

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ADERANS DAYANIMI
ÜZERİNE AGREGA TİPİNİN ETKİSİ

Ahmet COŞKUN

Doktora Tezi
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUĞAL

EYLÜL 2013

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ADERANS DAYANIMI ÜZERİNE
AGREGA TİPİNİN ETKİSİ

DOKTORA TEZİ
Ahmet COŞKUN
(05125202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 6 Eylül 2013
Tezin Savunulduğu Tarih: 4 Ekim 2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUĞAL (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU (G.Ü.)
Prof. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN (F.Ü.)
Doç. Dr. Harun TANYILDIZI (F.Ü.)
Doç. Dr. Servet YILDIZ (F.Ü.)

EKİM 2013

ÖNSÖZ

Doktora tezimle ilgili çalışmalarımın başından sonuna kadar takipçisi olup, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUĞAL' a, teorik konularda yardımcı olan Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU, Yrd. Doç. Dr. Tahir GÖNEN ve Yrd. Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ' a, deney numunelerinin hazırlanmasında büyük emekleri olan Eyüp ORHAN, Murat ŞAHİN, Yavuz YONAR ve Alper KURT' a, numune kalıplarının hazırlanmasında yardımcı olan Teknisyen Ümit ÖZEL' e, beton mikseri teminini sağlayan Elazığ Şeker Fabrikası Müdürü Lütfi ÇEVİK' e, kimyasal katkıları konusunda büyük yardım aldığım SİKA Firması ve çalışanlarına, tez çalışmamı proje ile destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi' ne, aderans deneylerim boyunca başta Yrd. Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN olmak üzere bana yardımcı olan tüm Metal Eğitimi Bölümü personeline, her konuda desteğini gördüğüm Doç. Dr. Harun TANYILDIZI' na, hayatımın tüm güzelliklerini borçlu olduğum; annem ve babama, varlıklarıyla sınırsız güç bulduğum eşim ve oğluma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON	6
2.1. Tanım ve Tarihsel Gelişim	6
2.2. KYB’ nin Avantaj ve Dezavantajları	8
2.3. KYB Bileşenleri.....	9
2.3.1. AgregA	11
2.3.2. Çimento	11
2.3.3. Mineral Katkı	12
2.3.3.1. Silis Dumanı.....	12
2.3.3.2. Uçucu Kül	14
2.3.4. Kimyasal Katkı	15
2.3.5. Karışım Suyu	16
2.4. KYB Test Metotları.....	17
2.4.1. Çökme-Yayıılma ve T ₅₀ Zamanı Deneyi.....	20
2.4.2. V Hunisi Deneyi.....	21
2.4.3. L Kutusu Deneyi	23
2.4.4. Elek Ayrışma Direnci Testi	24
2.4.5. U Kutusu Deneyi.....	25
2.4.6. J Halkası Deneyi	26
2.4.7. Orimet Deneyi.....	27
2.5. KYB’ nin Karakteristik Özellikleri.....	28
2.5.1. Basınç Dayanımı	28
2.5.2. Çekme Dayanımı.....	29

