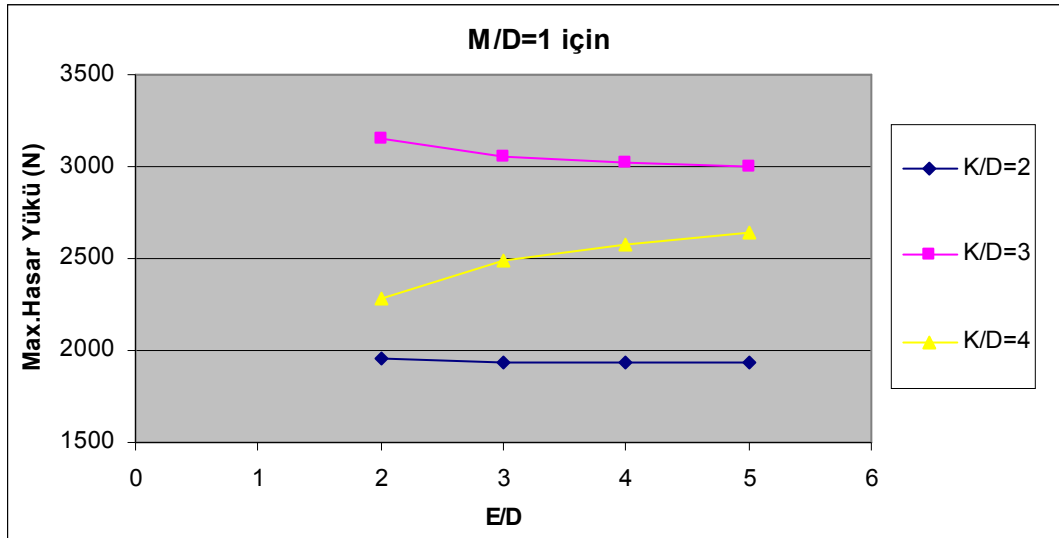
Genel olarak; K/D oranını sabit kabul edilip, E/D ve M/D oranları artırıldığı zaman hasar yükünün de arttığı tespit edilmiştir.

3.2.5.2. Sayısal sonuçlarda deniz suyunda 3 ay bekletilen numuneler üzerinde geometrik parametrelerin etkisi

3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin çekme testi ile elde edilen mekanik özelliklerinin değerleri kullanılan programına girilerek, analiz gerçekleştirilmiştir. Yeni veriler ile gerçekleştirilen bu analiz ile M/D , K/D , E/D oranlarının malzemenin hasar yüküne etkisi araştırılmış ve aşağıdaki grafiklerde karşılaştırılması verilmiştir.

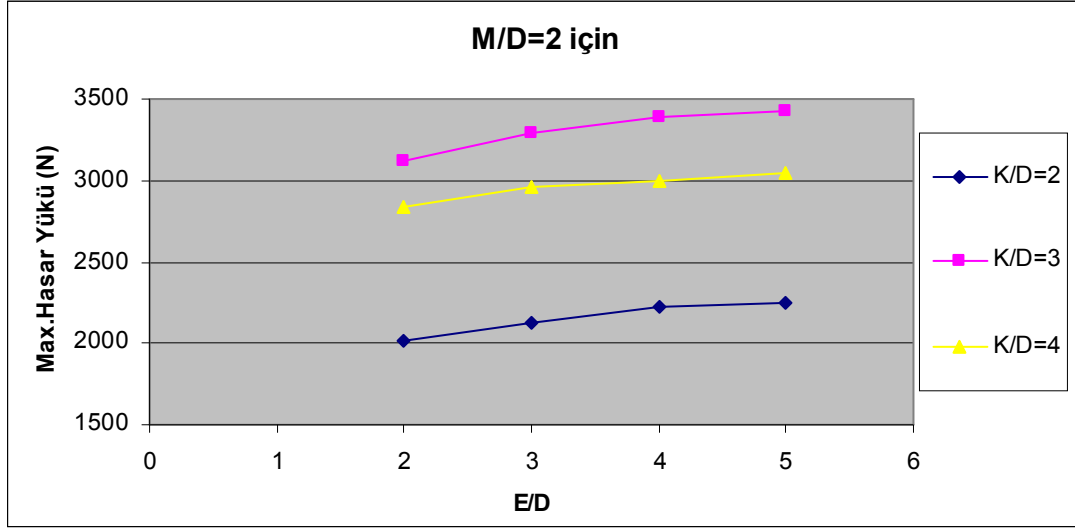
a) E/D oranının etkisi

Şekil 3.184’ te $M/D=1$ olduğunda E/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $E/D=2$ olduğunda hasar yükleri arasındaki değişim çok az olmakta olup, birbirlerine yakın değerler oluşmuştur. Örneğin; $K/D=2$ için $E/D=2$ olduğunda maksimum hasar yükü 1960 N elde edilirken, $E/D=5$ olduğunda 1940 N’ luk hasar yükü elde edilmiştir. Benzer durum $K/D=3$ olduğunda görülmüştür. $E/D=2, 5$ için sırasıyla 3150 N, 3000 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda ise E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı sayısal olarak elde edilmiştir. Bu durum $E/D=2, 5$ için sırasıyla 2280 N, 2640 N olarak kendini göstermiştir.



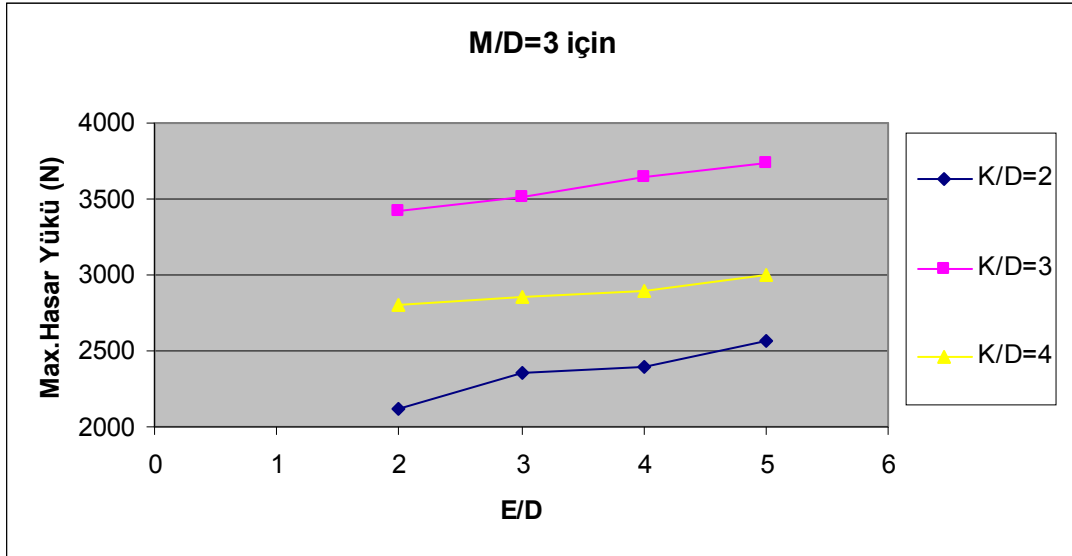
Şekil 3.184. $M/D=1$ için E/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.185’ te $M/D=2$ olduğunda E/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $E/D=5$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. $K/D=2$ olduğunda $E/D=2, 5$ için maksimum hasar yükü sırasıyla 2010 N, 2250 N elde edilmiştir. Aynı şekilde bu artış $K/D=3, 4$ için de E/D oranının artması ile arttığı tespit edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $E/D=2, 5$ için sırasıyla 3115 N, 3430 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $E/D=2, 5$ için ise sırasıyla 2840 N, 3040 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



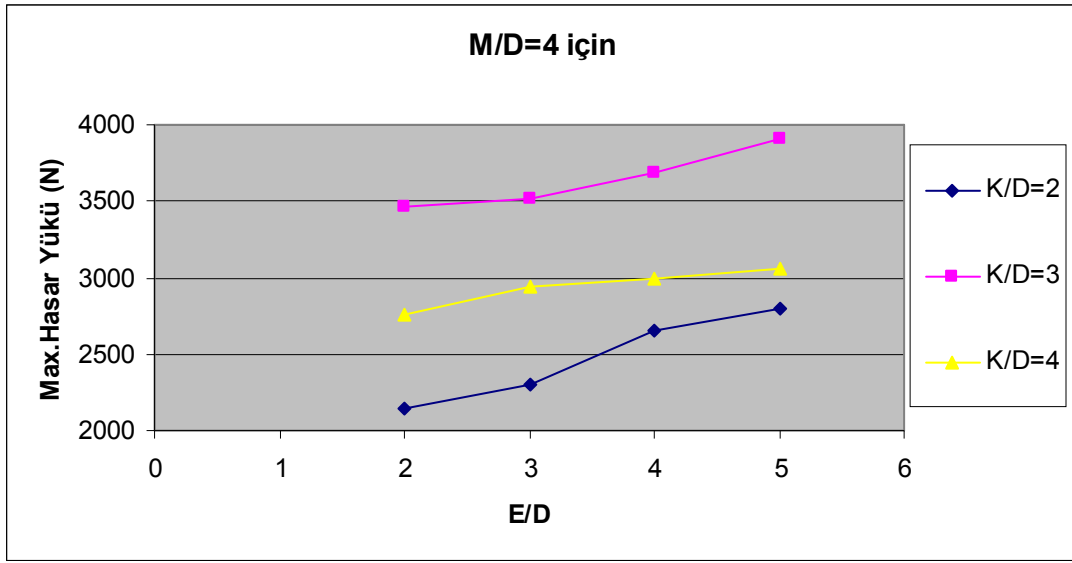
Şekil 3.185. M/D=2 için E/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.186' da M/D=3 olduğunda E/D' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken E/D=5 olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. K/D=2 olduğunda E/D=2, 5 için maksimum hasar yükü sırasıyla 2120 N, 2560 N elde edilmiştir. K/D=3 olduğunda E/D=2, 5 için sırasıyla 3420 N, 3735 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda E/D=2, 5 için ise sırasıyla 2800 N, 3000 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.



Şekil 3.186. M/D=3 için E/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.187’ de $M/D=4$ olduğunda E/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $E/D=5$ olduğunda maksimum düzeye ulaşmaktadır. $K/D=2$ olduğunda $E/D=2, 5$ için maksimum hasar yükü sırasıyla 2150 N, 2800 N elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $E/D=2, 5$ için sırasıyla 3465 N, 3905 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $E/D=2, 5$ için ise sırasıyla 2760 N, 3060 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmektedir.

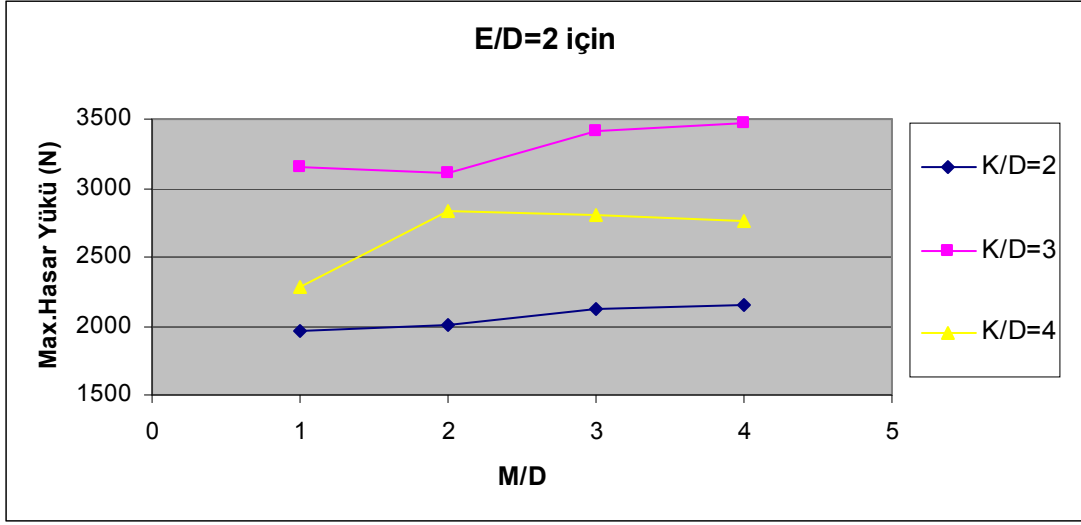


Şekil 3.187. $M/D=4$ için E/D oranının hasar yüküne etkisi

Her dört grafikteki sonuçlar aynı parametrelerdeki kuru numunelerin ANSYS sonuçları ile karşılaştırıldığında; 3 ay deniz suyuna konulan numunelerin ANSYS analiz sonuçlarından elde edilen maksimum hasar yüklerinin kuru numunelerin ANSYS sonuçlarına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

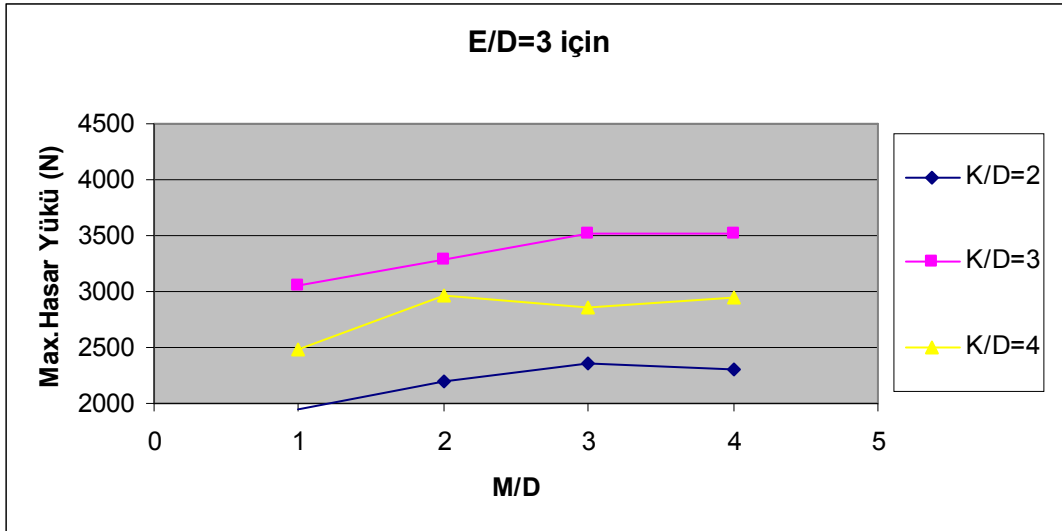
b) M/D oranının etkisi

Şekil 3.188’ de $E/D=2$ olduğunda M/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $K/D=2$ için $M/D=1, 4$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1960 N, 2150 N elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1, 4$ için sırasıyla hasar yükleri 3150 N, 3465 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1, 4$ için ise sırasıyla 2280 N, 2760 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.188. E/D=2 için M/D oranının hasar yüküne etkisi

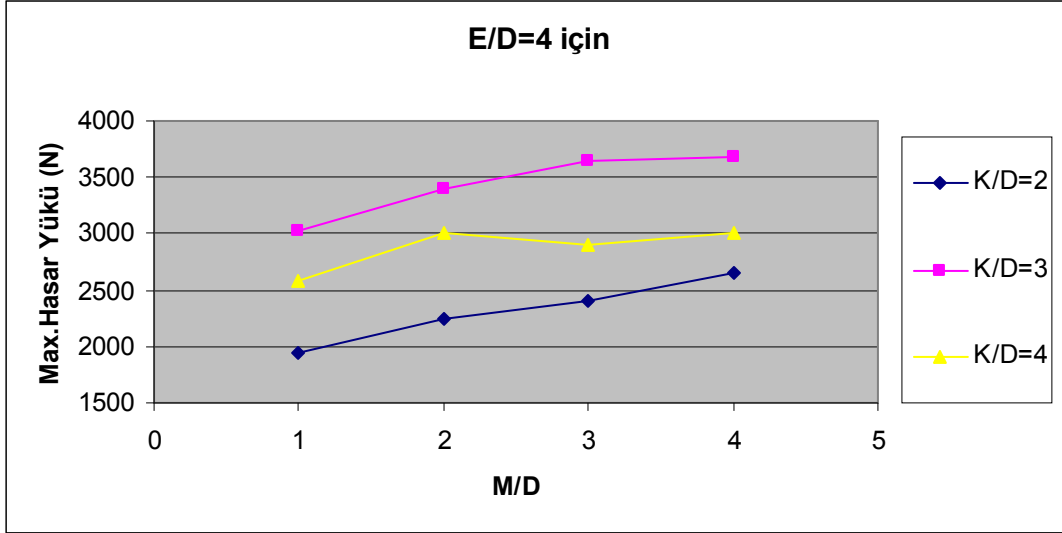
Şekil 3.189’ da E/D=3 olduğunda M/D’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için M/D=1, 4 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1940 N, 2300 N elde edilmiştir. K/D=3 olduğunda M/D=1, 4 için sırasıyla hasar yükleri 3050 N, 3520 N olarak elde edilmiştir. K/D=4 olduğunda M/D=1, 4 için ise sırasıyla 2490 N, 2940 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.189. E/D=3 için M/D oranının hasar yüküne etkisi

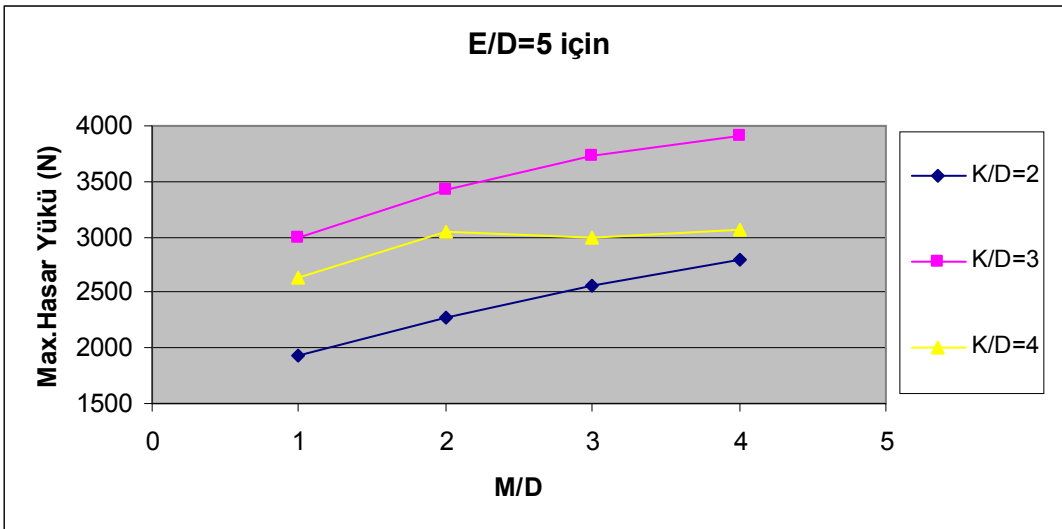
Şekil 3.190’ da E/D=4 olduğunda M/D’ nin değişimi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için M/D=1, 4 olduğunda maksimum hasar yükü

sırasıyla 1940 N, 2650 N elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1, 4$ için sırasıyla hasar yükleri 3025 N, 3685 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1, 4$ için ise sırasıyla 2580 N, 3000 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.190. E/D=4 için M/D oranının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.191' de $E/D=5$ olduğunda M/D ' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $K/D=2$ için $M/D=1, 4$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1940 N, 2800 N elde edilmiştir. $K/D=3$ olduğunda $M/D=1, 4$ için sırasıyla hasar yükleri 3000 N, 3905 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ olduğunda $M/D=1, 4$ için ise sırasıyla 2640 N, 3060 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir.