2.5.3. Elastisite Modülü	29
2.5.4. Sünme	30
2.5.5. Rötire	30
2.5.6. Sıcaklıkla Genleşme Katsayısı.....	31
2.5.7. Aderans	31
2.5.8. Dökme Düzlemleri Boyunca Kesme Kuvveti Kapasitesi	32
2.5.9. Yangına Karşı Dayanıklılık	32
2.5.10. Dayanıklılık.....	33
3. BETONARMEDE ADERANS	34
3.1. Aderans Mekanizması	35
3.2. Aderansın Nedenleri.....	36
3.3. Aderansı Etkileyen Unsurlar.....	36
3.3.1. Donatının Özellikleri.....	36
3.3.2. Betonun Özellikleri	39
3.3.3. Betonarme Kesit Özellikleri	40
3.3.4. Diğer Unsurlar.....	43
3.4. Aderans Çeşitleri.....	43
3.4.1. Eğilme Aderansı.....	44
3.4.2. Kenetlenme Aderansı	45
3.5. Aderans Deneyleri.....	48
3.5.1. Çekip Çıkarma Deneyi	48
3.5.2. İtip-Çıkarma Deneyi.....	50
3.5.3. Geliştirilmiş Çekip-Çıkarma Deneyi.....	50
3.5.4. Eksantrik Çekip-Çıkarma Deneyi	51
3.5.5. Uç Uca Çekme Deneyi	51
3.5.6. Ek Çubuklu Uç Uca Çekme Deneyi.....	52
3.5.7. Tek Deney Çubuklu Çekme Deneyi.....	52
3.5.8. Kiriş Deneyleri.....	53
3.5.8.1. Bureau Deneyi.....	53
3.5.8.2. Teksas Deneyi	54
3.5.8.3. Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi.....	55
3.5.8.4. Kiriş Çatlama Deneyi	56
3.6. Aderansta Çatlama Olayı.....	57

3.7. Aderansta Göçme Mekanizmaları.....	59
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	61
4.1. Malzemeler	61
4.1.1. Çimento ve Toz malzemeler	61
4.1.2. Agregalar	62
4.1.3. Kimyasal Katkı	63
4.1.4. Karma Suyu	63
4.2. Karışım Oranları	64
4.3. Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri	65
4.3.1. Taze Beton Deneyleri.....	65
4.3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	66
4.3.4 Aderans Dayanımı Deneyi.....	68
4.3.5. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi.....	70
4.3.6. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi.....	70
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞİRLENDİRMELER	72
5.1. Taze Beton Özellikleri.....	72
5.2. Numunelerin Birim Ağırlıkları	76
5.3. Dayanım Özellikleri	77
5.3.1. Basınç Dayanımları.....	77
5.3.2. Eğilmede ve Yarmada Çekme Dayanımları	83
5.3.3. Aderans Dayanımları.....	90
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	98
ÖZGEÇMİŞ	107

ÖZET

Bu çalışmada, farklı agrega tipleriyle elde edilen kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri ve aderans dayanımı araştırılmıştır. Bu amaçla agrega olarak dere, kırmataş ve pomza, mineral katkı olarak da 4 farklı oranda silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak toplam 24 farklı KYB serisi elde edilmiştir. Toz malzemelerin optimum kullanım miktarları betonun hem taze özellikleri hem de mekanik özellikleri için tespit edilmeye çalışılmıştır. Numunelere basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme ve aderans dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

Sonuçlar toz tipi olarak incelenirse silis dumanı katkılı seriler, tüm kür süresi ve agregalar için en büyük dayanım değerlerine sahiptirler. Agrega tipleri göz önüne alınırsa, kırmataşlı seriler tüm yaşlarda, tüm toz tipi ve oranlarında en yüksek dayanıma ulaşmışlardır. Aderans deneylerinde kullanılan donatı çapı arttıkça, aderans dayanımı düşmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton, Agrega tipi, Basınç dayanımı, Eğilmede çekme dayanımı, Yarmada çekme dayanımı, Aderans dayanımı

SUMMARY

EFFECT OF AGGREGATE TYPE ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND BOND STRENGTH OF SELF COMPACTING CONCRETE

In this study, bond strength and the mechanical properties of the self-compacting concrete obtained with strength different types of aggregates were investigated. The twenty-four different SCC series were produced. It was used aggregate natural stones, crushed stone, and pumice stone. The four different proportions of silica fume and fly ash used in this study. Optimum amounts of powder materials properties were determined for the mechanical properties and fresh concrete. Compressive, flexural, splitting tensile strength and bond strength experiments were conducted.

If results were analyzed as the types of powder, the series containing silica fume were obtained the greatest strength values for all aggregates and the curing time. When aggregate types were analyzed, the concrete samples produced with crushed stone aggregates were obtained the greatest strength values. Bond strength decreased with the reinforcement diameter increases.

Key Words: Self Compacting Concrete, Aggregate Types, Compressive Strength, Flexural Strength, Splitting Tensile Strength, Bond Strength

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1. KYB üretiminde metot geliştirme çalışmaları yapan kuruluşlar.....	7
Tablo 2.2 EFNARC tarafından önerilen KYB karışım oranları	10
Tablo 2.3. Mineral katkıların suyla reaksiyon kapasitelerine göre sınıflandırılması	12
Tablo 2.4. Silis dumanlarının kimyasal bileşenleri	13
Tablo 2.5 .KYB Test Metotları	17
Tablo 2.6. Taze beton deney yöntemlerine göre yapılan sınıflandırma	18
Tablo 2.7. Çeşitli uygulama alanları için KYB kıvam özellikleri.....	20
Tablo 4.1. Çimento, uçucu kül ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri	62
Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan agregaya ait özellikler	63
Tablo 4.3. Akışkanlaştırıcı katkının kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	63
Tablo 4.4. Dere agregalı serilerin karışım oranları	64
Tablo 4.5. Kırmataş agregalı serilerin karışım oranları.....	64
Tablo 4.6. Pomza agregalı serilerin karışım oranları	65
Tablo 5.1. KYB serilerinin birim ağırlıkları.....	77

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)	8
Şekil 2.2. Normal betonla KYB' nin karşılaştırılması.....	10
Şekil 2.3. Kimyasal katkı tipinin akışkanlık arttırıcı etkisi.....	16
Şekil 2.4. Çökme-yayılma ve T_{50} zamanı deney düzeneği	21
Şekil 2.5. V hunisi	22
Şekil 2.6. L kutusu deney aparatı	23
Şekil 2.7. Elek ayrışma direnci testi	25
Şekil 2.8. U kutusu deney aparatı.....	25
Şekil 2.9. J halkası deney aparatı.....	26
Şekil 2.10. Orimet deney aparatı	27
Şekil 3.1. Betona gömülü donatı çubuğu parçasının serbest cisim diyagramı ve aderans dayanımı bileşenleri	35
Şekil 3.2. Donatı Çubuğu Boyunca Gerilme Değişimi.....	35
Şekil 3.3. Kenetlenme Aderans Deneyi	38
Şekil 3.5. Eğilme aderansı.....	45
Şekil 3.6. Aderans gerilmelerinin çubuk boyunca dağılımı.....	47
Şekil 3.8. Kenetlenme boyunun sınırlanması.....	50
Şekil 3.9. Geliştirilmiş çekip çıkarma deneyi	50
Şekil 3.10. Eksantirik-çekip çıkarma deneyi.....	51
Şekil 3.11. Uç uca çekme deneyi.....	51
Şekil 3.12. Ek çubuklu uç uca çekme deneyi.....	52
Şekil 3.13. Tek deney çubuklu çekme deneyi	53
Şekil 3.14. Bureau deneyi	54
Şekil 3.15. Teksas deneyi.....	55
Şekil 3.16. Standart mafsallı Belçika Deneyi.....	56
Şekil 3.17. Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi.....	57
Şekil 3.18. Nervürlü donatının neden olduğu aderans çatlaması	58
Şekil 3.19. Aderansın oluşturduğu iç çatlaklar	58
Şekil 3.20. Nervürlü çubuğun iki çıkıntısı arasındaki bölgesel davranış.....	59
Şekil 4.1. Yayılma çapı, T_{50} süresi, V hunisi, L kutusu, elek ayrışma direnci deneyi	65