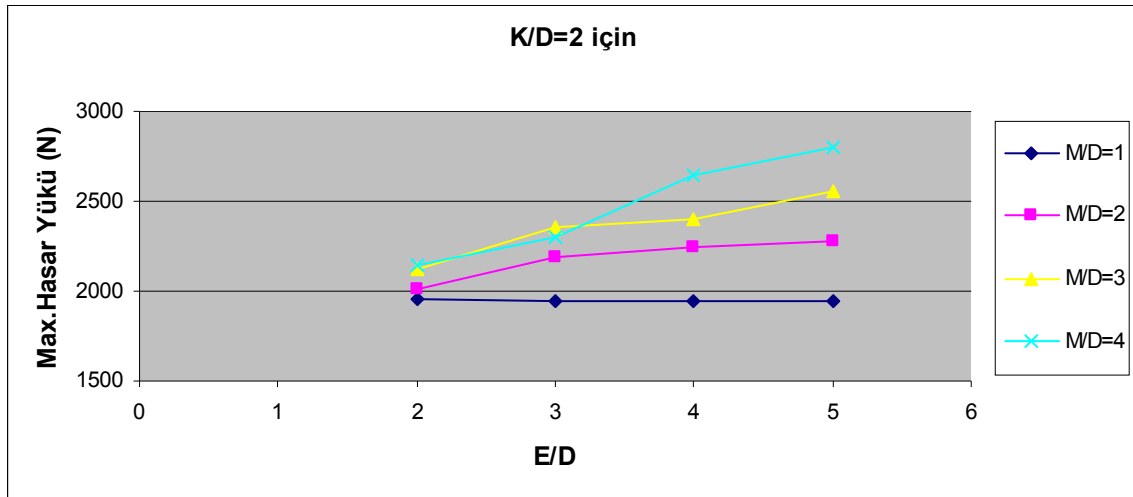


Şekil 3.191. E/D=5 için M/D oranının hasar yüküne etkisi

Her dört grafikteki sonuçlar incelendiğinde; aynı parametrelerdeki kuru numunelerin sayısal sonuçlarının, 3 ay deniz suyuna konulan numunelerin sayısal sonuçlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

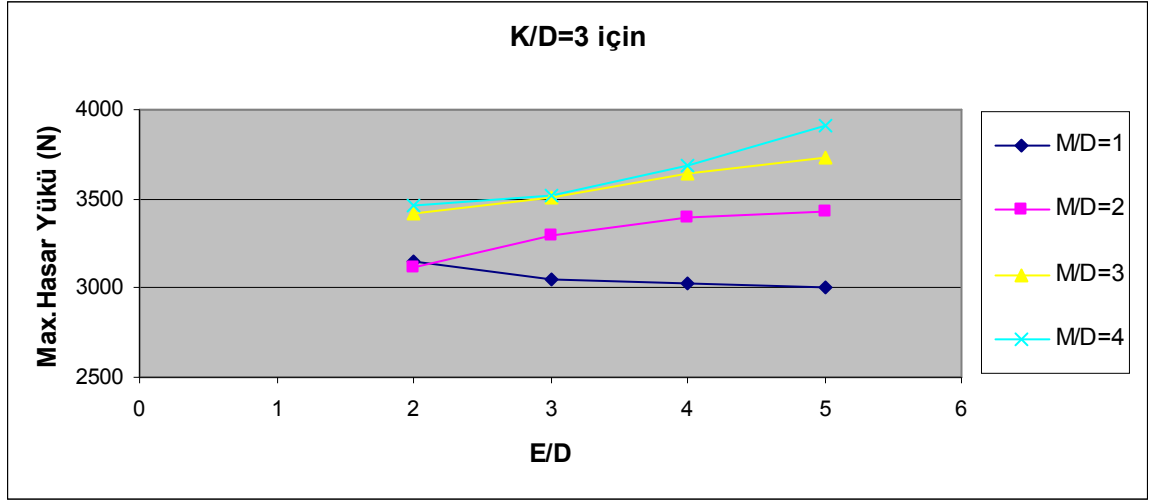
c) E/D, M/D, K/D oranları arasındaki ilişki ve hasar yüküne etkisi

Şekil 3.192’ de $K/D=2$ olduğunda E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 için E/D=2, 5 olduğunda hasar yükü sırasıyla 1960 N, 1940 N olarak elde edilmiştir. Bu durum için düşme olmasına rağmen aradaki fark oldukça küçüktür. M/D=2 için E/D=2, 5 için maksimum hasar yükü sırasıyla 2010 N, 2280 N olarak elde edilirken, M/D=3 için E/D=2, 5 için maksimum hasar yükü ise sırasıyla 2120 N, 2560 N olarak elde edilmiştir. Benzer artış M/D=4 için de gerçekleşmiştir.



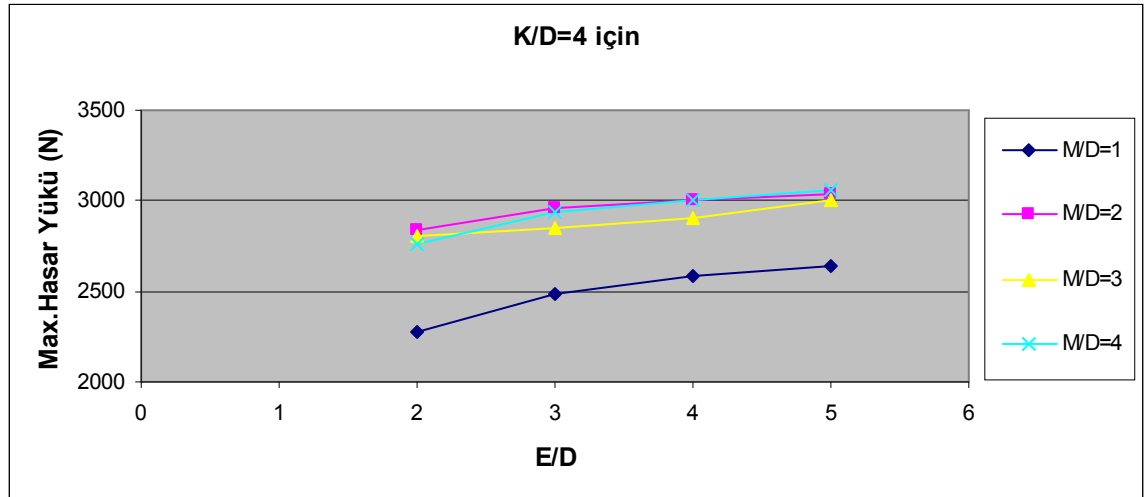
Şekil 3.192. K/D=2 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.193’ te $K/D=3$ olduğunda E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 için E/D=2, 5 olduğunda hasar yükü sırasıyla 3150 N, 3000 N olarak elde edilmiştir. Bu durum için düşme olmasına rağmen aradaki fark oldukça küçüktür. M/D=2 için E/D=2, 5 için maksimum hasar yükü sırasıyla 3115 N, 3430 N olarak elde edilirken, M/D=3 için E/D=2, 5 için maksimum hasar yükü ise sırasıyla 3420 N, 3735 N olarak elde edilmiştir. Benzer artış M/D=4 içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.193. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.194' te K/D=4 olduğunda E/D ve M/D' ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 ve E/D=2 olduğunda hasar yükü minimum değerde iken M/D oranı 4 ve E/D=5 olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. M/D=1 için E/D=2, 5 olduğunda hasar yükü sırasıyla 2280 N, 2640 N olarak elde edilmiştir. Bu durum için düşme olmasına rağmen aradaki fark oldukça küçüktür. M/D=2 için E/D=2, 5 için maksimum hasar yükü sırasıyla 2840 N, 3040 N olarak elde edilirken, M/D=3 için E/D=2, 5 için maksimum hasar yükü ise sırasıyla 2800 N, 3000 N olarak elde edilmiştir. Benzer artış M/D=4 içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.194. K/D=4 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

Grafikteki sonuçlara bakıldığı zaman K/D=2, 3, 4 oranları için E/D ve M/D oranlarının artması ile hasar yüklerinin arttığı görülmüştür. Ancak aynı parametrelerdeki

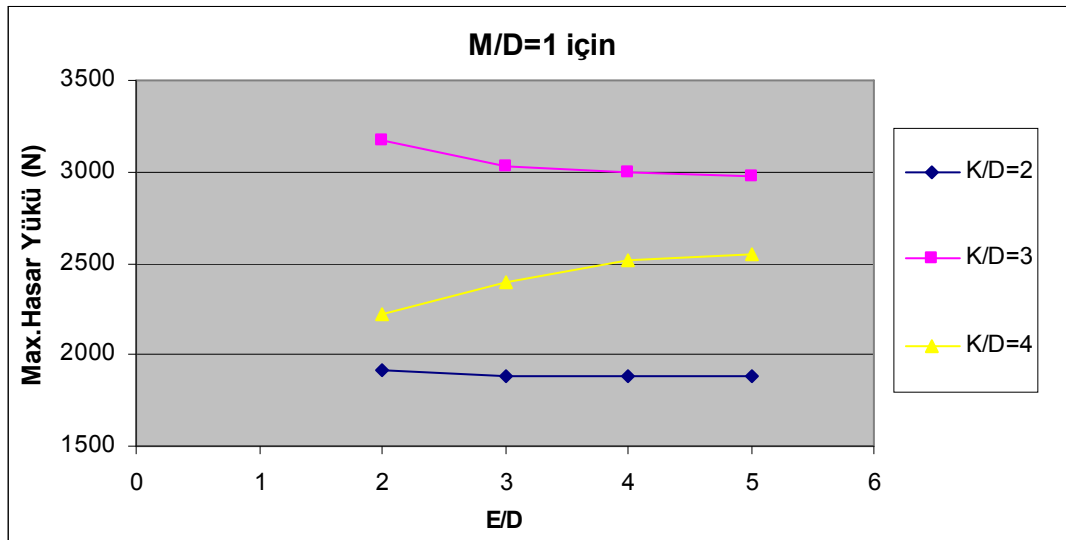
kuru numunelerin ANSYS sonuçları ile karşılaştırıldığında; 3 ay deniz suyuna konulan numunelerin ANSYS sonuçlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

3.2.5.3. Sayısal sonuçlarda deniz suyunda 6 ay bekletilen numuneler üzerinde geometrik parametrelerin etkisi

6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numunelerin deney sonrası elde edilen mekanik özellikler programda yerine yerleştirilerek, sayısal çözümleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar arasında M/D, K/D, E/D oranlarının malzemenin hasar yüküne etkisi aşağıdaki grafiklerde karşılaştırılarak verilmiştir.

a) E/D oranının etkisi

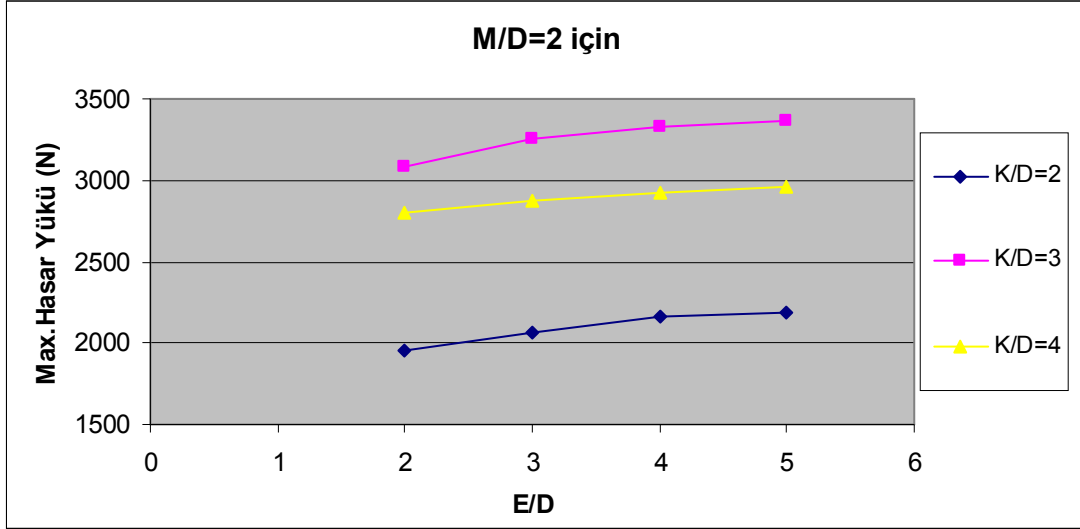
Şekil 3.195’ te M/D=1 olduğunda E/D’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için E/D=2, 5 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1920 N, 1880 N değerinde elde edilmiştir. K/D=3 için de E/D=2, 5 olduğunda 3175 N, 2975 N olarak elde edilmiştir. Her iki durumdaki düşüş arasında fark oldukça azdır. K/D=4 olduğunda E/D=2, 5 için maksimum hasar yükleri sırasıyla 2220 N, 2550 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.195. M/D=1 için E/D oranının etkisi

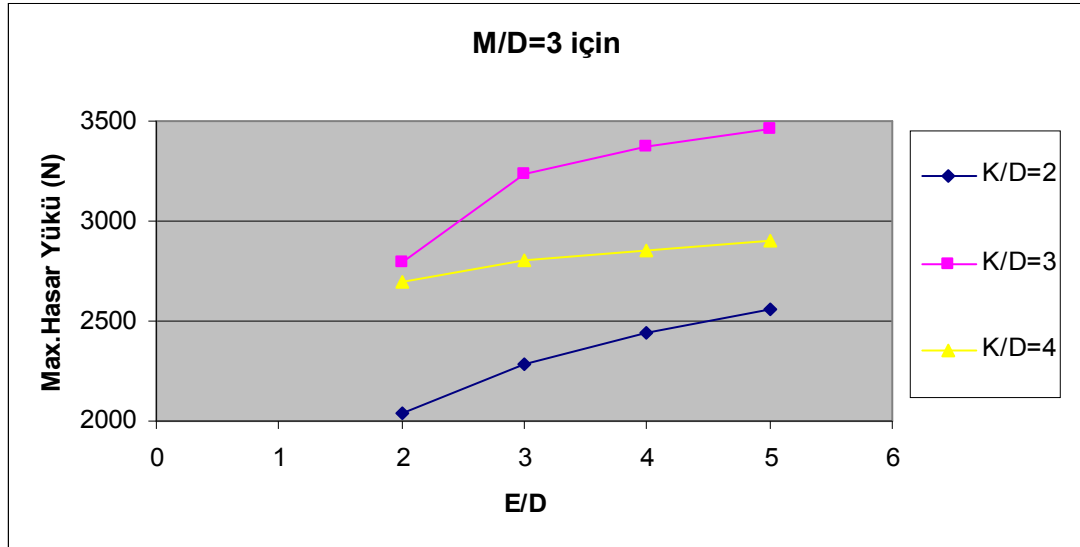
Şekil 3.196’ da M/D=2 olduğunda E/D’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için E/D=2, 5

olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1950 N, 2190 N değerinde elde edilmiştir. $K/D=3$ için de $E/D=2, 5$ olduğunda 3080 N, 3360 N olarak elde edilmiştir. Benzer artış $K/D=4$ içinde gerçekleşmiştir.



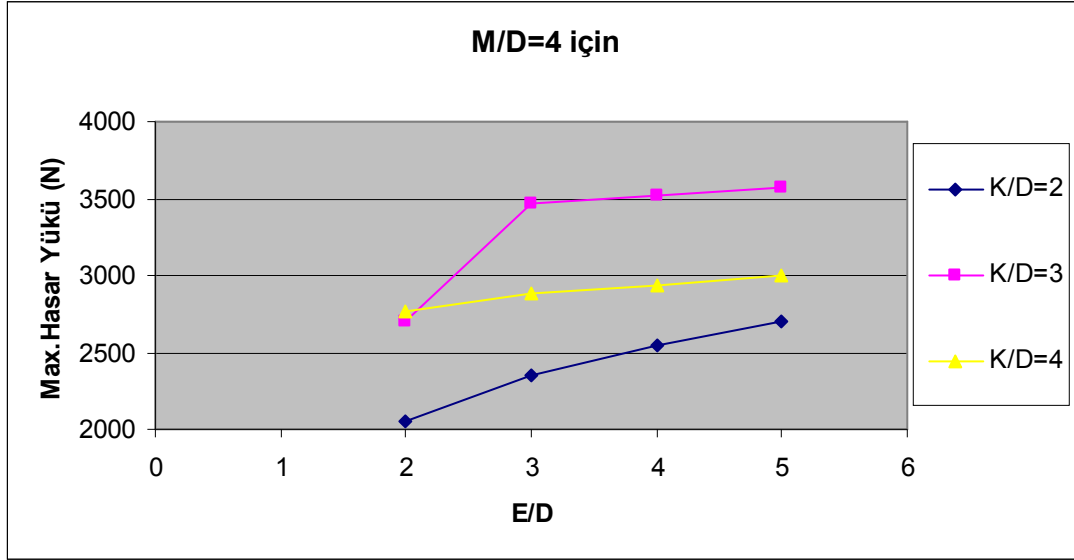
Şekil 3.196. M/D=2 için E/D oranının etkisi

Şekil 3.197' de $M/D=3$ olduğunda E/D ' nin hasar yükü üzerindeki etkisi değişimi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $K/D=2$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 2040 N, 2560 N değerinde elde edilmiştir. $K/D=3$ için de $E/D=2, 5$ olduğunda 2790 N, 3465 N olarak elde edilmiştir. Benzer artış $K/D=4$ içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.197. M/D=3 için E/D oranının etkisi

Şekil 3.198’ de $M/D=4$ olduğunda E/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $K/D=2$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 2050 N, 2700 N değerinde elde edilmiştir. $K/D=3$ için de $E/D=2, 5$ olduğunda 2695 N, 3575 N olarak elde edilmiştir. Benzer artış $K/D=4$ içinde gerçekleşmiştir.

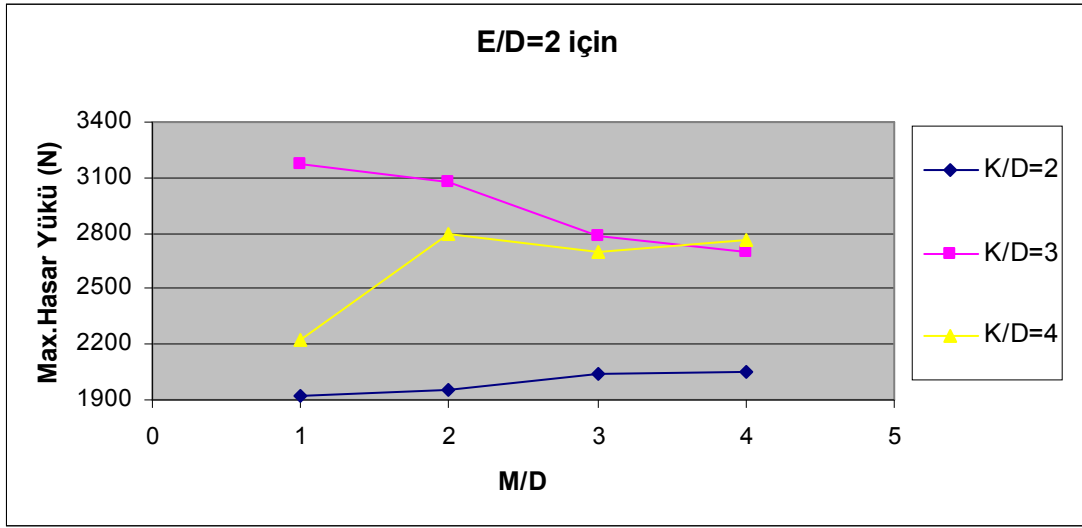


Şekil 3.198. $M/D=4$ için E/D oranının etkisi

E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı grafiklerden de görülmekte olup, 6 ay deniz suyuna konulan numunelerin sayısal analiz sonucu elde edilen değerlerin, kuru ve 3 ay süre ile deniz suyu içerisine konulan numunelerin sayısal analizinden elde edilen değerlerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

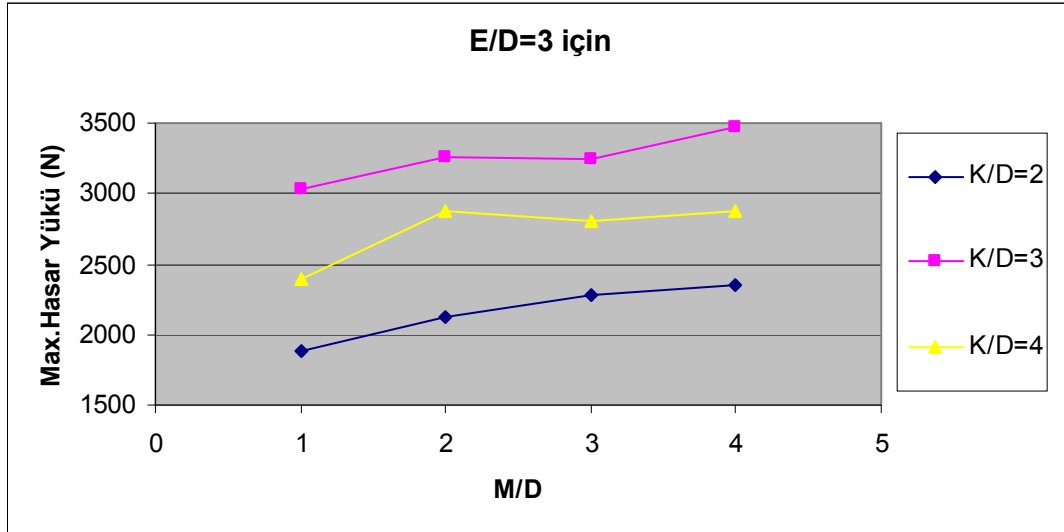
b) M/D oranının etkisi

Şekil 3.199’ da $E/D=2$ olduğunda M/D ’ nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $K/D=2$ için $M/D=1, 4$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1920 N, 2050 N olarak elde edilmiştir. $K/D=3$ için $M/D=1, 4$ olduğunda hasar yükleri sırasıyla 3175 N, 2695 N olarak elde edilmiştir. $K/D=4$ için $M/D=1, 4$ olduğunda ise sırasıyla 2220 N, 2760 N maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi $K/D=3, 4$ oranlarında düzenli bir artış olmayıp, $M/D=3$ de düşme oluşmuştur.



Şekil 3.199. E/D=2 için M/D oranının etkisi

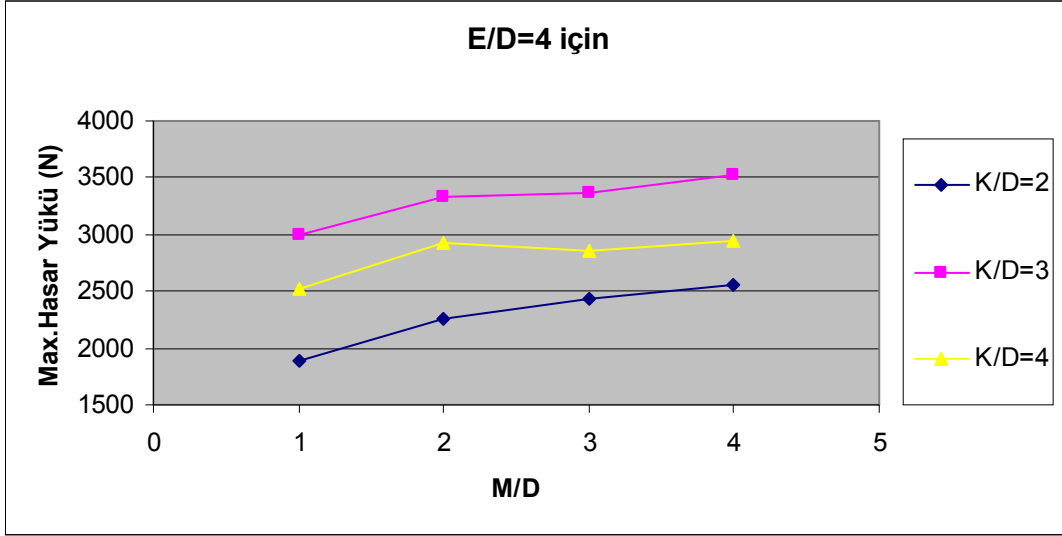
Şekil 3.200' de E/D=3 olduğunda M/D' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için M/D=1, 4 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1880 N, 2350 N değerlerinde elde edilmiştir. K/D=3 için M/D=1, 4 olduğunda sırasıyla 3025 N, 3465 N hasar yükü elde edilmiştir. K/D=4 için M/D=1, 4 olduğunda ise sırasıyla 2400 N, 2880 N değerlerinde maksimum hasar yükleri elde edilmiştir.