Şekil 4.2. 500 dm ³ kapasiteli karıştırıcı	66
Şekil 4.3. Aderans deney Numunesi.....	67
Şekil 4.4. Aderans deney Numuneleri	67
Şekil 4.5. Yük kontrollü pres	68
Şekil 4.6. Aderans deney düzeneği.....	69
Şekil 4.7. Yarmada çekme deneyi	70
Şekil 4.8. Eğilmede çekme deneyi.....	71
Şekil 5.1. KYB karışımlarının yayılma çapı grafiği	72
Şekil 5.2. Segregasyona uğramış ve segregasyona uğramamış taze beton.....	73
Şekil 5.3. KYB karışımlarının T ₅₀ grafiği.....	74
Şekil 5.4. KYB karışımlarının V hunisi akış süresi grafiği	75
Şekil 5.5. KYB karışımlarının L kutusu h ₂ /h ₁ oranı grafiği.....	75
Şekil 5.6. KYB karışımlarının elek ayrışma direnci grafiği	76
Şekil 5.7. Kırmataş agregası ve silis dumanı içeren serilerin basınç dayanımları	78
Şekil 5.8. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin basınç dayanımları	79
Şekil 5.9. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin basınç dayanımları	79
Şekil 5.10. Kırmataş agregası ve uçucu kül içeren serilerin basınç dayanımları	80
Şekil 5.11. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin basınç dayanımları.....	80
Şekil 5.12. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin basınç dayanımları.....	81
Şekil 5.13. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10 + %10)tüm serilerin basınç dayanımları	81
Şekil 5.14. Silis dumanı içeren tüm serilerin basınç dayanımları	82
Şekil 5.15. Uçucu kül içeren tüm serilerin basınç dayanımları.....	82
Şekil 5.16. Kırmataş agregası ve silis dumanı içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları.....	83
Şekil 5.17. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları	84
Şekil 5.18. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları .	84
Şekil 5.19. Kırmataş agregası ve uçucu kül içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları .	84
Şekil 5.20. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları	85
Şekil 5.21. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları	85
Şekil 5.22. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10+%10) tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları.....	85
Şekil 5.23. Silis dumanı içeren tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları	86

Şekil 5.24. Uçucu kül içeren tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları	86
Şekil 5.25. Kırmataş agregası ve silis dumanı içeren serilerin yarmada çekme dayanımları.....	86
Şekil 5.26. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin yarmada çekme dayanımları.....	87
Şekil 5.27. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin yarmada çekme dayanımları..	87
Şekil 5.28. Kırmataş agregası ve uçucu kül içeren serilerin yarmada çekme dayanımları..	87
Şekil 5.29. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin yarmada çekme dayanımları	88
Şekil 5. 30. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin yarmada çekme dayanımları	88
Şekil 5.31. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10+%10) tüm serilerin yarmada çekme dayanımları.....	88
Şekil 5.32. Silis dumanı içeren tüm serilerin yarmada çekme dayanımları	89
Şekil 5.33. Uçucu kül içeren tüm serilerin yarmada çekme dayanımları	89
Şekil 5.34. Kırmataş agregası ve silis dumanı içeren serilerin aderans dayanımları	91
Şekil 5.35. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin aderans dayanımları	91
Şekil 5.36. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin aderans dayanımları	92
Şekil 5.37. Kırmataş agregası ve uçucu kül içeren serilerin aderans dayanımları	93
Şekil 5.38. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin aderans dayanımları.....	93
Şekil 5.39. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin aderans dayanımları.....	94
Şekil 5.40. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10 + %10)tüm serilerin aderans dayanımları	94

KISALTMALAR LİSTESİ

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
EFNARC	: European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use
JCA	: Japon Çimento Üreticileri Birliği
JCI	: Japon Beton Enstitüsü
JRMCA	: Japon Hazır Beton Birliği
JSCE	: Japon İnşaat Mühendisleri Odası
KSB	: Kendiliğinden Sıkışan Beton
KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
PCI	: Amerikan Prefabrike Beton Üreticileri Birliği
RILEM	: Uluslararası Bina Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Uzmanları ve Laboratuvarları Birliği
SCC	: Self Consolidating Concrete
SLC	: Self Levelling Concrete

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Kesit alanı (mm^2)
b	: Kiriş kesitinin eni (mm)
B_j	: Betonun bloklaşma indeksi
D	: Bloklaşan betonun çapı
d	: Kiriş kesitinin yüksekliği (mm) : Beton deney numunesi basınç dayanımı (N/mm^2)
l	: Aderans boyu
L	: Kirişin uzunluğu (mm)
Ø	: Donatı çapı
P	: Kırılma yükü (N)
P	: Kırılmaya neden olan basınç yükü (N)
u	: Çubuğun çevre uzunluğu
V	: Kesme kuvveti
W_p	: Elekten geçen harç ağırlığı
W_a	: Elek üstünde kalan harç ağırlığı
z	: Moment kolu
ε_b	: Çelikle temasta olan beton lifteki uzama
ε_e	: Çelik çubuğun beton içindeki bir noktasında çelik uzaması
ε_o	: Çatlakların çubuk hizasındaki genişlikleri toplamının çubuk boyuna oranı olsun : Küp numunelerin yarmada çekme dayanımı (N/mm^2) : Eğilme dayanımı (N/mm^2)
τ	: Aderans gerilmesi
τ_b	: Çubuğun kenetlenme boyunca etkiyen bağ kuvvetleri

1. GİRİŞ

Betonarme teorisi, donatı çubukları ve çevresini saran beton arasındaki gerilme aktarımına dayanır. Bu yük veya gerilme aktarımı, beton ve betona gömülü donatı çubuğunun yüzeyi arasındaki relatif harekete veya kaymaya karşı direnci ile mümkün olur. Kaymaya karşı direnç ise, aderans veya aderans gerilmesi olarak bilinir. [1]

Çelik ve beton arasındaki bağ, betonarmenin başlangıcından beri birçok araştırmacının dikkatini üzerinde toplamış ve bu konuda çalışmalar yapılmıştır. Yüksek mukavemetli beton çeliklerinin ortaya çıkmasından önce, betonarmede aderans üzerine son sözün söylenmiş olduğu, nedenlerinin ve etkilendiği faktörlerin tümüyle bilindiği şekilde yaygın bir görüş mevcuttu. Yüksek mukavemetli çeliklerin uygulama alanındaki ilk öncüleri, yuvarlak ve düz yüzeyli enkesitleriyle, klasik yumuşak betonarme demirlerinden pek farklı olmayan aderans özelliklerine sahiptiler. Ancak bir süre sonra bu yeni tür çeliklerin yüksek mukavemetlerinden yararlanabilmek için betonla bağlantılarının artırılması gerektiği anlaşılmış ve yüzeylerindeki çıkıntı, girinti ve nervürlerle aderansı geliştirilmiş modern betonarme donatısı türleri uygulama alanına yayılmıştır. Bunun yanı sıra yüksek mukavemetli betonların da geniş ölçüde kullanılmaya başlamasıyla aderans problemi yeniden önem kazanmıştır [2].

Aderans birçok değişkenden etkilenir. Bu değişkenlerden başlıcaları; betonun çekme mukavemeti, çeliğin akma mukavemeti, çubuğun yüzey geometrisi, donatı çapı, kenetlenme boyu, donatı etrafındaki beton örtü kalınlığı, kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri olarak sıralanabilir [3].