Şekil 3.200. E/D=3 için M/D oranının etkisi

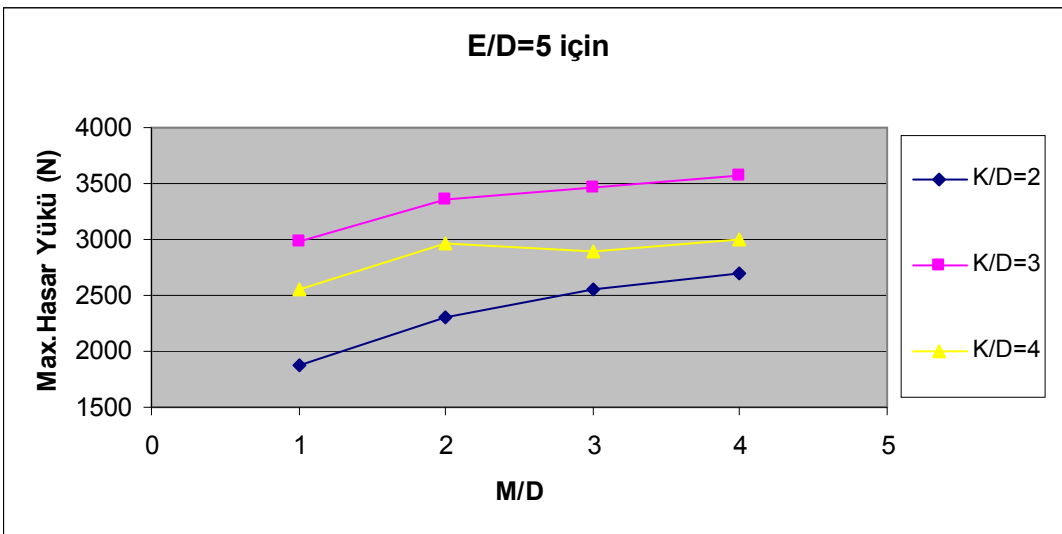
Şekil 3.201' de E/D=4 olduğunda M/D' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için M/D=1, 4 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1880 N, 2550 N değerlerinde elde edilmiştir.

K/D=3 için M/D=1, 4 olduğunda sırasıyla 3000 N, 3520 N hasar yükü elde edilmiştir. K/D=4 için M/D=1, 4 olduğunda ise sırasıyla 2520 N, 2940 N değerlerinde maksimum hasar yükleri elde edilmiştir.



Şekil 3.201. E/D=4 için M/D oranının etkisi

Şekil 3.202' de E/D=5 için M/D' nin hasar yükü üzerindeki etkisi incelenmiştir. K/D oranları sırasıyla 2, 3, 4 olarak alınmıştır. K/D=2 için M/D=1, 4 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1880 N, 2700 N değerlerinde elde edilmiştir. K/D=3 için M/D=1, 4 olduğunda sırasıyla 2975 N, 3575 N hasar yükü elde edilmiştir. K/D=4 için M/D=1, 4 olduğunda ise sırasıyla 2550 N, 3000 N değerlerinde maksimum hasar yükleri elde edilmiştir.

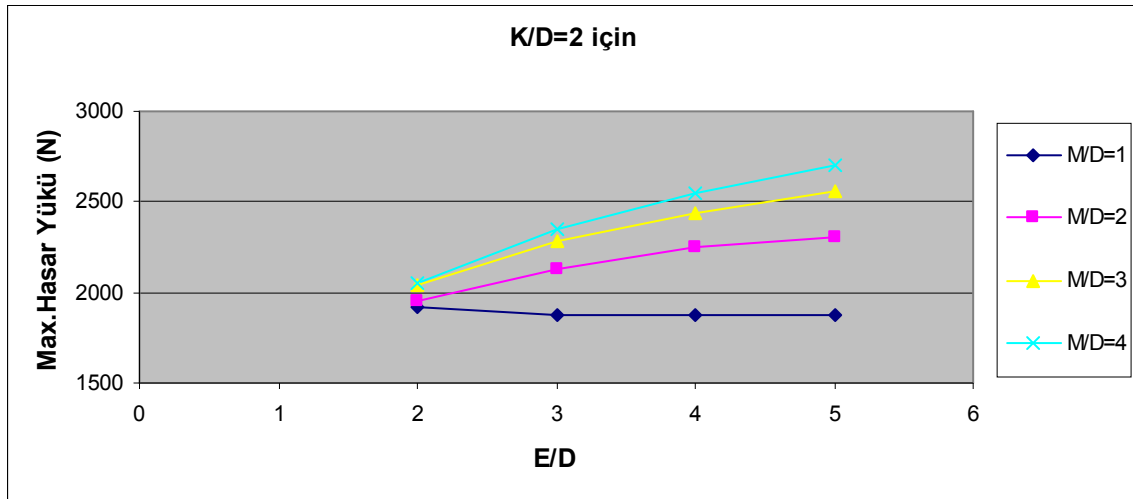


Şekil 3.202. E/D=5 için M/D oranının etkisi

Grafiklerde görüldüğü gibi $M/D=3$ olduğunda bazı durumlarda düşme meydana gelmiş ise de aradaki fark oldukça azdır.

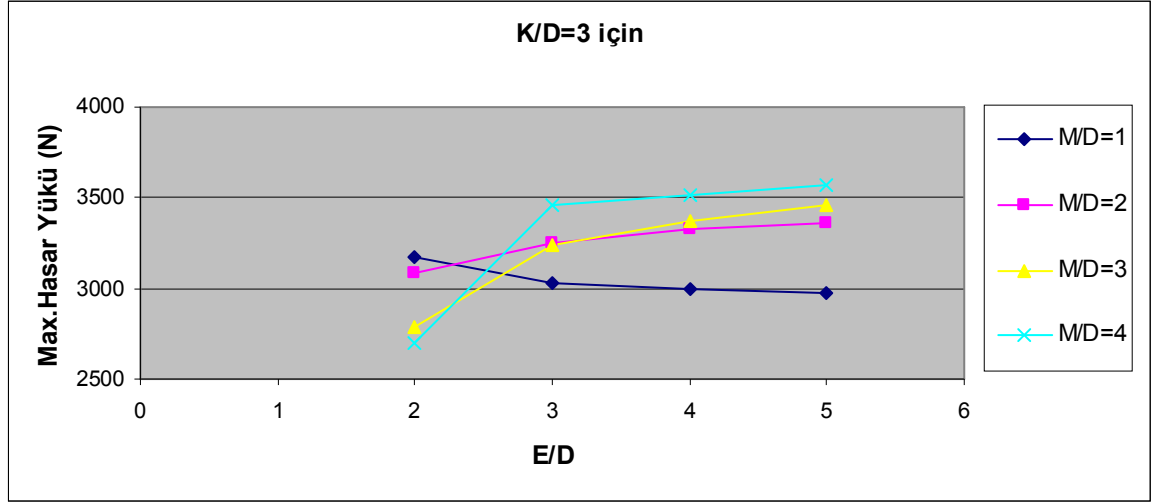
c) E/D, M/D, K/D oranları arasındaki ilişki ve hasar yüküne etkisi

Şekil 3.203' te $K/D=2$ olduğunda E/D ve M/D' ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ ve $E/D=2$ olduğunda hasar yükü minimum değerde iken $M/D=4$ ve $E/D=5$ olduğunda ise maksimum düzeye ulaşmaktadır. $M/D=1$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1920 N, 1880 N olarak elde edilmiştir. Buradaki düşme olmasına rağmen aradaki fark oldukça düşüktür. $M/D=2$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 1950 N, 2310 N değerinde elde edilmiştir. Benzer artışlar $M/D=3, 4$ içinde gerçekleşmiştir.



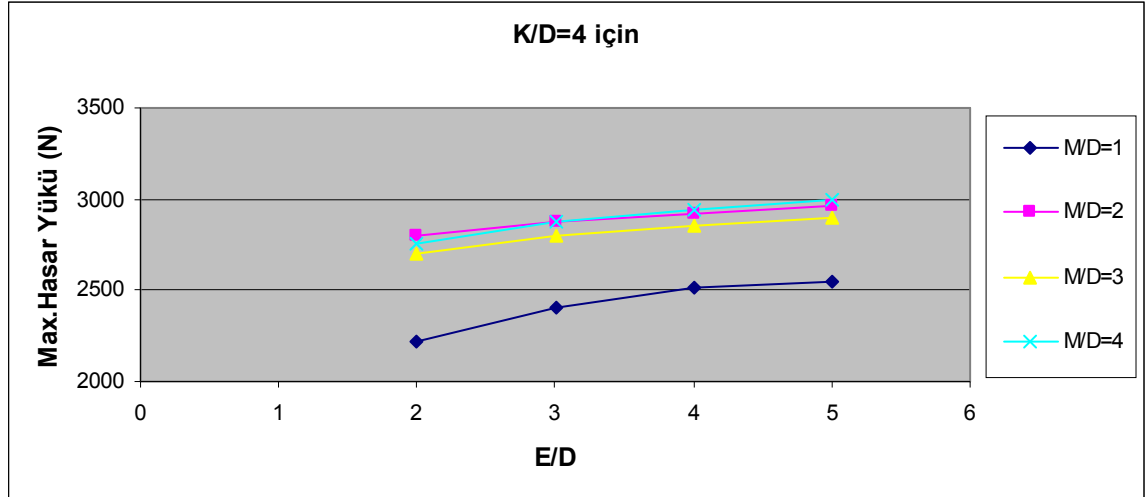
Şekil 3.203. $K/D=2$ için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.204' te $K/D=3$ olduğunda E/D ve M/D' ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. $M/D=1$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 3175 N, 2975 N olarak elde edilmiştir. Buradaki düşme olmasına rağmen aradaki fark oldukça düşüktür. $M/D=2$ için $E/D=2, 5$ olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 3080 N, 3360 N değerinde elde edilmiştir. Benzer artışlar $M/D=3, 4$ içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.204. K/D=3 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

Şekil 3.205’ te K/D=4 olduğunda E/D ve M/D’ ye bağlı olarak elde edilen hasar yükleri verilmiştir. M/D oranları sırasıyla 1, 2, 3, 4 olarak alınmıştır. M/D=1 için E/D=2, 5 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 2220 N, 2550 N olarak elde edilmiştir. M/D=2 için E/D=2, 5 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 2800 N, 2960 N değerinde elde edilmiştir. Aynı şekilde M/D=3 için E/D=2, 5 olduğunda maksimum hasar yükü sırasıyla 2700 N, 2900 N değerinde elde edilmiştir. Benzer artış M/D=4 içinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.205. K/D=4 için E/D ve M/D oranlarının hasar yüküne etkisi

3.3. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

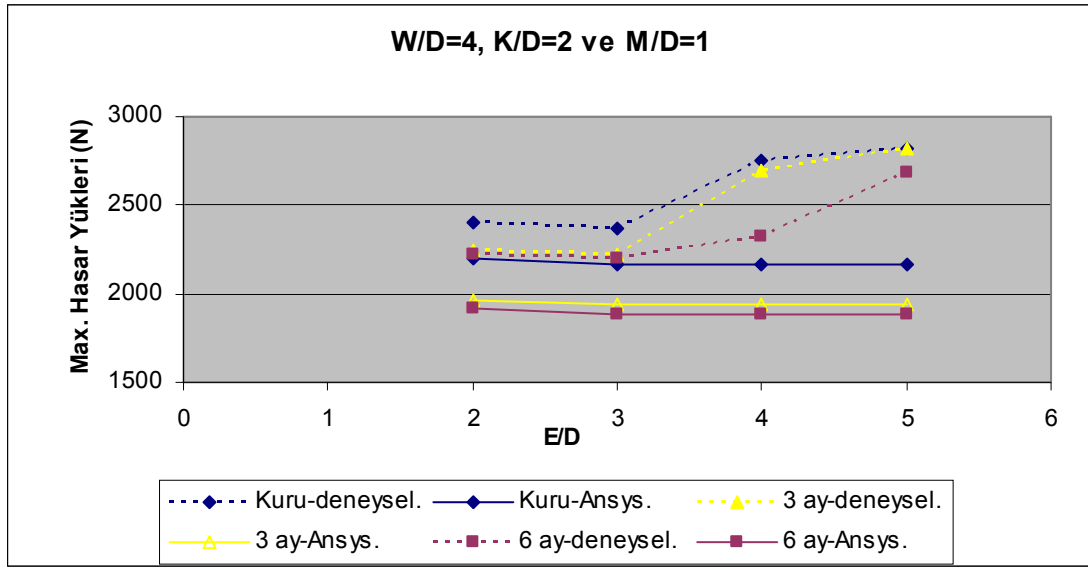
Bu kısımda deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılarak, sonuçlar irdelenmiştir.

3.3.1. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Belirlenen geometrik boyutlarda hazırlanan numuneler kuru halde, 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyu içerisinde bekledikten sonra (her aşamadan sonra), maksimum hasar yükünü ve hasar tipini belirlemek için çekme testine tabi tutulmuşlardır.

Deneysel olarak elde edilen hasar yükleri, aynı zamanda sayısal olarak elde edilen ilerlemeli hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin sonlu eleman modeli ANSYS 11.0 kullanılarak geliştirilmiştir. ANSYS 11.0 programında ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman yönteminde hasar kriteri olarak, Tsai-Wu hasar kriteri seçilmiştir. Geliştirilen bu sayısal çalışmada hasar yükleri ve hasar tipleri tespit edilmiştir. Elde edilen hasar yükleri ve hasar tipleri deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma kuru, 3 ay deniz ve 6 ay deniz suyunda bekletilen her üç aşamadaki tüm numuneler için yapılmıştır.

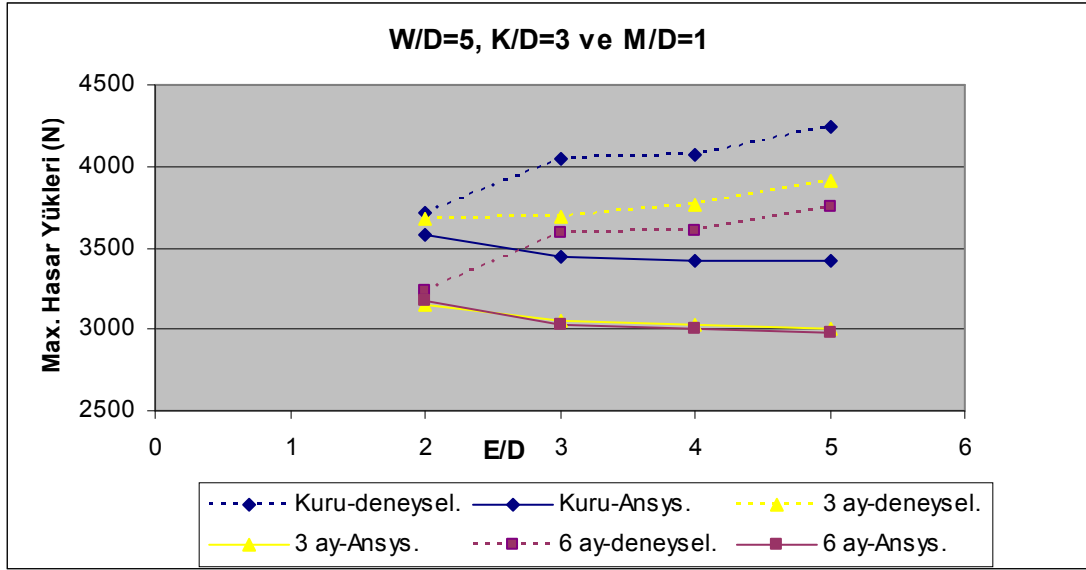
Şekil 3.206, Şekil 3.207, Şekil 3.208, Şekil 3.209, Şekil 3.210' da kuru, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin çekme testi sonrası elde edilen maksimum hasar yükü ile sayısal çalışma sonucu elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılmasının grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.206. W=20 mm, K=10 mm ve M=5 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.206’ da görüldüğü gibi kuru haldeki numunelerde deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yükleri, hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerden elde edilen hasar yükünden yüksektir. Deneysel çalışmada; E=10 mm için kuru halde 2397 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunede 2247 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 2222 N hasar yükü elde edilmiştir. E=25 mm için kuru halde 2825 N, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunede 2815 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 2688 N hasar yükü elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10 mm için kuru halde 2200 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilende 1960 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 1920 N hasar yükü elde edilmiştir. E=25 mm için kuru halde 2160 N, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunede 1940 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 1880 N hasar yükü elde edilmiştir. Numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=5 için %23.53 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=2 için %8.2 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=5 için %31.03 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=2 için %12.77 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=5 için %30.05 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D= 2 için %13.59 olarak elde edilmiştir.

E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı grafik ve sayısal sonuçlardan da görülmektedir.

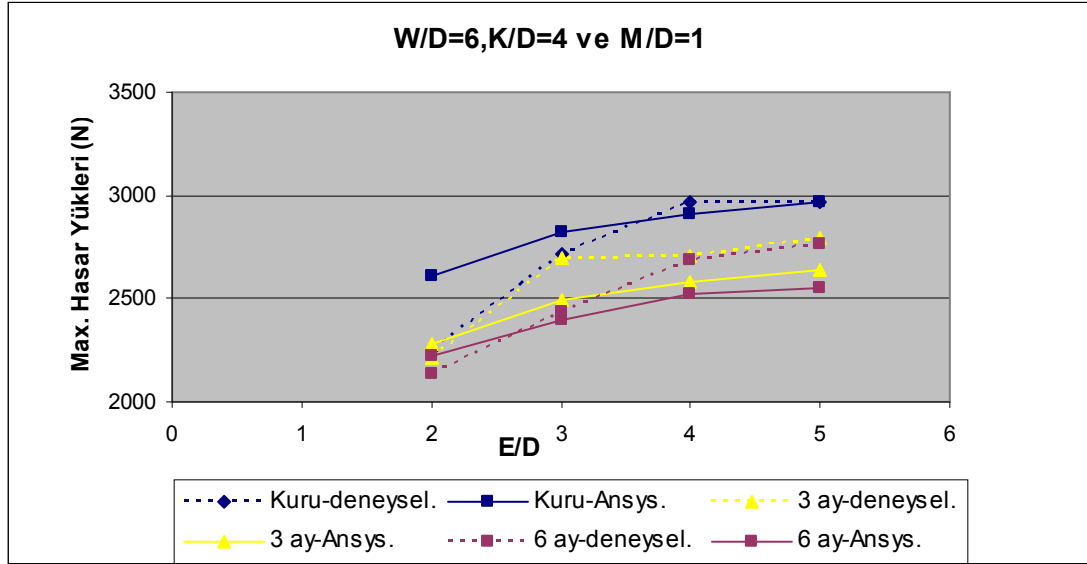


Şekil 3.207. W=25 mm, K=15 mm ve M=5 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.207' de görüldüğü gibi kuru haldeki numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay süre ile deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10 mm için kuru halde 3718 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunede 3682 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 3231 N hasar yükü elde edilmiştir. E=25 mm için kuru halde 4244 N, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunede 3914 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 3757 N hasar yükü elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10 mm için kuru halde 3575 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilende 3150 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 3175 N hasar yükü elde edilmiştir. E=25 mm için kuru halde 3425 N, 3 ay deniz suyunda bekletilende 3000 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 2975 N hasar yükü elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=5 için %19.29 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=2 için %3.8 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=5 için %23.35 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=2 için %14.44 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en

uzak sonuç $E/D=5$ için %20.81 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=2$ için %1.73 olarak elde edilmiştir.

E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.

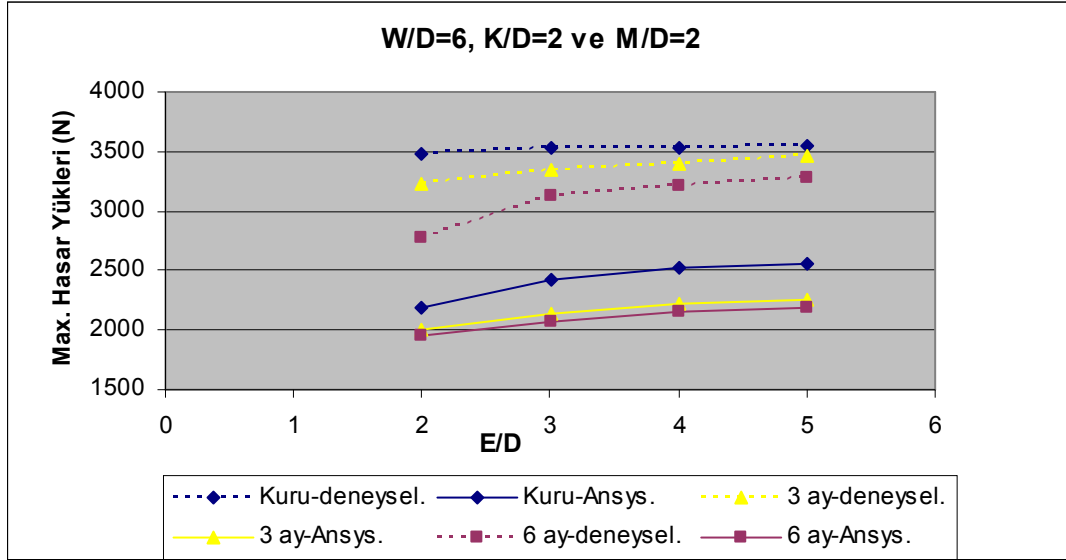


Şekil 3.208. $W=30$ mm, $K=20$ mm ve $M=5$ mm boyutlarındaki numuneler için deneyel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.208’ de görüldüğü gibi kuru numunelerin deneyel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar $E/D=2$ oranında minimum, $E/D=5$ oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneyel çalışmada; $E=10$, 25 mm için sırasıyla kuru halde 2247 N, 2972 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2217 N, 2796 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 2139 N, 2766 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise $E=10$, 25 mm için sırasıyla kuru halde 2610 N, 2970 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2280 N, 2640 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2220 N, 2550 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneyel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç $E/D=2$ için %16.15 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=5$ için %0.06 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç $E/D=3$ için %7.70 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=2$ için %2.84 olarak elde

edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç $E/D=5$ için %7.81 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=3$ için %1.6 olarak elde edilmiştir.

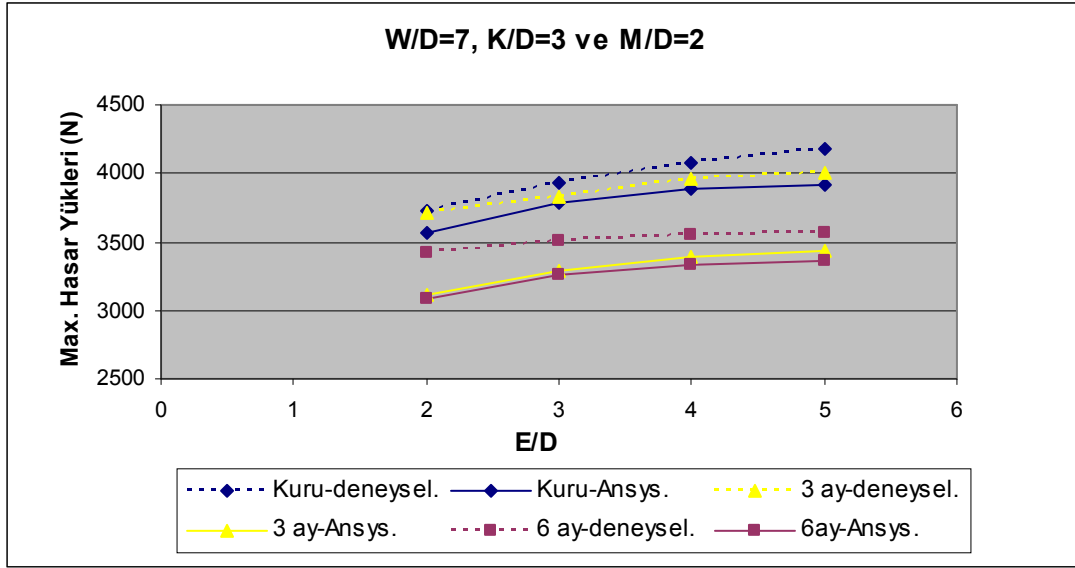
E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.209. $W=30$ mm, $K=10$ mm ve $M=10$ mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.209' da görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar $E/D=2$ oranında minimum, $E/D=5$ oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; $E=10, 25$ mm için sırasıyla kuru halde 3478 N, 3541 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 3231 N, 3463 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2770 N, 3277 N' luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise $E=10, 25$ mm için sırasıyla kuru halde 2190 N, 2550 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2010 N, 2250 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 1950 N, 2190 N' luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında kuru numunelerde en uzak sonuç $E/D=2$ için %37.03 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=5$ için %27.98 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç $E/D=2$ için %37.79 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=4$ için %34.78 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç $E/D=5$ için %33.17 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=2$ için %29.60 olarak elde edilmiştir.

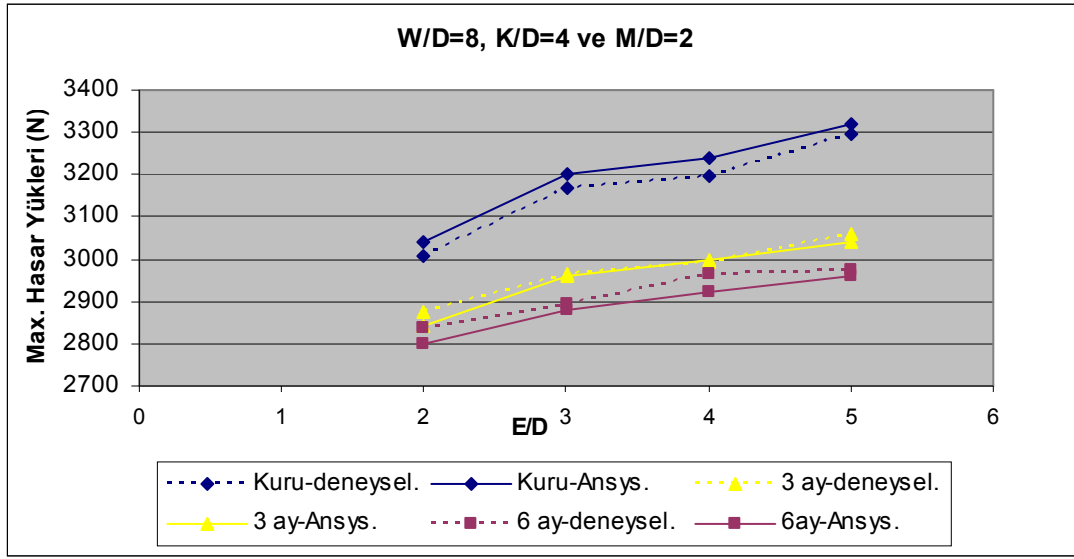
E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.210. W=35 mm, K=15 mm ve M=10 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.210’ da görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3721 N, 4179 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 3708 N, 4002 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 3414 N, 3571 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3570 N, 3920 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 3115 N, 3430 N, 6 ay deniz suyunda bekletilende ise 3080 N, 3360 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=5 için %6.19 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=2 için %4.05 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %15.99 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3 için %14.00 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %9.78 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %5.90 olarak elde edilmiştir.

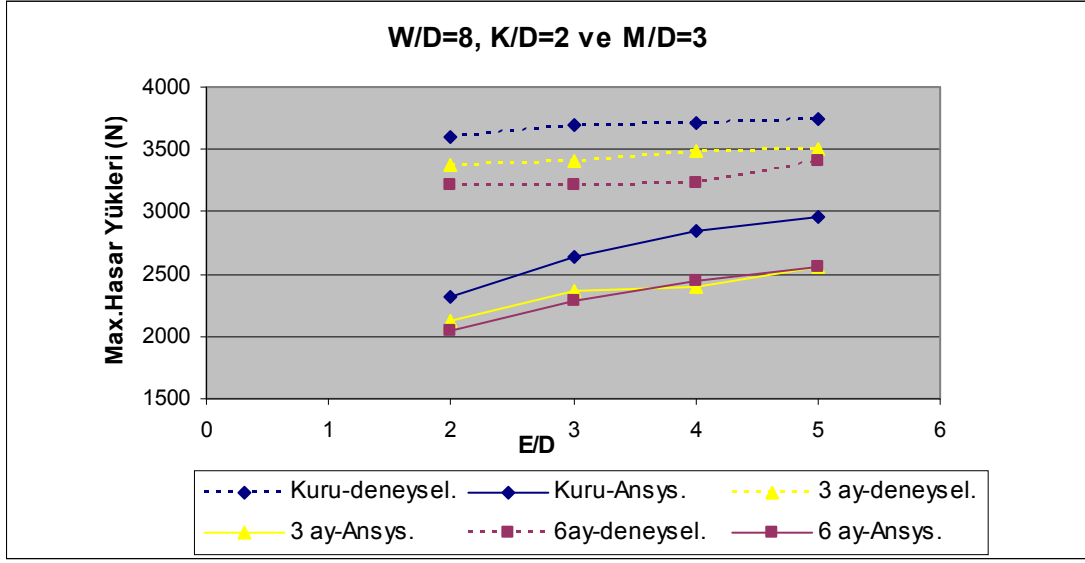
E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.211. W=40 mm, K=20 mm ve M=10 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.211’ de görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3009 N, 3296 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2875 N, 3061 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2838 N, 2975 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3040 N, 3320 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2840 N, 3040 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2800 N, 2960 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=4 için %1.31 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.73 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %1.22 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3 için %0.10 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=4 için %1.45 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3 için %0.48 olarak elde edilmiştir.

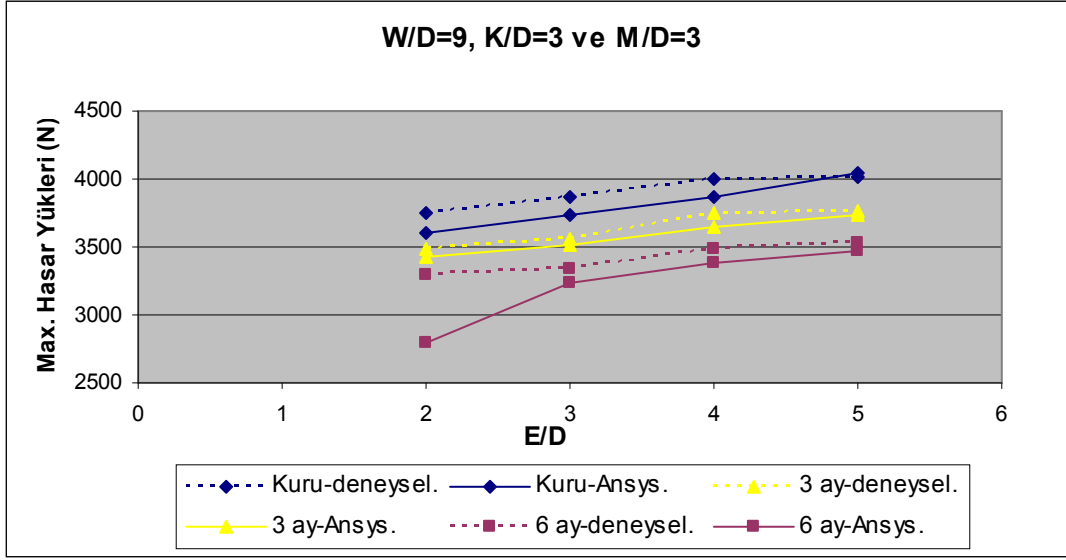
E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.212. W=40 mm, K=10 mm ve M=15 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.212’ de görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3597 N, 3747 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 3381 N, 3508 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 3208 N, 3414 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 2320 N, 2960 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2120 N, 2560 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2040 N, 2560 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=2 için % 35.50 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %21.00 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %37.30 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %27.02 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %36.41 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=4 için %24.62 olarak elde edilmiştir.

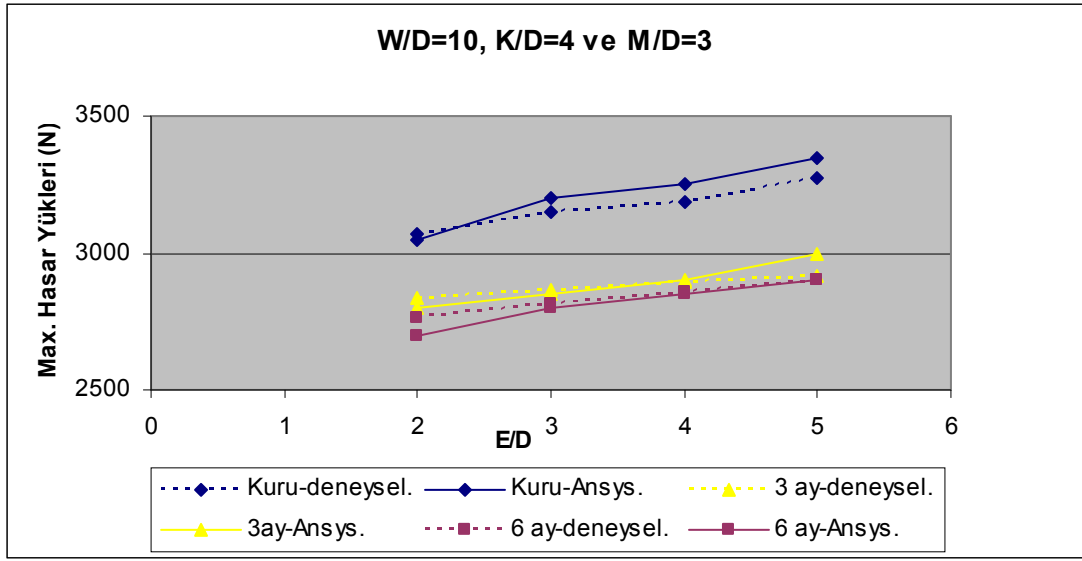
E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.213. W=45 mm, K=15 mm ve M=15 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.213' te görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3747 N, 4022 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 3489 N, 3762 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 3296 N, 3532 N' luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3600 N, 4050 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 3420 N, 3735 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2790 N, 3465 N' luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=2 için %3.92 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.7 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=4 için %2.83 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.72 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %15.35 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %1.90 olarak elde edilmiştir.

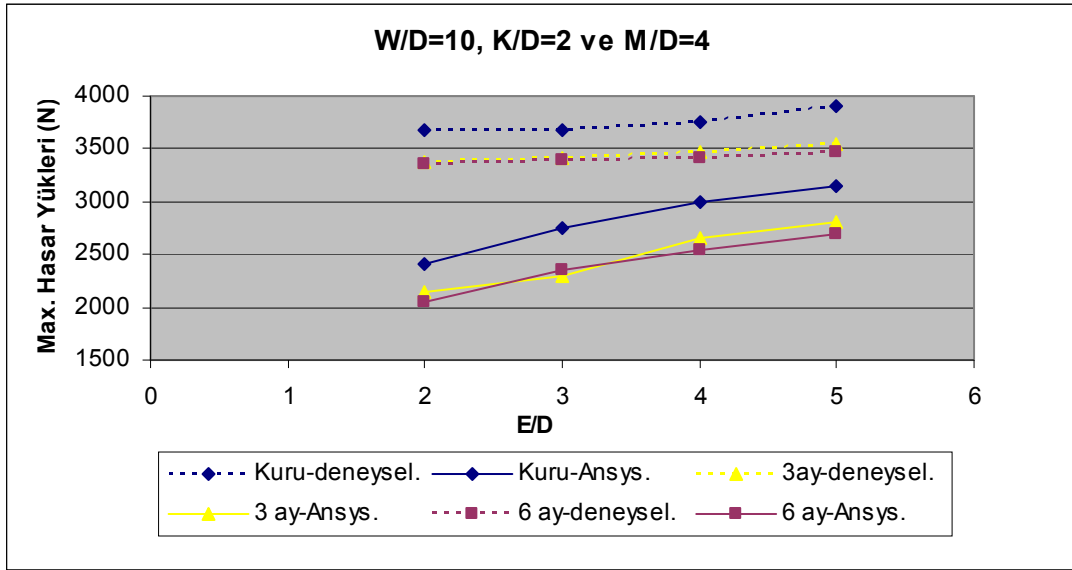
E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.214. W=50 mm, K=20 mm ve M=15 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

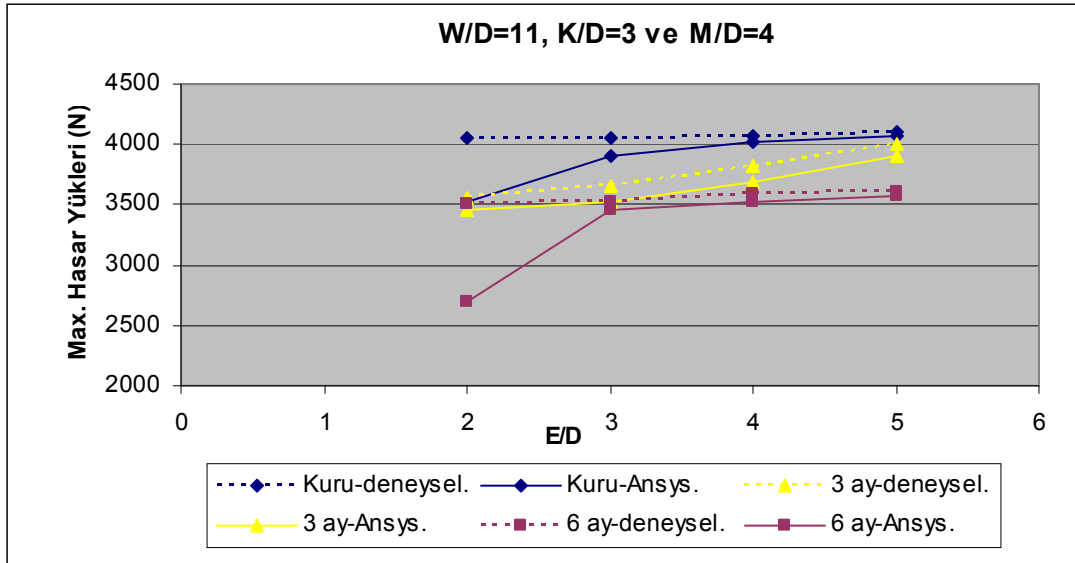
Şekil 3.214' te görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3071 N, 3277 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2835 N, 2914 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2766 N, 2904 N' luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3050 N, 3350 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2800 N, 3000 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2700 N, 2900 N' luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=5 için %2.23 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=2 için %0.68 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=5 için %2.95 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=4 için %0.21 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %2.39 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.14 olarak elde edilmiştir.

E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.215. W=50 mm, K=10 mm ve M=20 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

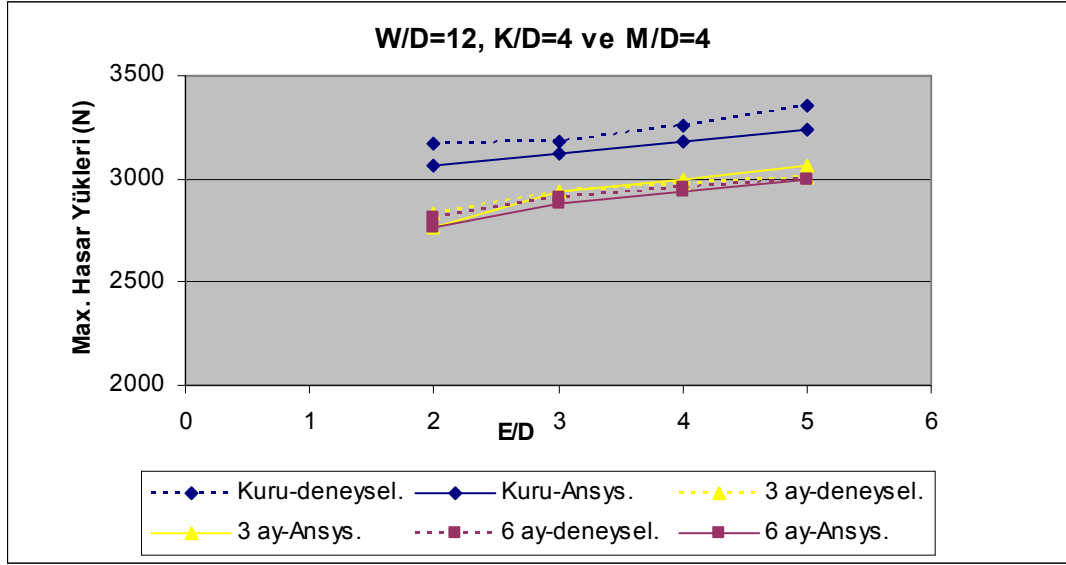
Şekil 3.215’ te görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3669 N, 3904 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 3375 N, 3541 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 3352 N, 3472 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 2400 N, 3150 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2150 N, 2800 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2050 N, 2700 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=2 için %34.59 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %19.31 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %36.30 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %20.91 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=5 için %38.84 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %22.24 olarak elde edilmiştir. E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.216. W=55 mm, K=15 mm ve M=20 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.216’ da görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 4048 N, 4101 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden 3552 N, 4002 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerden ise 3508 N, 3600 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3520 N, 4070 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden 3465 N, 3905 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2695 N, 3575 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşımlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=2 için %13.04 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.76 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=3 için %3.80 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %2.42 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %23.18 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.69 olarak elde edilmiştir.

E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.217. W= 60 mm, K=20 mm ve M=20 mm boyutlarındaki numuneler için deneysel ve sayısal olarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.217’ de görüldüğü gibi kuru numunelerin deneysel ve sayısal analizi sonucu elde edilen hasar yüklerinin hem 3 ay hem de 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerden elde edilen hasar yüklerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar E/D=2 oranında minimum, E/D=5 oranında maksimum olarak elde edilmişlerdir. Deneysel çalışmada; E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3169 N, 3355 N hasar yükleri elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2835 N, 3005 N, 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde ise 2815 N, 2992 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Sayısal analiz çalışmasında ise E=10, 25 mm için sırasıyla kuru halde 3060 N, 3240 N hasar yükü elde edilirken, 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde 2760 N, 3060 N, 6 ay deniz suyunda bekletilenlerde ise 2760 N, 3000 N’ luk hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçların bu parametre için birbirlerine yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru numunelerde en uzak sonuç E/D=2 için %3.44 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3 için %1.86 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %2.65 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3 için %0.10 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyu uygulamasında en uzak sonuç E/D=2 için %1.95 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.27 olarak elde edilmiştir.