Donatı çubuklarında oluşan aderans gerilmesi kimyasal adezyon, sürtünme direnci ve mekaniksel kenetlenme ile kontrol edilir. Kimyasal adezyon göçtükten sonra, davranış donatı tipine göre önemli derecede değişir. Düz demirlerde, kaçınılmaz olarak donatı ve beton ara yüzeyinde oluşan kesme etkisi sonucu, yapısal açıdan tehlike arz eden sıyrılma ile birlikte göçme oluşur. Nervürlü donatı durumunda ise, yükün artması, donatıyı saran betonda radyal ve boylamasına kuvvetleri doğuran mekaniksel kenetlenmeye sebep olur. Böylece, nervür önündeki gözenekli beton tabakasının bölgesel mikro ezilmesine bağlı olarak donatının maksimum kaymaya ulaşmasıyla eğilme çatlakları oluşur [1]. Göçme öncesi, nervürün kamalama etkisinden dolayı, yarıлма çatlakları meydana gelir [4].

Beton ile donatı yüzeyleri arasındaki aderans üzerine yapılan bazı çalışmalar şunlardır;

- Yeih, Chang ve Tsai [5], epoksi ile kaplanmış donatı ile ve uçucu kül içeren beton arasındaki aderans dayanımını araştırmışlardır. Sonuç olarak en iyi aderans dayanımına, uçucu kül/epoksi oranı 0,5 olduğunda ulaşıldığı tespit edilmiştir.
- Masao, Tomohide ve Nariaki [6], silis dumanı, uçucu kül ve alçı taşının aderans dayanımına etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, katkıların içerisinde bulunan SiO_2 ve CaO içeriği aderans dayanımını 28. günden sonra artırdığını ve referans betonunun değerlerini geçtiğini görmüşlerdir.
- Fabbrocino, Verderame ve Manfredi [7], eski betonarme yapılarda kullanılan düz demir ve 180° dereceli kancalı düz demirin aderans dayanımı üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, aderans dayanımı üzerinde kancalı donatının bulunduğu yerin büyük etkisinin olduğunu görmüşlerdir.
- Fang, Lundgren, Chen ve Zhu [8], donatı korozyonunun aderans dayanımı üzerinde etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, düz donatıda korozyona uğramış deney numunelerinin, korozyona uğramamış deney numunelerine göre aderans dayanımını yaklaşık 2,5 kat arttırdığı görülmüştür.
- Esfahani ve Rangan, [9], çalışmalarında nervürlerin önündeki betonun ezilme yayılmasının, beton mukavemetine bağlı olarak değiştiğini ve yüksek mukavemetli beton durumunda, nervür önündeki betonun daha az ezildiğini tespit etmişlerdir.
- Dehn, Holschemacher, Lange ve Saidowsky [10] çalışmalarında, hafif betonunun tekrarlı yükler altında aderans dayanımını bulmak için deneyler yapmışlardır. Bu çalışma için agrega tipine (Liapor ve Ulopor) göre iki farklı karışım hazırlanmıştır. Yapılan bu deneyler sonucunda, Uloporlu agregayla hazırlanan deney numunelerinin aderans dayanımı Liaporlu agregayla hazırlanan deney numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır. Bu hazırlanan iki karışımda aderans dayanımı azalırken deplasman arttığı görülmüştür.
- Fu ve Chung[11] çalışmalarında, karışımlarında çimento ağırlığının % 0,4 oranında metil alkol, %20 oranında Latex ve çimento ağırlığının %15 oranında silis dumanı kullanarak donatı ve beton arasındaki aderans dayanımını artırmayı amaçlamışlardır. Yapılan bu deneyler sonucunda, en yüksek aderans dayanımı Latex kullanılan deney numunelerinde görülmüştür. Latex kullanılan deney numunelerini metil alkol+ silis dumanı katılan deney numuneleri takip ettiği görülmüştür.