E/D oranının artması ile hasar yüklerinin arttığı ancak numunelerin deniz suyunda kalma süreleri arttıkça hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir.

Tablo 3.9. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen hasar yükleri

Geometrik parametreler		Kuru haldeki numune		3 ay deniz suyunda bekletilen numune		6 ay deniz suyunda bekletilen numune	
		Deney sonucu	Tsai-Wu	Deney sonucu	Tsai-Wu	Deney sonucu	Tsai-Wu
W/D=4 K/D=2 M/D=1	E/D=2	2397	2200	2247	1960	2222	1920
	E/D=3	2371	2160	2227	1940	2197	1880
	E/D=4	2747	2160	2693	1940	2328	1880
	E/D=5	2825	2160	2815	1940	2688	1880
W/D=5 K/D=3 M/D=1	E/D=2	3718	3575	3682	3150	3231	3175
	E/D=3	4052	3450	3689	3050	3590	3025
	E/D=4	4067	3425	3762	3025	3610	3000
	E/D=5	4244	3425	3914	3000	3757	2975
W/D=6 K/D=4 M/D=1	E/D=2	2247	2610	2217	2280	2139	2220
	E/D=3	2717	2820	2698	2490	2439	2400
	E/D=4	2969	2910	2711	2580	2688	2520
	E/D=5	2972	2970	2796	2640	2766	2550
W/D=6 K/D=2 M/D=2	E/D=2	3478	2190	3231	2010	2770	1950
	E/D=3	3525	2430	3345	2130	3129	2070
	E/D=4	3528	2510	3404	2220	3211	2160
	E/D=5	3541	2550	3463	2250	3277	2190
W/D=7 K/D=3 M/D=2	E/D=2	3721	3570	3708	3115	3414	3080
	E/D=3	3924	3780	3826	3290	3512	3255
	E/D=4	4078	3885	3960	3395	3551	3325
	E/D=5	4179	3920	4002	3430	3571	3360
W/D=8 K/D=4 M/D=2	E/D=2	3009	3040	2875	2840	2838	2800
	E/D=3	3169	3200	2963	2960	2894	2880
	E/D=4	3198	3240	2995	3000	2963	2920
	E/D=5	3196	3320	3061	3040	2975	2960
W/D=8 K/D=2 M/D=3	E/D=2	3597	2320	3381	2120	3208	2040
	E/D=3	3689	2640	3414	2360	3218	2280
	E/D=4	3715	2840	3482	2400	3237	2440
	E/D=5	3747	2960	3508	2560	3414	2560
W/D=9 K/D=3 M/D=3	E/D=2	3747	3600	3489	3420	3296	2790
	E/D=3	3865	3735	3561	3510	3335	3240
	E/D=4	3993	3870	3751	3645	3486	3375
	E/D=5	4022	4050	3762	3735	3532	3465
W/D=10 K/D=4 M/D=3	E/D=2	3071	3050	2835	2800	2766	2700
	E/D=3	3149	3200	2865	2850	2815	2800
	E/D=4	3189	3250	2894	2900	2855	2850
	E/D=5	3277	3350	2914	3000	2904	2900

Tablo 3.9.' un devamı

W/D=10 K/D=2 M/D=4	E/D=2	3669	2400	3375	2150	3352	2050
	E/D=3	3679	2750	3414	2300	3394	2350
	E/D=4	3757	3000	3463	2650	3410	2550
	E/D=5	3904	3150	3541	2800	3472	2700
W/D=11 K/D=3 M/D=4	E/D=2	4048	3520	3552	3465	3508	2695
	E/D=3	4061	3905	3659	3520	3515	3465
	E/D=4	4071	4015	3819	3685	3590	3520
	E/D=5	4101	4070	4002	3905	3600	3575
W/D=12 K/D=4 M/D=4	E/D=2	3169	3060	2835	2760	2815	2760
	E/D=3	3179	3120	2943	2940	2914	2880
	E/D=4	3257	3180	2977	3000	2956	2940
	E/D=5	3355	3240	3005	3060	2992	3000

Her üç aşamada deneysel olarak elde edilen ilk hasar yükleri ile ANSYS 11.0 programı ile Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak elde edilen değerler yukarıdaki grafiklerde gösterilmiştir. W/D, K/D ve M/D oranları sabit tutularak, E/D oranları ile hasar yükleri arasında ilişki grafiklere aktarılmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür.

3.3.2. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar tiplerinin karşılaştırılması

Aşağıdaki tabloda belirlenen geometrik ölçülerde hazırlanan numunelerin her üç aşamada deneysel ve sayısal olarak yapılan analizlerde elde edilen hasar tipleri, karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Tablo incelendiği zaman hem deneysel hem de sayısal olarak elde edilen hasar tiplerinin birbiri ile benzeştiği görülmektedir. Ancak 3 ay deniz suyu içerisinde bekletilen numunelerin deneysel aşamada elde edilen hasar tipleri ile ANSYS ilerlemeli hasar analizi ile elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıklar olduğu görülmüştür. M/D=1 için, K/D=3, W/D=5, E/D=3, 4, 5 boyutundaki numunede deneysel olarak ezilme hasar tipi elde edilirken, ilerlemeli hasar analizi ile yapılan çalışmada önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) hasar tipi olduğu gözlenmiştir. Aynı boyutlar kuru ve 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde hasar tipi yırtılma olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde M/D=2, 3, 4 için K/D=2, W/D= 6, 8, 10, E/D=2, 3, 4, 5 boyutundaki numunelerde deneysel olarak

ezilme hasar tipi elde edilirken, ilerlemeli hasar analizi ile yapılan çalışmada önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) hasar tipi oluştuğu gözlenmiştir.

6 ay deniz suyunda bekletilen $M/D=3$, 4, $K/D=2$, $W/D=8$, 10, $E/D=3$, 4, 5 boyutundaki numunede deneysel olarak ezilme hasar tipi elde edilirken, ilerlemeli hasar analizi ile yapılan çalışmada önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) hasar tipi elde edilmiştir. Benzer şekilde $M/D=2$, $K/D=2$, $W/D=6$, $E/D=4$, 5 boyutundaki numunede deneysel olarak ezilme hasar tipi elde edilirken, sayısal analizde önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) hasar tipi elde edilmiştir.

Kuru haldeki $M/D=2$, $K/D=3$, $W/D=7$, $E/D=2$ boyutundaki numunede deneysel olarak yırtılma hasar tipi elde edilirken sayısal analizde ezilme hasar tipi elde edilmiştir. $M/D=2$, 3, $K/D=2$, $W/D=6$, 8, $E/D=4$, 5 boyutundaki numunelerde deneysel olarak ezilme hasar tipi elde edilirken, sayısal analizde önce ezilme daha sonra yırtılma hasar tipi oluştuğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde $M/D=3$, 4, $K/D=3$, $W/D=9$, 11, $E/D=2$ boyutundaki numunede deneysel olarak önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) hasar tipi elde edilirken sayısal analizde ezilme hasar tipi elde edilmiştir. $M/D=4$, $K/D=2$, $W/D=10$, $E/D=4$, 5 boyutundaki numunede deneysel olarak ezilme hasar tipi elde edilirken, sayısal analizde önce ezilme daha sonra yırtılma hasar tipi elde edilmiştir.

Tablo 3.10. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar tiplerinin karşılaştırılması

Geometrik parametreler		Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar tipleri					
		Kuru		3ay deniz suyu		6 ay deniz suyu	
		Deneysel	ANSYS	Deneysel	ANSYS	Deneysel	ANSYS
$W/D=4$ $K/D=2$ $M/D=1$	$E/D=2$	N	N	N	N	N	N
	$E/D=3$	N	N	N	N	N	N
	$E/D=4$	N	N	N	N	N	N
	$E/D=5$	N	N	N	N	N	N
$W/D=5$ $K/D=3$ $M/D=1$	$E/D=2$	N	N	B+N	B+N	N	B+N
	$E/D=3$	N	N	B	B+N	N	B+N
	$E/D=4$	N	N	B	B+N	N	B+N
	$E/D=5$	N	N	B	B+N	N	B+N
$W/D=6$ $K/D=4$ $M/D=1$	$E/D=2$	N	B+N	B+N	B+N	N	N
	$E/D=3$	N	B+N	B	B+N	B+N	B+N
	$E/D=4$	N	B+N	B	B+N	B+N	B+N
	$E/D=5$	N	B+N	B	B+N	B+N	B+N

Tablo 3.10.‘ un devamı

W/D=6 K/D=2 M/D=2	E/D=2	B+N	B+N	B	B+N	B+N	B+N
	E/D=3	B+N	B+N	B	B+N	B+N	B+N
	E/D=4	B	B+N	B	B+N	B	B+N
	E/D=5	B	B+N	B	B+N	B	B+N
W/D=7 K/D=3 M/D=2	E/D=2	N	B	B	B	B+N	B
	E/D=3	B	B	B	B	B	B
	E/D=4	B	B	B	B	B	B
	E/D=5	B	B	B	B	B	B
W/D=8 K/D=4 M/D=2	E/D=2	B	B	B	B	B	B
	E/D=3	B	B	B	B	B	B
	E/D=4	B	B	B	B	B	B
	E/D=5	B	B	B	B	B	B
W/D=8 K/D=2 M/D=3	E/D=2	B+N	B+N	B	B+N	B+N	B+N
	E/D=3	B+N	B+N	B	B+N	B	B+N
	E/D=4	B	B+N	B	B+N	B	B+N
	E/D=5	B	B+N	B	B+N	B	B+N
W/D=9 K/D=3 M/D=3	E/D=2	B+N	B	B	B	B	B
	E/D=3	B	B	B	B	B	B
	E/D=4	B	B	B	B	B	B
	E/D=5	B	B	B	B	B	B
W/D=10 K/D=4 M/D=3	E/D=2	B	B	B	B	B	B
	E/D=3	B	B	B	B	B	B
	E/D=4	B	B	B	B	B	B
	E/D=5	B	B	B	B	B	B
W/D=10 K/D=2 M/D=4	E/D=2	B+N	B+N	B	B+N	B+N	B+N
	E/D=3	B+N	B+N	B	B+N	B	B+N
	E/D=4	B	B+N	B	B+N	B	B+N
	E/D=5	B	B+N	B	B+N	B	B+N
W/D=11 K/D=3 M/D=4	E/D=2	B+N	B	B	B	B	B
	E/D=3	B	B	B	B	B	B
	E/D=4	B	B	B	B	B	B
	E/D=5	B	B	B	B	B	B
W/D=12 K/D=4 M/D=4	E/D=2	B	B	B	B	B	B
	E/D=3	B	B	B	B	B	B
	E/D=4	B	B	B	B	B	B
	E/D=5	B	B	B	B	B	B

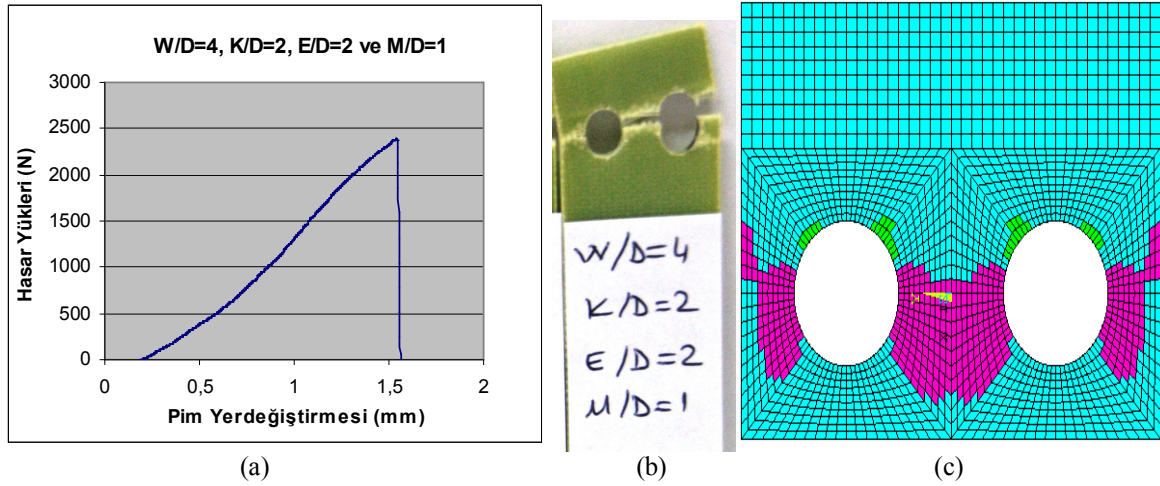
3.3.3. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar tiplerinin fotoğrafları

Çalışmada kullandığımız parametrelerin çeşitliliğinden kaynaklı bu bölümde numunelerin tüm boyutları için verilmemiş olup, M/D=1, 2, 3, 4 oranları referans alınarak

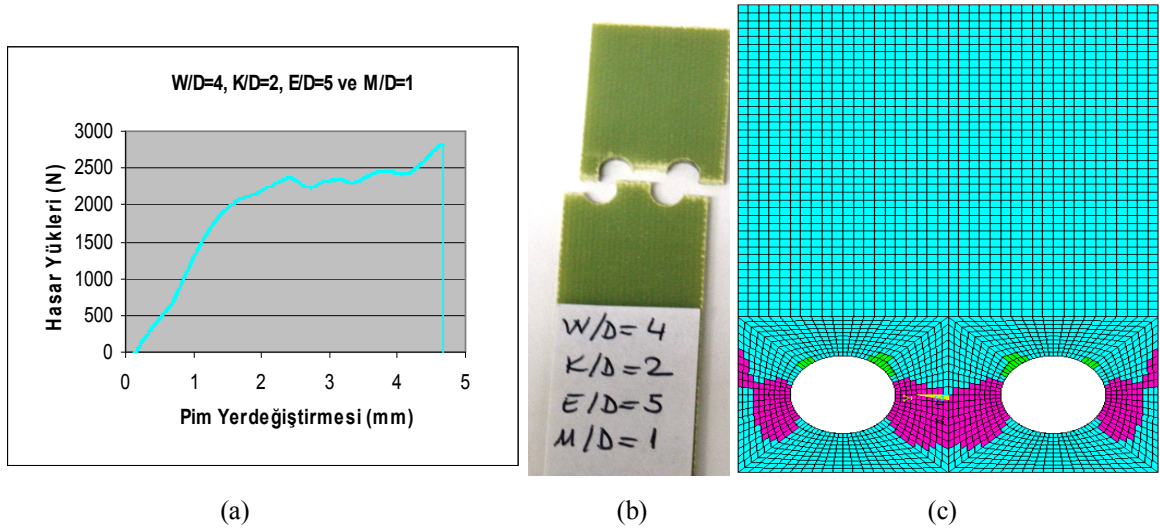
bu alandaki $E/D=2$ ve $E/D=5$ için bir numunenin karşılaştırılması aşağıda verilmiştir. Bu karşılaştırmada numunenin her üç durumu için elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği, deney sonrası numune fotoğrafı ve ANSYS ilerlemeli hasar analizi programı ile elde edilen hasar görüntüleri yer almaktadır.

A- $M/D=1$, $K/D=2$, $E/D=2$, $W/D=4$ için ;

Kuru haldeki numunelerden elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir.



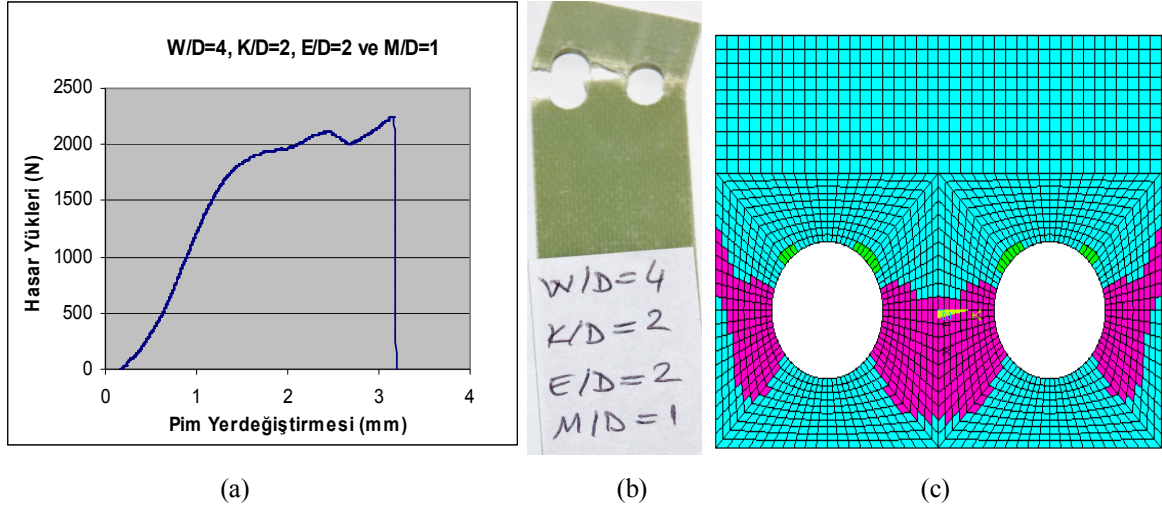
Şekil 3.218. $M/D=1$, $E/D=2$, $K/D=2$, $W/D=4$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a) Yük-Pim yer değiştirme grafiği, b) Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c) ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



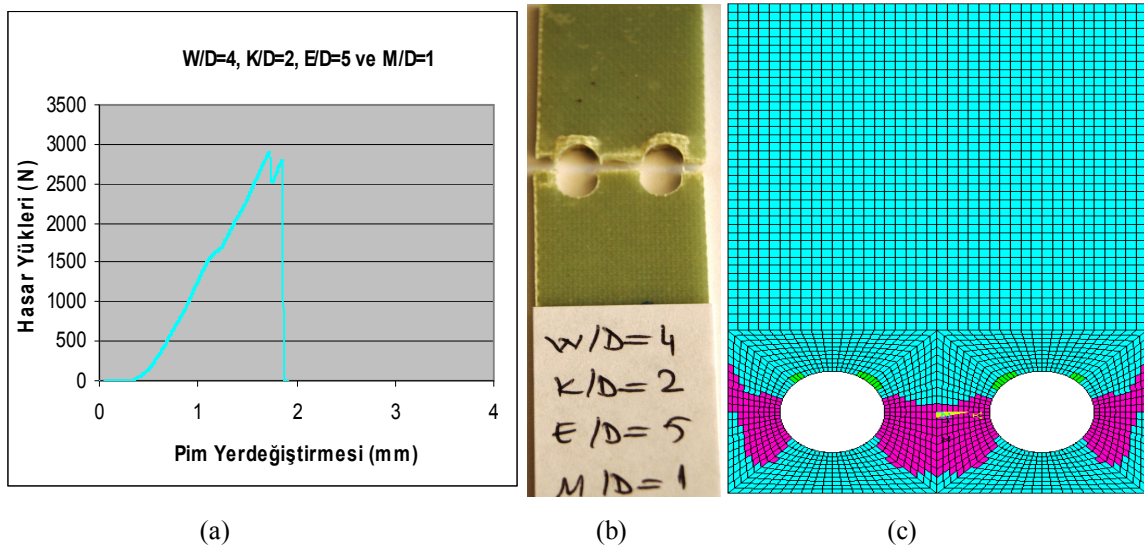
Şekil 3.219. $M/D=1$, $E/D=5$, $K/D=2$, $W/D=4$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a) Yük-Pim yer değiştirme grafiği, b) Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c) ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.218 ve Şekil 3.219' da da görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi yırtılma olarak ortaya çıkmıştır.

3 ay deniz suyuunda bekletilmesi sonucunda;



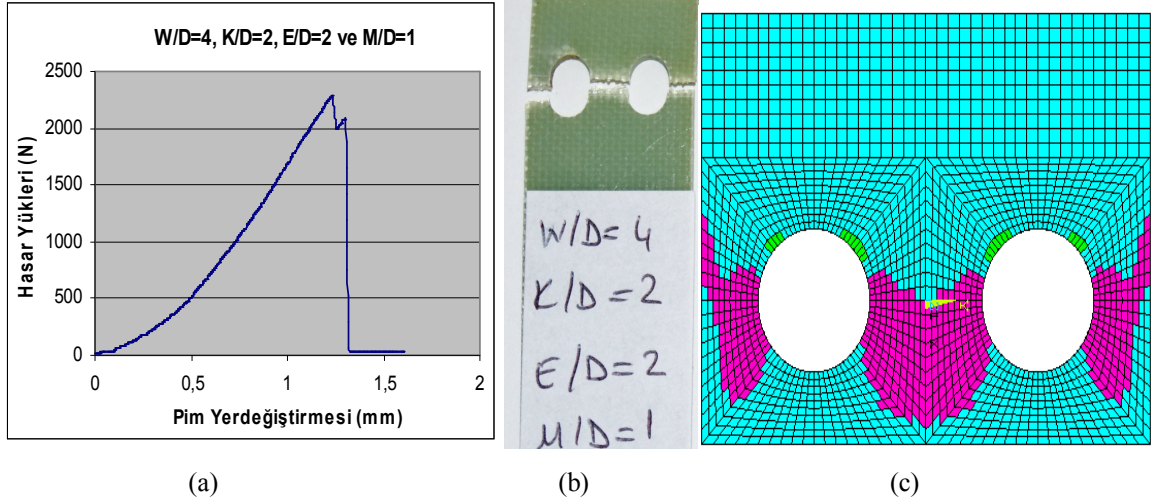
Şekil 3.220. M/D=1, E/D=2, K/D=2, W/D=4 için 3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



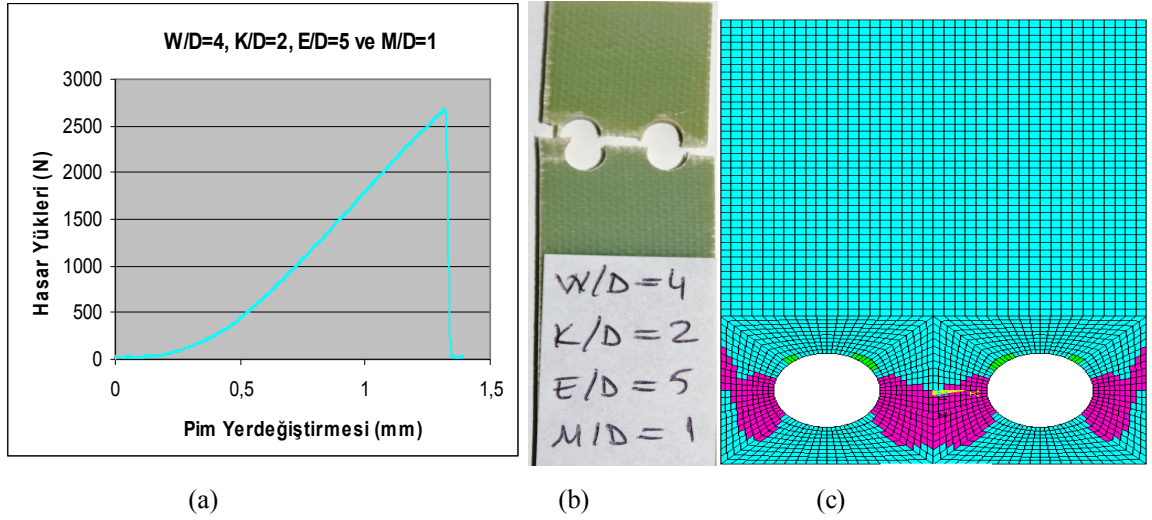
Şekil 3.221. M/D=1, E/D=5, K/D=2, W/D=4 için 3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.220 ve Şekil 3.221' de de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi yırtılma olarak ortaya çıkmıştır.

6 ay deniz suyunda bekletilmesi sonucunda;



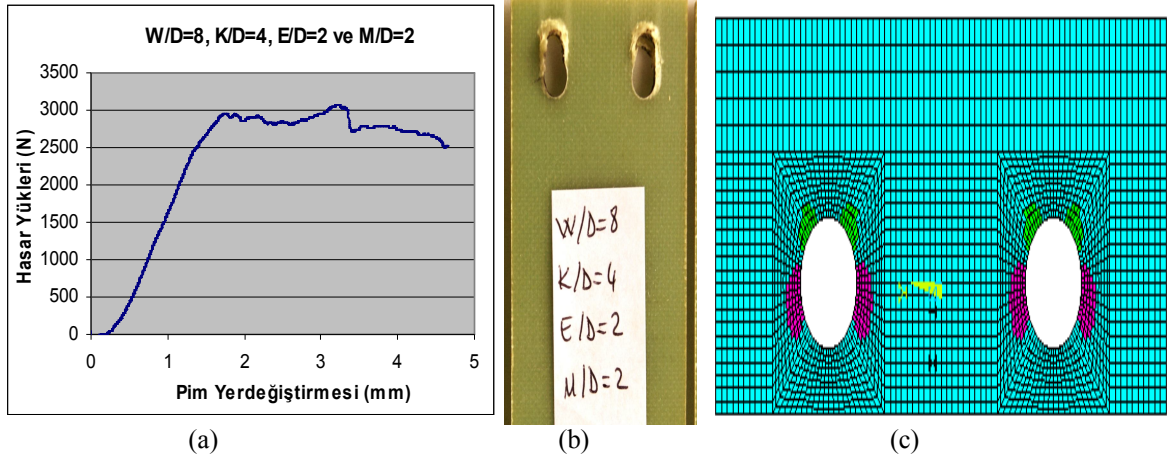
Şekil 3.222. M/D=1, E/D=2, K/D=2, W/D=4 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



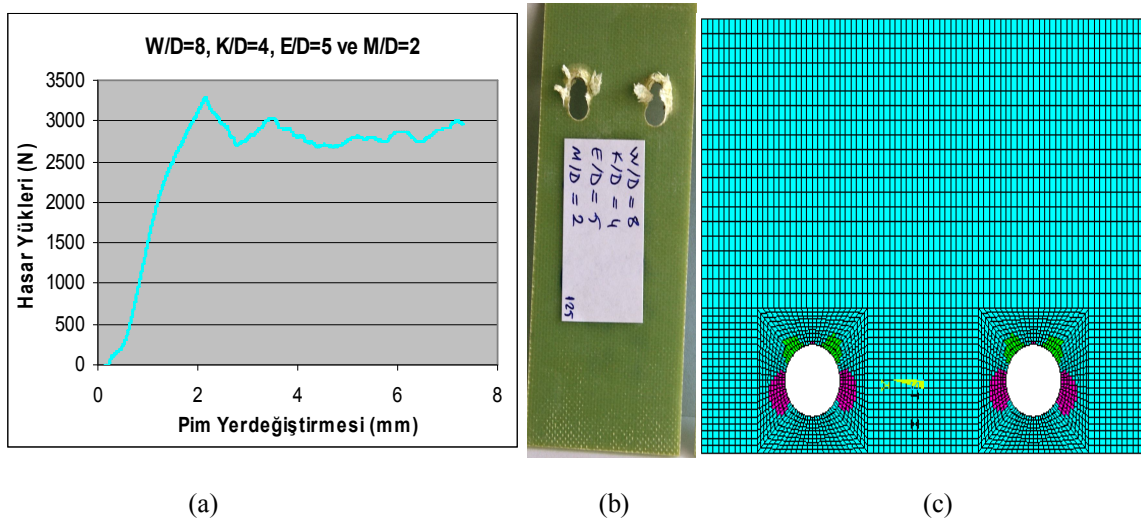
Şekil 3.223. M/D=1, E/D=5, K/D=2, W/D=4 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.222 ve Şekil 3.223' te de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi yırtılma olarak ortaya çıkmıştır.

B- $M/D=2$, $K/D=4$, $E/D=2$, $W/D=8$ için ;



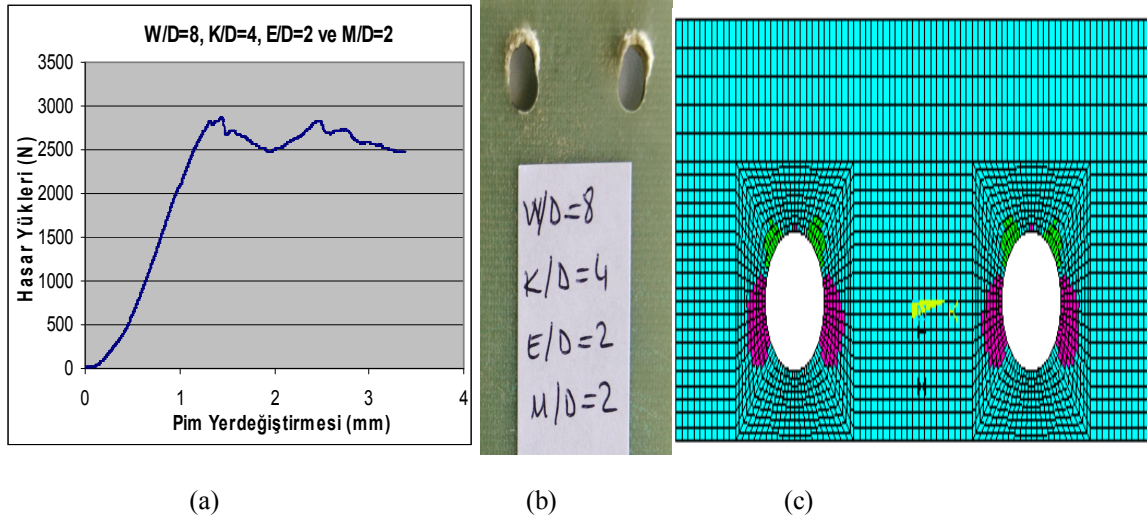
Şekil 3.224. $M/D=2$, $E/D=2$, $K/D=4$, $W/D=8$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



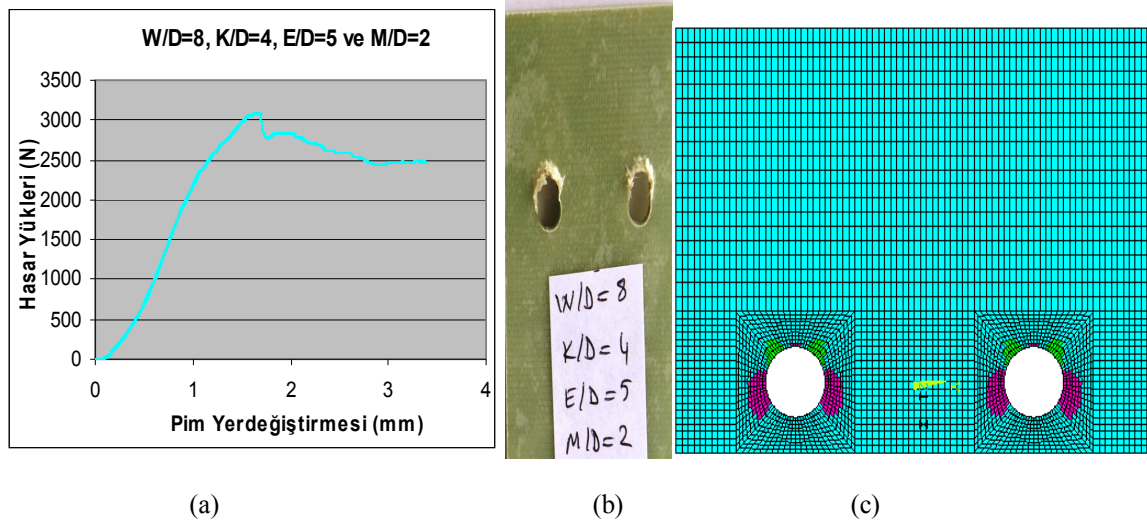
Şekil 3.225. $M/D=2$, $E/D=5$, $K/D=4$, $W/D=8$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.224 ve Şekil 3.225' te de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

3 ay deniz suyunda bekletilmesi sonucunda;



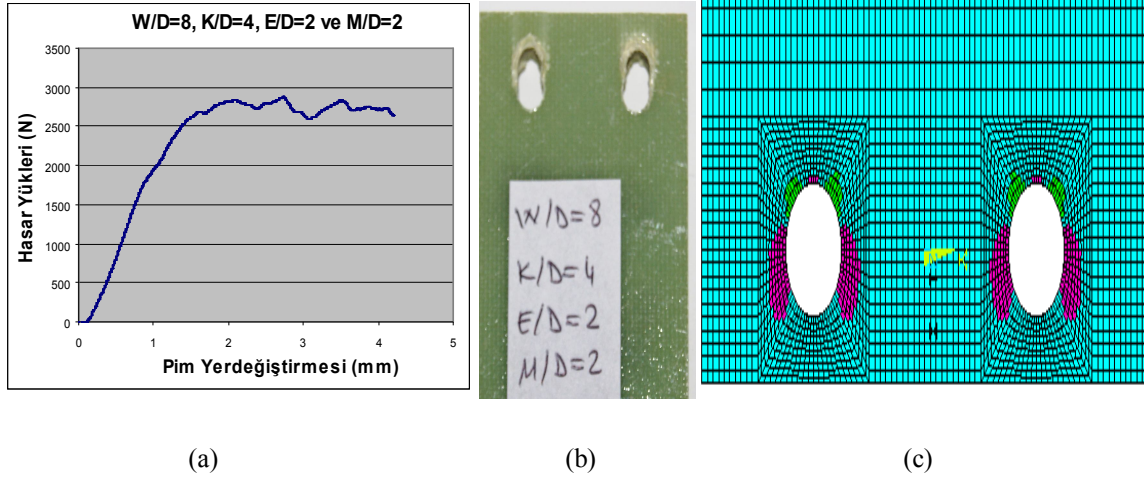
Şekil 3.226. M/D=2, E/D=2, K/D=4, W/D=8 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



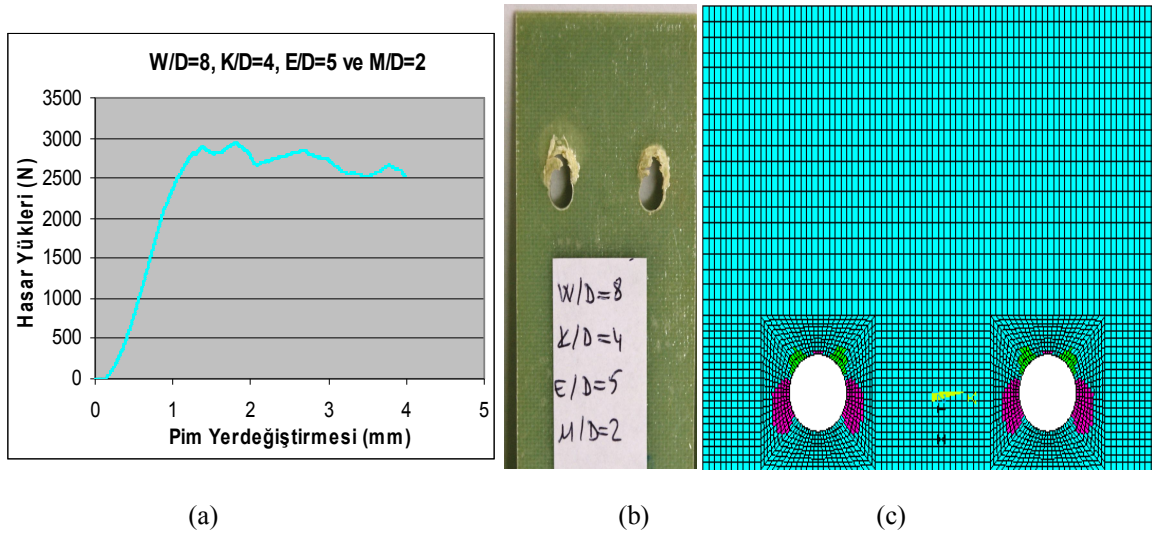
Şekil 3.227. M/D=2, E/D=5, K/D=4, W/D=8 için 3 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.226 ve Şekil 3.227’ de de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

6 ay deniz suyunda bekletilmesi sonucunda;



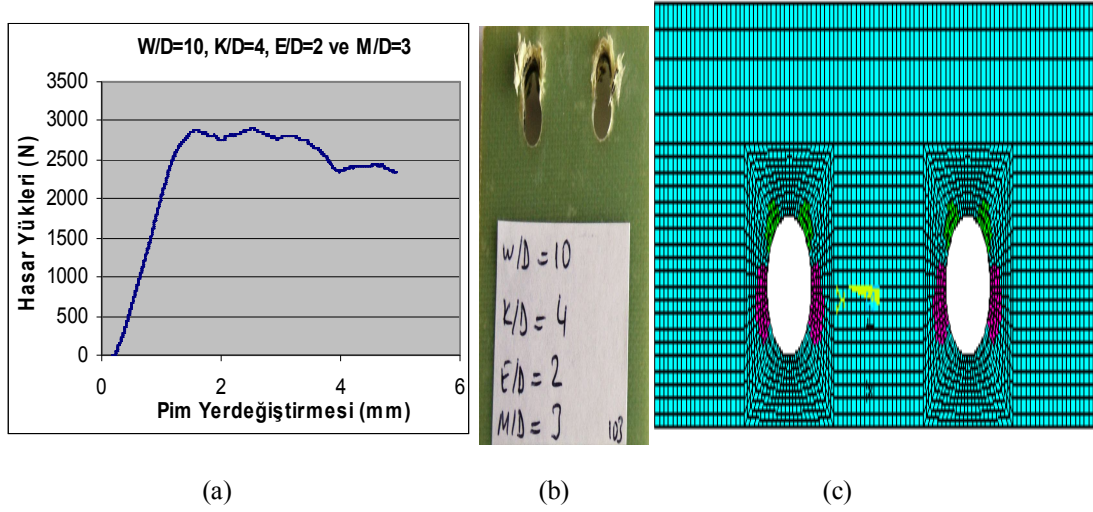
Şekil 3.228. $M/D=2$, $E/D=2$, $K/D=4$, $W/D=8$ için 6 ay deniz suyuna konulan numunelerin karşılaştırılması a) Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b) Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c) ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



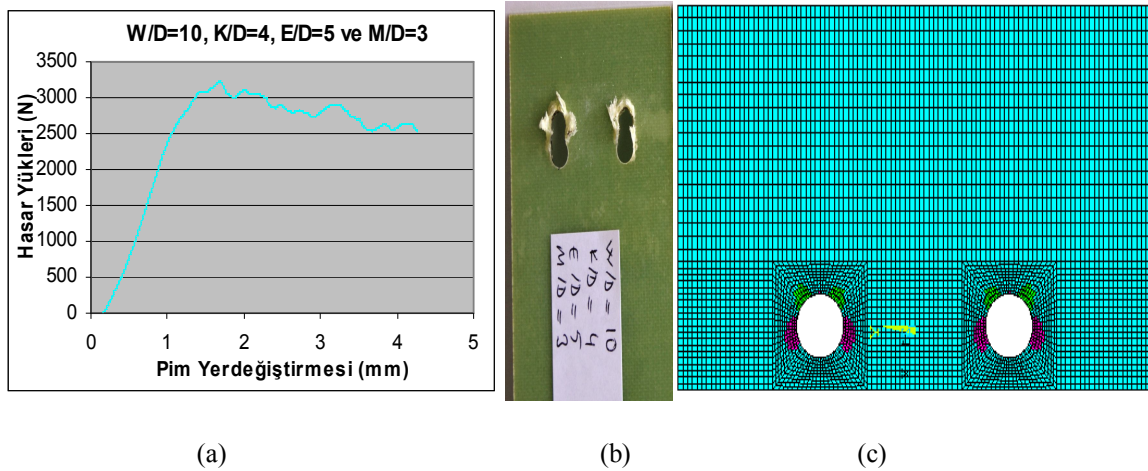
Şekil 3.229. $M/D=2$, $E/D=5$, $K/D=4$, $W/D=8$ için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması a) Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b) Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c) ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.228 ve Şekil 3.229' da da görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbiri ile uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

C- $M/D=3$, $K/D=4$, $E/D=2$, $W/D=10$ için;



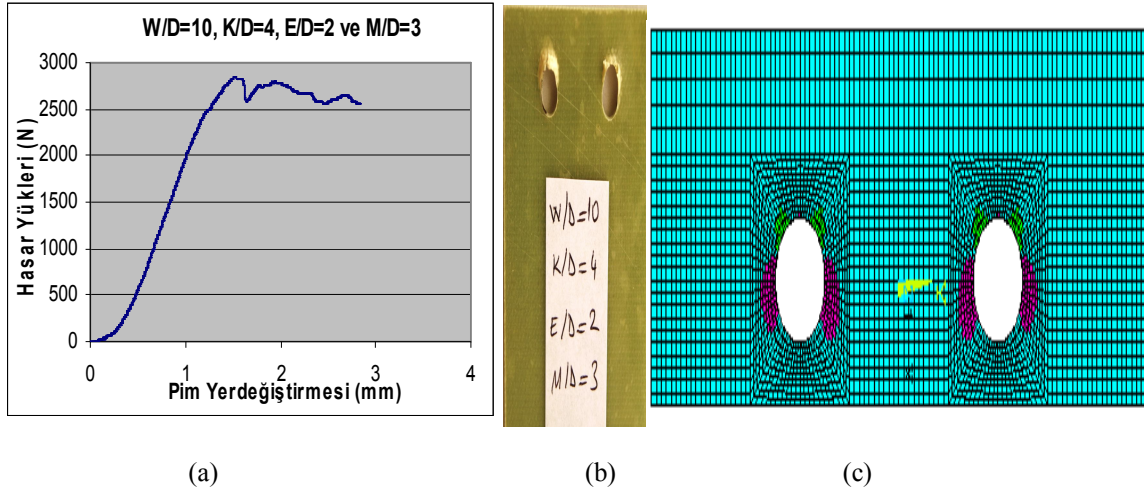
Şekil 3.230. $M/D=3$, $E/D=2$, $K/D=4$, $W/D=10$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a)Yük-Pim yer-değiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



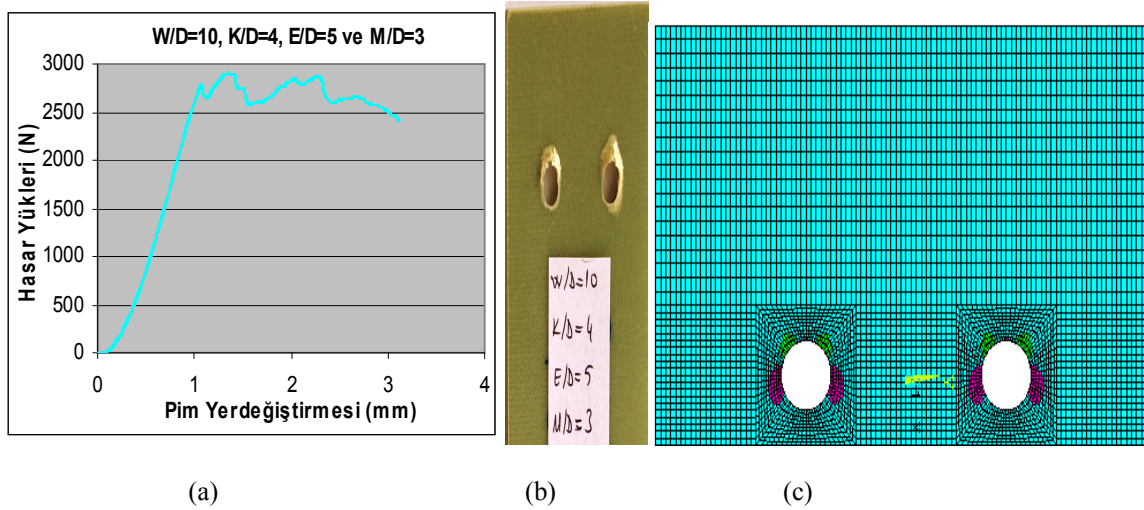
Şekil 3.231. $M/D=3$, $E/D=5$, $K/D=4$, $W/D=10$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a)Yük-Pim yer-değiştirme grafiği b) Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.230 ve Şekil 3.231' de de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

3 ay deniz suyuunda bekletilmesi sonucunda;



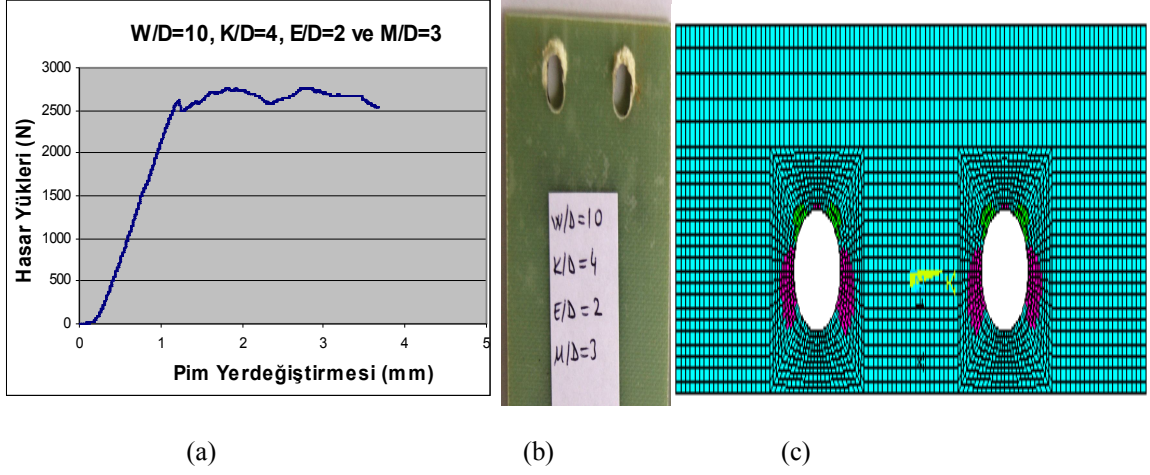
Şekil 3.232. M/D=3, E/D=2, K/D=4, W/D=10 için 3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



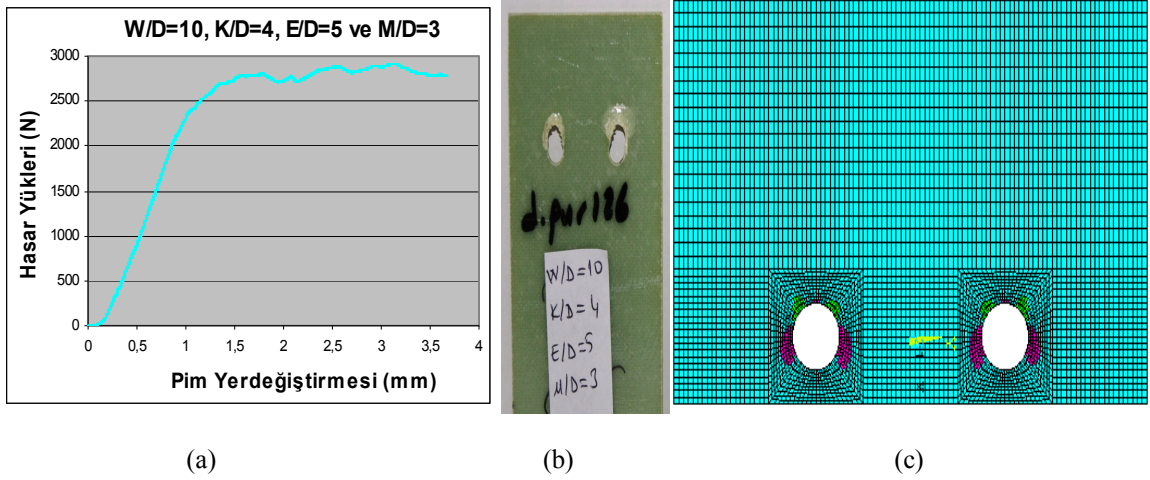
Şekil 3.233. M/D=3, E/D=5, K/D=4, W/D=10 için 3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.232 ve Şekil 3.233' te de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

6 ay deniz suyunda bekletilmesi sonucunda;



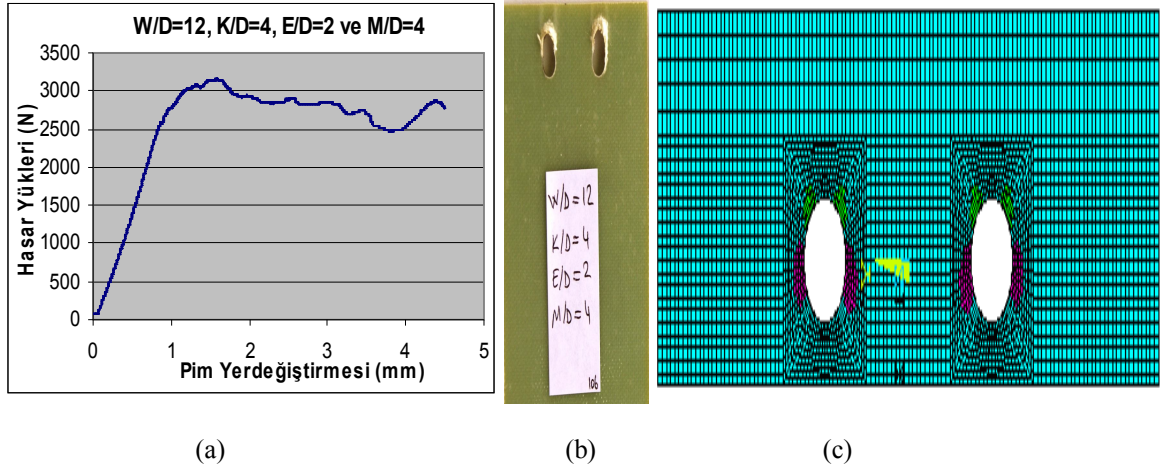
Şekil 3.234. M/D=3, E/D=2, K/D=4, W/D=10 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



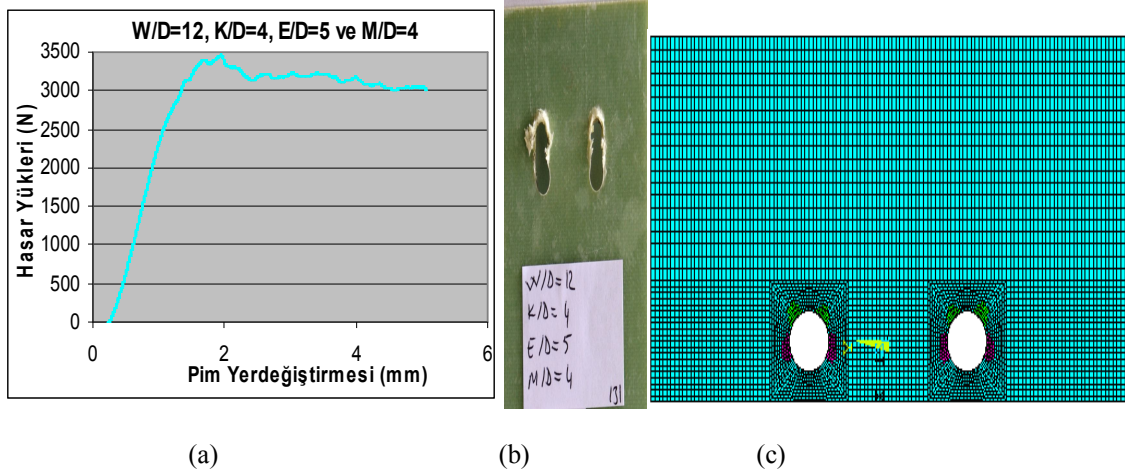
Şekil 3.235. M/D=3, E/D=5, K/D=4, W/D=10 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.234 ve Şekil 3.235’ te de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

D- $M/D=4$, $K/D=4$, $E/D=2$, $W/D=12$ için



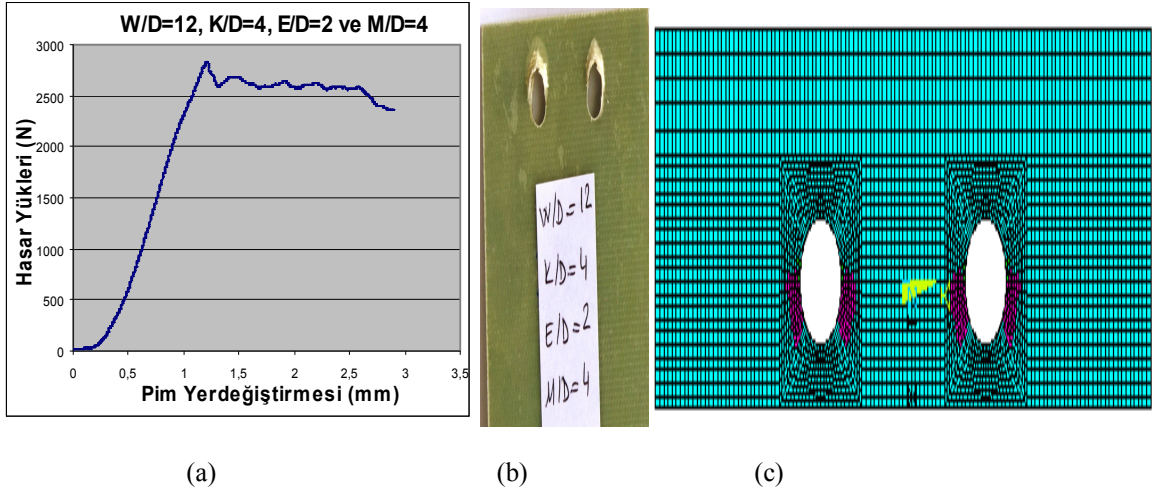
Şekil 3.236. $M/D=4$, $E/D=2$, $K/D=4$, $W/D=12$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



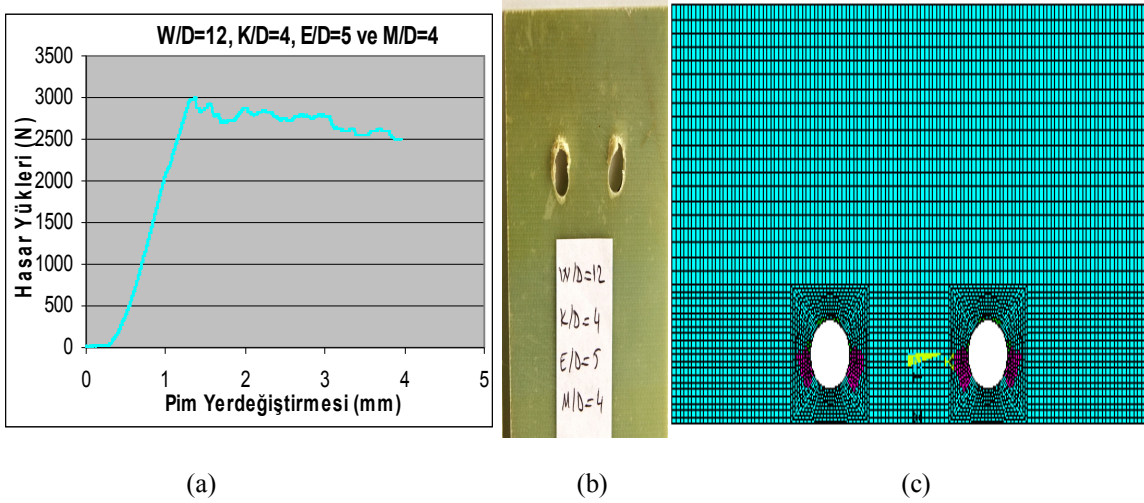
Şekil 3.237. $M/D=4$, $E/D=5$, $K/D=4$, $W/D=12$ için kuru numunelerin karşılaştırılması a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.236 ve Şekil 3.237’ de de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

3 ay deniz suyuunda bekletilmesi sonucunda;



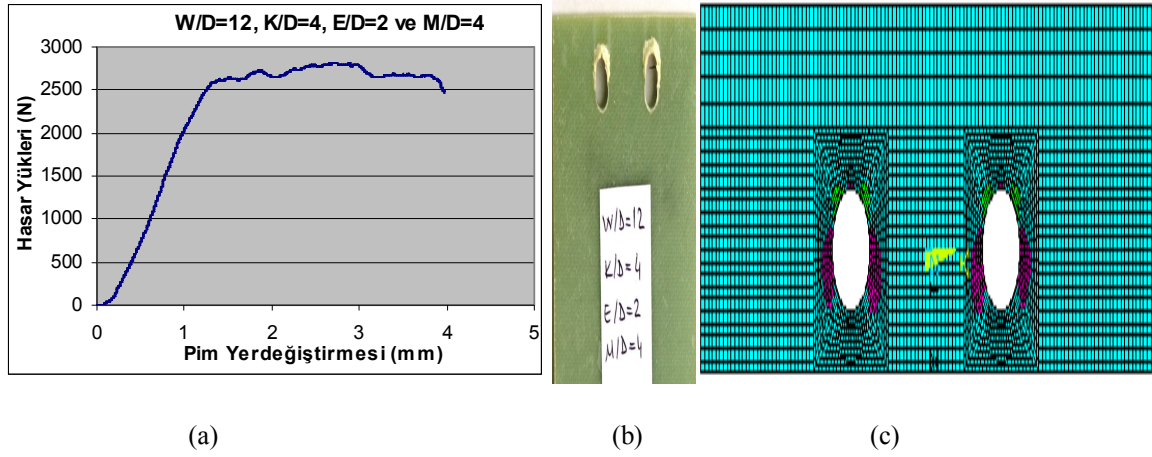
Şekil 3.238.M/D=4,E/D=2, K/D=4, W/D=12 için 3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



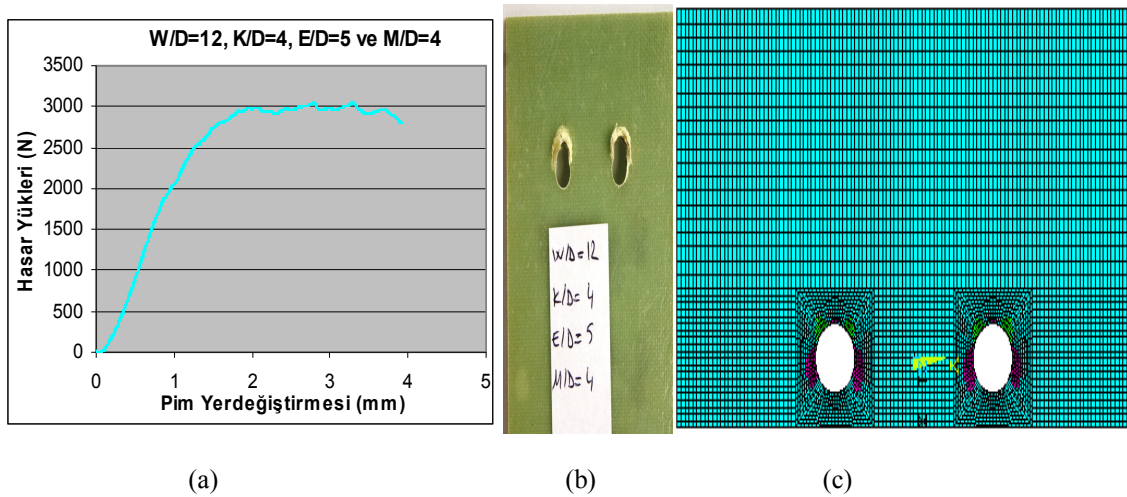
Şekil 3.239.M/D=4,E/D=5, K/D=4, W/D=12 için 3 ay deniz suyuunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.238 ve Şekil 3.239’ da da görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleriyle uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

6 ay deniz suyunda bekletilmesi sonucunda;



Şekil 3.240. M/D=4, E/D=2, K/D=4, W/D=12 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü



Şekil 3.241. M/D=4, E/D=5, K/D=4, W/D=12 için 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerin karşılaştırılması
a)Yük-Pim yerdeğiştirme grafiği, b)Deney sonrası hasar tipi fotoğrafı, c)ANSYS ilerlemeli hasar görüntüsü

Şekil 3.240 ve Şekil 3.241’de de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal sonuçlar birbiri ile uyumlu olup, hasar tipi ezilme olarak ortaya çıkmıştır.

Yukarıdaki numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri, deney sonrası çekilen hasar tipi fotoğrafları ve ilerlemeli hasar analizi sonucu oluşan görüntüler incelendiğinde birbirleriyle uyumlu oldukları görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada pim bağlantılı iki paralel delikli sekiz tabakalı cam fiber takviyeli dokuma epoksi kompozit levhalar üzerinde çevre şartlarının etkisi incelenmiştir. Çalışma deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma kuru ile deniz suyu içerisinde üç ay ve altı ay süre ile bekletilen numuneleri içermektedir. Sayısal çalışmada ise malzemelerde çekme kuvveti altında meydana gelen hasarı doğru şekilde modelleyebilmek amacıyla, ANSYS 11.0 sonlu elemanlar analiz programı içerisinde çalışabilen ilerlemeli hasar analizi programı geliştirilmiştir. Bu program, ANSYS APDL (Ansys Parametric Design Language) dili kullanılarak yazılmıştır. Sayısal çalışmada Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak, kuru ve deniz suyu içerisinde üç ay ve altı ay süre ile bekletilen tüm numunelerin analizi gerçekleştirilmiştir.

İki paralel pim bağlantılı cam fiber takviyeli dokuma kompozit levhalar üzerinde deniz suyunun malzemenin mekanik özellikleri, maksimum hasar yükleri, hasar tipleri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının birbirleri ile uyumlu oldukları görülen bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1- Kompozit plakaların deniz suyu içerisinde kalma süreleri uzadıkça mukavemet değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir.

- Kompozit plakanın çekme mukavemeti (X_t) değerlerinin; deniz suyu içerisinde kalma süresi arttıkça düştüğü görülmüştür. 6 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhanın çekme mukavemet değerlerinin, 3 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhanın çekme mukavemet değerine göre %4.65 oranında, kuru haldeki değere göre ise %20.54 oranında düştüğü tespit edilmiştir.
- Kompozit levhanın basma mukavemet değerlerinin (X_c); numunelerin deniz suyu içerisinde kalma süresi arttıkça, düştüğü görülmüştür. Deniz suyu içerisinde 6 ay bekletilen kompozit levhanın basma mukavemet değeri, 3 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhadan elde edilen basma mukavemet değerine göre %2.04 oranında; kuru haldeki değere göre %11.52 oranında düştüğü tespit edilmiştir.
- Kompozit levhanın kayma mukavemet değerinin; deniz suyu içerisinde kalma süresi arttıkça, düştüğü görülmüştür. Deniz suyu içerisinde 6 ay bekletilen kompozit levhanın kayma mukavemet değerinin, 3 ay deniz suyunda bekletilen

kompozit levhadan elde edilen kayma mukavemet değerine göre %2.20 oranında; kuru haldeki değere göre %3.26 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

- Elastisite modülünün (E_1); kompozit levhanın deniz suyu içerisinde kalma süresi arttıkça düştüğü tespit edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhanın E_1 değerinin; 3 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhadan elde edilen E_1 değerine göre %5.30 oranında, kuru halde elde edilen değere göre ise %12.36 oranında düştüğü tespit edilmiştir.
- Numunelerin deniz suyu içerisinde kalma süreleri arttıkça, kayma modül (G_{12}) değeri düşmüştür. 6 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhanın kayma modülü değerlerinin, 3 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhadan elde edilen değere göre %23.75 oranında; kuru halde elde edilen değere göre %34.86 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

2- Kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhalarda E/D oranının artması ile hasar yükünün arttığı görülmüştür. K/D oranı sabit tutulup, E/D ve M/D oranları artırıldığı zaman da hasar yükünün arttığı tespit edilmiştir.

3- Kompozit levhaların deniz suyunda kalma süreleri arttıkça maksimum hasar yük değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.

4- Kuru halde, 3 ay ve 6 ay deniz suyu içerisinde bekletilen kompozit levhalarda genellikle yırtılma ve ezilme hasar tipi veya ikisi bir arada olan hasar tipleri meydana gelmiştir. Yine her üç aşamada değişmeyen hasar tipleri gözlenirken, bu aşamalarda farklılık gösteren hasar tipleri de meydana gelmiştir.

- W=20 mm, K=10 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki kompozit levhada her üç aşamada da yırtılma hasar tipi meydana gelmiştir.
- W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki kompozit levhalarda; kuru halde hasar tipi yırtılma olarak gözlenirken, bu durum 3 ay deniz suyunda bekletilen aynı boyutlardaki malzemede farklılaştığı tespit edilmiştir. W=25 mm, K=15 mm, M=5 mm ve E=10 mm boyutlarındaki levhada hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelmiştir. Aynı kompozit levhanın E=15, 20 ve 25 mm boyutları için ezilme hasar tipi oluşmuştur. 6 ay deniz suyunda bekletilen tüm kompozit levhalarda ise yırtılma hasar tipi meydana gelmiştir.
- W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutları için kuru haldeki levhaların tümünde hasar tipi yırtılma olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz

suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10 mm boyutlarındaki plakada hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak elde edilmiştir. E= 15, 20, 25 mm için ise ezilme hasar tipi meydana gelmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=20 mm, M=5 mm ve E=10 mm boyutlarındaki levhada hasar tipi yırtılma olarak tespit edilmiştir. E=15, 20, 25 mm boyutlarındaki levhada ise önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) hasar tipi meydana gelmiştir.

- W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E=10, 15 mm boyutlarındaki kuru halde ve 6 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhada hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelmiştir. Ancak E değerinin artması ile hasar tipi ezilme olarak gözlenmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=30 mm, K=10 mm, M=10 mm ve E= 10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm levhalarda hasar tipi ezilme olarak tespit edilmiştir.
- W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E=10 mm boyutundaki kuru halde ve 6 ay deniz suyunda bekletilen kompozit levhada hasar tipi yırtılma olarak tespit edilirken, E=15, 20, 25 mm için ise ezilme hasar tipi elde edilmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen W=35 mm, K=15 mm, M=10 mm ve E= 10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm levhalarda ezilme hasar tipi meydana gelmiştir.
- W=40 mm, K=20 mm, M=10 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki levhanın her üç aşamada ezilme hasar tipi meydana gelmiştir.
- W=40 mm, K=10 mm, M=15 mm ve E=10, 15 mm boyutlarındaki kuru haldeki kompozit levhada elde edilen hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelirken, E değerinin artması ile ezilme hasar tipi gözlenmiştir. Ancak 3 ay deniz suyunda bekletilen tüm levhalarda hasar tipi ezilme olarak meydana gelmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen E=10 boyutundaki levhada elde edilen hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak ve E değerinin artması ile sadece ezilme hasar tipi meydana gelmiştir.
- W=45 mm, K=15 mm, M=15 mm ve E=10 mm boyutundaki kuru haldeki numunelerde hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma olarak (B+N) meydana gelmiştir. E=15, 20, 25 mm ölçülerinde ise ezilme hasar tipi meydana gelmiştir. 3 ay ve 6 ay deniz suyunda bekletilen numunelerde hasar tipi her iki aşamada da değişmemiş ve ezilme hasarı meydana gelmiştir.
- W=50 mm, K=20 mm, M=15 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde her üç aşamada da hasar tipi ezilme olarak meydana gelmiştir.

- W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10, 15 mm boyutlarına sahip kuru haldeki kompozit levhada hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelirken, E değerinin artması ile hasar tipinin sadece ezilme olarak meydana geldiği gözlenmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen tüm numunelerde ezilme hasar tipi meydana gelmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen W=50 mm, K=10 mm, M=20 mm ve E=10 mm boyutundaki numunelerde hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak meydana gelirken, E=15, 20, 25 mm için ise ezilme hasar tipi meydana gelmiştir.
 - W=55 mm, K=15 mm, M=20 mm ve E=10 mm boyutunda kuru haldeki kompozit levhada hasar tipi önce ezilme daha sonra yırtılma (B+N) olarak, E=15, 20, 25 mm boyutlarındaki levhada ise ezilme hasar tipi meydana gelmiştir. 3 ay ve 6 ay süre ile deniz suyunda bekletilen tüm levhalarda ezilme hasar tipi meydana gelmiş ve bunun değişmediği tespit edilmiştir.
 - W=60 mm, K=20 mm, M=20 mm ve E=10, 15, 20, 25 mm boyutlarındaki tüm numunelerde her üç aşamada ezilme hasar tipinin meydana geldiği ve değişmediği tespit edilmiştir.
 - M/D=1 olduğunda hem kuru halde hem de deniz suyu içerisinde 6 ay süre ile bekletilen levhaların tümünde yırtılma hasar tipi olduğu ancak 3 ay süre ile deniz suyunda bekletilen numunelerde farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. M/D≥2 olduğunda, deniz suyu içerisinde 3 ay süre ile bekletilen tüm levhalarda ezilme hasar tipi meydana gelmiştir. W/D=4, K/D=2, M/D=1 ve E/D=2, 3, 4, 5 oranlarında her üç durumda (kuru, 3 ay, 6 ay) yırtılma hasar tipi, W/D=6, 7, 8, 9, 10, 11,12, M/D=2, 3, 4 ve E/D= 4, 5 oranlarında, W/D=8, K/D=4, M/D=2 ve E/D=2, 3, 4, 5 oranlarında, W/D=10, K/D=4, M/D=3 ve E/D=3, 4, 5 oranlarında, W/D=12, K/D=4, M/D=4 ve E/D=2, 3, 4, 5 oranlarında her üç durumda da ezilme hasar tipi meydana gelmiştir.
- 5) Sayısal ve deneysel sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Örneğin; W=30 mm, K=20 mm ve M=5 mm için maksimum hasar yüklerinin deneysel ve sayısal olarak yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman kuru plakalarda en uzak sonuç, E/D=2 için %16.15 fark ile elde edilirken; en yakın sonuç ise E/D=5 için %0.06 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen plakalarda en uzak sonuç, E/D=3 için %7.70 fark ile elde edilirken; en yakın sonuç ise E/D= 2 için %2.84 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen plakalarda en uzak sonuç, E/D=5 için %7.81 fark ile elde edilirken; en yakın**

sonuç ise $E/D=3$ için %1.6 olarak elde edilmiştir. Bu durum $W=40$ mm, $K=20$ mm ve $M=10$ mm için maksimum hasar yüklerinin deneysel ve sayısal olarak yaklaşım oranlarına bakıldığı zaman kuru plakalarda en uzak sonuç, $E/D=4$ için %1.31 fark ile elde edilirken; en yakın sonuç ise $E/D=5$ için %0.73 olarak elde edilmiştir. 3 ay deniz suyunda bekletilen plakalarda en uzak sonuç, $E/D=2$ için %1.22 fark ile elde edilirken; en yakın sonuç ise $E/D=3$ için %0.10 olarak elde edilmiştir. 6 ay deniz suyunda bekletilen plakalarda en uzak sonuç, $E/D=4$ için %1.45 fark ile elde edilirken; en yakın sonuç ise $E/D=3$ için %0.48 olarak elde edilmiştir.

6) Numunelerin hasar yükleri-pim yerdeğiştirme grafikleri, deney sonrası hasar tipi fotoğrafları ve ilerlemeli hasar analizi sonucu oluşan görüntülerinin birbirleri ile uyumlu oldukları tespit edilmiştir.

7) Çalışmada elde edilen sonuçların, literatürdeki benzer çalışmalar ile uyumlu oldukları gözlemlenmiştir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma, pim bağlantılarında deniz suyu etkisinin, malzemenin mekanik özellikleri, hasar yükleri ve hasar tiplerinin öngörülmesi açısından önemlidir. Çalışmada kullanılan yöntem deniz araçlarında kullanılan diğer kompozit malzemeler için geliştirilebilir. Aynı zamanda çoklu pim bağlantıları, farklı malzeme ve farklı fiber oryantasyonları için ve çevre şartları değiştirilerek benzer çalışmalara zemin oluşturmaları açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Chang FK, Scott RA, Springer GS.**, 1982, Strength of mechanically fastened composite joints, Journal of Composite Materials, **16**, 470-94.
- [2] **Chang FK, Scott RA, Springer GS**, 1984, Failure Strength of Nonlinearly Elastic Composite Laminates Containing a Pin Loaded Hole, Journal of Composite Materials, **18**, 464-77.
- [3] **Chang, F.K., Scott, R.A., Springer, G.S.**, 1984, Failure of Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes-Method of Solution, Journal of Composite Materials, **18**, 255-278.
- [4] **Chang, F.K. and Chang, K.Y.**, 1987, Post Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure”, Journal of Composite Materials, **21**, 809-833.
- [5] **Camanho, P.P. and Matthews, F.L.**, 1997, Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP : a Review, Composites Part A, **28**, 529-547.
- [6] **Oh, J.H., Kim, Y.G., Lee, D.G.**, 1997, Optimum bolted joints for hybrid composite materials, Composite Structures Vol .**38**, No. 1-4, pp. 329-341.
- [7] **Wu, T. J. and Hahn, H.T.**, 1998, Bearing Strength of E-Glass / Vinyl-ester Composites Fabricated By VARTM, Composites Science and Technology **58**, 1519-1529.
- [8] **Aktaş, A.**, 1998, Failure Analysis of two Dimensional Carbon-Epoxy Composite Pinned-Joint, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master’s Thesis, February, İzmir.
- [9] **Aktaş, A. and Karakuzu R.**, 1999, Failure Analysis of two-dimensional carbon-epoxy composite plate pinned joint, Mechanics of Composite Materials and Structures, **6**, 347-61.
- [10] **Camanho PP. and Matthews FL**, 1999, A Progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates, Journal of Composite Materials, **33**, 2248-80.
- [11] **Tong, L.**, 2000, Bearing failure of composite bolted joint with non-uniform bolt-to-washer clearance, Composites:Part A **31**, 609-615.

- [12] **Dano, M.L., Gendron, G., Picard, A.,** 2000, Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joint in Composite Laminates, *Composite Structures* **50**, 287-296.
- [13] **Okutan, B., Aslan, Z., Karakuzu, R.,** 2001, A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate, *Composites Science and Technology* **61**, 1491-1497.
- [14] **McCarthy, M.A., Lawlor, V.P., Stanley, W.F., McCarthy, C.T.,** 2002, Bolt-Hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints, *Composites Science and Technology* **62**, 1415-1431.
- [15] **İçten, B.M. and Karakuzu, R.,** 2002, Progressive Failure Analysis of Pin-Loaded Carbon- Epoxy Woven Composite Plates, *Composites Science and Technology* **62**, 1259-1271.
- [16] **Okutan, B.,** 2002, The Effects of Geometric Parameters on the Failure Strength for Pin-Loaded Multi-Directional Fiber-Glass Reinforced Epoxy Laminate, *Composites:Part B* **33**, 567-578.
- [17] **Whitworth, H.A., Othieno, M., Barton, O.,** 2003, Failure analysis of composite pin loaded joints, *Composite Structures* **59**, 261-266.
- [18] **Okutan, B. and Karakuzu, R.,** 2003, The strength of pinned joints in laminated composites, *Composites Science and Technology* **63**, 893-905.
- [19] **İçten, B.M. and Sayman, O.,** 2003, Failure analysis of pin-loaded aluminum–glass-epoxy sandwich composite plates, *Composites Science and Technology* **63**, 727-737.
- [20] **Kelly, G., Hallström, S.,** 2004, Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance, *Composites:Part B* **35**, 331-343.
- [21] **Aktaş, A. and Dirikolu, M.H.,** 2003, The effect of stacking sequence of carbon epoxy composite laminates on pinned-joint strength, *Composite Structures* **62**, 107-111.
- [22] **Aktaş, A. and Dirikolu, M.H.,** 2004, An Experimental and Numerical Investigation of Strength Characteristics of Carbon-Epoxy Pinned-Joint Plates, *Composite Science and Technology* **64**, 1605-1611.
- [23] **Xiao, Y. and Ishikawa, T.,** 2005, Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation), *Composites Science and Technology* **65**, 1022-1031.

- [24] **Xiao, Y. and Ishikawa, T.**, 2005, Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (Part II: Modeling and simulation), *Composites Science and Technology* **65**, 1032-1043.
- [25] **Camanho, P.P. and Lambert, M.**, 2006, A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials, *Composites Science and Technology* **66**, 3004-3020.
- [26] **Karakuzu, R., Gülem, T., İçten, B.M.**, 2006, Failure analysis of woven laminated glass-vinylester composites with pin-loaded hole, *Composite Structures* **72**, 27-32.
- [27] **Khashaba, U.A., Salam, H.E.M., Al-Shorbagy, A.E., Seif, M.A.**, 2006, Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures, *Composite Structures* **73**, 310-317.
- [28] **İçten, B.M., Karakuzu, R., Toygar, M.E.**, 2006, Failure analysis of woven kevlar fiber reinforced epoxy composites pinned joints, *Composite Structures* **73**, 443-450.
- [29] **Karakuzu, R., Taylak, N., İçten, B.M., Aktaş, M.**, 2008, Effects of geometric parameters on failure behavior in laminated composite plates with two parallel pin-loaded holes, *Composite Structures* **85**, 1-9.
- [30] **Şen, F., Pakdil, M., Sayman, O., Benli, S.**, 2008, Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload, *Materials and Design* **29**, 1159-1169.
- [31] **Whitworth, H.A., Aluko, O., Tomlinson, N.A.**, 2008, Application of the point stress criterion to the failure of composite pinned joints, *Engineering Fracture Mechanics* **75**, 1829-1839.
- [32] **Karakuzu, R., Çalışkan, C.R., Aktaş, M., İçten, B.M.**, 2008, Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin-loaded holes, *Composite Structures* **82**, 225-234.
- [33] **Thoppul, S.D., Finegan, J., Gibson, R.F.**, 2008, Mechanics of Mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures-A review, *Composite Science and Technology*.
- [34] **Aluko, O. and Whitworth, H.A.**, 2008, Analysis of Stress Distribution Around Pin Loaded Holes in Orthotropic Plates, *Composite Structures* **86**, 308-313.
- [35] **Ataş A., Şen F., Arslan N.**, 2009, Failure analysis of laminated composite plates with two paralel pin-loaded holes, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **28**, 1265-1276.

- [36] **Kishore, A.N., Malhotra, S.K., Prasad, N.S.,** 2009, Failure Analysis of multi-pin joints in glass fibre / epoxy composite laminates, *Composite Structures* **91**, 266-277.
- [37] **Ataş, C.,** 2009, Bearing strength of pinned joints in woven fabric composites with small weaving angles, *Composite Structures* **88**, 40-45.
- [38] **Kıral, B.G.,** 2010, Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites, *Material and Design* **31**, 85-93.
- [39] **Karakuzu, R., Demirgören Ö., İçten, B.M., Deniz, M.E.,** 2010, Failure behaviour of quasi-isotropic laminates with three-pin loaded holes, *Materials and Design* **31**, 3029-3032.
- [40] **Haque, A., Mahmood, S., Walker, L., Jeelani, S.,** 1991, Moisture and Temperature Induced Degradation in Tensile Properties of Kevlar-Graphite/Epoxy Hybrid Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.**10**, March.
- [41] **Davies, P., Mazeas, F., Casari, P.,** 2001, Sea Water Aging of Glass Reinforced Composites: Shear Behaviour and Damage Modelling, *Journal of Composite Materials*, Vol.**35**, No:15.
- [42] **Gellert, E.P. and Turley, D.M.,** 1999, Seawater Immersion Ageing of Glass-Fibre Reinforced Polymer Laminates For Marine Applications, *Composites, Part A* **30**, 1259-1265.
- [43] **Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P., Challis, K.,** 2001, Review of advanced composite structures for naval ships and submarines, *Composite Structures* **53**, 21-41.
- [44] **Wu, L., Murphy, K., Karbhari, V.M., Zhang, J.S.,** 2002, Short-Term Effects of Sea Water on E-Glass/Vinylester Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.**84**, 2760-2767.
- [45] **Kootsookos, A. and Mouritz, A.P.,** 2004, Seawater Durability of Glass-and Carbon-Polymer Composites, *Composites Science and Technology* **64**, 1503-1511.
- [46] **Mouritz, A.P., Kootsookos, A., Mathys, G.,** 2004, Stability of polyester- and vinyl ester-based composites in seawater, *Journal of Materials Science* **39**, 6073-6077.
- [47] **Gu, H. and Hongxia, S.,** 2007, Effect of Water Absorption on The Mechanical Properties of Glass/Polyester Composites, *Materials and Design* **28**, 1647-1650.

- [48] **Kolat, K., Neşer, G., Özes, Ç.,** 2007, The Effect of Sea Water Exposure on The Interfacial Fracture of Some Sandwich Systems In Matine Use, Composite Structures **78**, 11-17.
- [49] **Maurin, R., Perrot, Y., Bourmaud, A., Davies, P., Baley, C.,** 2008, Seawater Ageing of Low Styrene Emission Resins For Marine Composites: Mechanical Behaviour and Nano-Indentation Studies, Science Direct Composites, Part A.
- [50] **Gu, H. and Hongxia, S.,** 2008, Delamination Behaviour of Glass/Polyester Composites After Water Absorption, Materials and Design **29**, 262- 264.
- [51] **Gu, H.,** 2008, Dynamic Mechanical Analysis of The Seawater Treated Glass/Polyester Composites, Materials and Design.
- [52] **Siriruk, A., Weitsman, Y.J., Penumadu, D.,** 2008, Polymeric foams and sandwich composites: Material properties, environmental effects, and shear-lag modeling, Composites Science and Technology.
- [53] **Silva, R.V., Aquino, E.M.F., Rodriques, L.P.S., Barros, A.R.F.,** 2008, Curaua /Glass Hybrid Composite: The Effect of Water Aging on the Mechanical Properties, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.00, No.00.
- [54] **Aktaş, A. and Uzun, İ.,** 2008, Sea water effect on pinned-joint glass fibre composite materials, Composite Structures **85**, 59-63.
- [55] **Gu H.,** 2009, Behaviours of glass fibre/unsaturated polyester under seawater environment, Materials and Design **30**, 1337-1340.
- [56] **Aldajah, S., Alawsi, G., Rahman, S.A.,** 2009, Impact of Sea and Tap Water Exposure on The Durability of GFRP Laminates, Materials and Design **30**, 1835-1840.
- [57] **Murthy, H.N.N., Sreejith, M., Krishna, M., Sharma, S.C., Sheshadri, T.S.,** 2009, Seawater Durability of Epoxy/Vinyl Ester Reinforced with Glass/Carbon Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.00, No:00.
- [58] **Kanhoğlu, H.,** 2009, Environmental Effects on pin-loaded laminated composites, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master's Thesis, June, İzmir.
- [59] **Gören, A. and Sayman, O.,** 2010, Experimental Failure Analysis of Bolted Joints in Moisture- and Temperature- Induced Composite Laminates under Preload, Polymer Composites, **31**:173-178.

- [60] **Karakuzu, R., İçten B.M., Tekinşen, Ö.,** 2010, Failure Behavior of Composite Laminates with Multi-Pin Loaded Holes, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. **29**, No:2.
- [61] **Kaptı, S., Sayman, O., Özen, M., Benli, S.,** 2010, Experimental and Numerical Failure Analysis of Carbon/Epoxy Laminated Composite Joints under Different Conditions, Material & Design, **31**, 4933-4942.
- [62] **Özen, M. and Sayman, O.,** 2010, Failure Loads of Mechanical Fastened Pinned and bolted Composite Joints with serial Holes, Composites Part B : Engineering.
- [63] **Karakuzu, R., Demirgören, Ö., İçten, B.M., Deniz, M.E.,** 2010, Failure behavior of quasi-isotropic laminates with three-pin loaded holes, Materials and Design **31**, 3029-3032.
- [64] **Karakuzu, R. and İçten, B.M.,** 2010, Failure Behavior of Composite Laminates with Multi-Pin Loaded Holes, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.29, No.2.
- [65] **Totry E., Molina-Aldareguia J.M., Gonzalez C., Llorca J.,** 2010, Effect of fiber, matrix and interface properties on the in-plane shear deformation of carbon-fiber reinforced composites, Composites Science and Technology, **70**, 970-980.
- [66] **Mallick, P.K.,** 1993, Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design, Second Edition, Revised and Expanded, Department of Mechanical Engineering University of Michigan-Dearborn, Marcel Dekker All Rights Reserved.
- [67] **Jones , R.M.,** 1975, Mechanics of Composite Materials, Professor of Engineering Science and Mechanics Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, by Hemisphere Publishing Corporation, USA.
- [68] **Matthews, F.L., Davies, G.A.O., Hitchings D., and Soutis, C.,** 2000, Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures, Woodhead Publishing Limited ad CRS Pres LLC, Cambridge England.
- [69] **Okutan, B.,** 2001, Stress and Failure Analysis of Laminated Composite Pinned Joints, Thesis of Doctor, Science Institute of Dokuz Eylül University, İzmir.
- [70] (www.turksail.com).

- [71] **Doğanay, S.**, 2007, Lif Takviyeli Marina Kompozitlerin Aşınma ve Yorulma Davranışının İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Bursa.
- [72] (www.yelkenokulu.com/denizler).
- [73] **Kanhoğlu, H.**, 1994, Environmental Effects on Pin-Loaded Laminated Composites, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylül University, June, İzmir.
- [74] **Isaac, M.D. and Ishai, O.**, 1994, Engineering Mechanics of Composite Materials, New York Oxford, Oxford University Pres.
- [75] **Carlsson, L.A. and Pipes, R.B.**, 1997, Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, Second Edition, Technomic Publishing Company, U.S.A.
- [76] **Sayman, O. ve Aksoy, S.**, 1989, Kompozit Malzemeler, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ders notları, Bornova, İzmir.
- [77] **Dursun, T.**, 2006, Civata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [78] **Turan, K.**, 2009, Çözülebilir Bağlantılı Kompozit Plakaların Mekanik Davranışlarının Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [79] Ansys 11.0., (Academic Teaching Introductory) Command References and Gui.
- [80] (<http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/kompozit>)

ÖZGEÇMİŞ

Gurbet ÖRÇEN, 1976 yılında Dicle/Diyarbakır’ da doğdu. Lise eğitimini Fatih Lisesi’ nde tamamladı. 1994-1998 yılları arasında Dicle Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini bölüm üçüncüsü olarak tamamlayarak, Makina Mühendisi olarak mezun oldu. 2002-2005 yılları arasında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim dalında yüksek lisansını tamamlayarak “Yüksek Mühendis” unvanını aldı. 2008 yılından itibaren Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Mekanik Anabilim dalında eğitimini sürdürmektedir.