- Baradan [12] yüksek lisans tezinde, çimento tipinin donatı-beton aderansına etkisini incelemiştir. Deneyler için Ege bölgesinin iklim koşulları dikkate alınarak normal kür koşulu ve yüksek sıcaklıkta kür koşulu kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, aderans dayanımı üzerinde yüksek sıcaklığın büyük etkisi olduğu sonucuna varmıştır.
- Çınar [13] yüksek lisans tezinde, Karapınar volkanik agregasından imal edilen hafif betonların aderans davranışını araştırmıştır. Yapılan bu tez çalışması sonucunda, düşey konumda duran çubukların hafif betonla aderansı, aynı konumdaki normal beton-donatı arasındaki aderans ile aynı olduğu sonucuna varmıştır.
- Ünal [14] yüksek lisans tez çalışmasında, betonun aderansının agrega tane çapı ve dayanımına bağlı olarak değişimini incelemiştir. Yapılan bu tez çalışması sonucunda, beton numunelerde kullanılan dane çapı büyüdükçe aderans kuvvetinin de arttığını ve betonun basınç mukavemeti arttıkça aderans kuvvetinin arttığı sonucuna varmıştır.
- Katz ve Berman [15], beton ve fiber donatı arasındaki aderans dayanımı üzerinde yüksek sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Yapılan deney sonucunda, düşük sıcaklıkta aderans dayanımı %80–90 azalmanın olduğu görülmüştür. Aderans deneyinde kayma-yük davranışı değişimi değerleri de bulunmuştur. Yarı ampirik bir model sıcaklık değişiminde aderans dayanımındaki azalmayı tanımlamak için geliştirilmiştir.

Yapılan birçok çalışmada, aderans dayanımının donatı çapının artmasıyla azaldığı ve yükleme durumuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür [16, 17].

Betonarme yapıların inşasında, beton yerleşme kalitesini sağlamak için beton harcına sıkıştırma işleminin uygulanması kaçınılmazdır. Yetersiz sıkıştırma, betonarme elemanlarda peteğimsi ve boşluklu yapı gibi kusurlara yol açabilir. Bu eksiklikler durabilite ve yapısal performansta azalmalara yol açacaktır. Bununla birlikte, sık donatılı ve büyük boyutlu elemanlarda sıkıştırma işlemi daima kolay olmayabilir. Uygun işlenebilirliğe sahip bir beton seçimi, genellikle betonun yerleştirilmesindeki zorlukları çözmek için yapılır. Betonun yerleştirilmesiyle ilgili problemleri çözmek için, **Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)** olarak isimlendirilen ve hiçbir şekilde sıkıştırılmaya ihtiyaç duyulmayan özel bir beton tipi geliştirilmiştir. Deprem bölgelerindeki çok sık donatılı yapılarda kullanmak amacıyla 1980’li yılların sonunda Japonya’da [18, 19]

geliştirilen KYB, mükemmel şekil değiştirebilen, segregasyona karşı yüksek dirence sahip olan ve dahili veya harici vibrasyon kullanılmadan kalıbına yerleştirilen ve sıkıştırılan betonlar olarak tanımlanmaktadır. KYB' ler yüksek akışkanlıklarından dolayı donatının etrafını sıkıca sarar ve beton içerisinde çok düşük oranda boşluk kalarak (porozitesi düşük) kalıbı doldurur [20, 21].

KYB' desegregasyon direncini sağlamak için EFNARC [22] tarafından, 500–600 kg/m³, 0.125 mm göz açıklıklı eleğin altında kalan ince toz malzeme kullanılması gerektiği önerilmektedir. Çimento miktarının artması, hem beton maliyetini artırdığından hem de betona artan termal gerilmeler ve rötre gibi olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Bundan dolayı beton karışımlarına puzolanik ya da daha az reaktif mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı tozu ve serbest fırın cürufu gibi) ilave edilerek ince toz malzeme oranını arttırma yoluna gidilmiştir [23]. Betonda mineral katkıların kullanımı, maliyeti arttırmadan beton akıcılığını arttırmak için faydalı olmaktadır.

KYB ile ilgili yapılan bazı çalışmalar şunlardır;

- Nan Su, Kung-ChungHsu, His-Wen Chai tarafından yapılan çalışmada, KYB' lerde kullanılacak olan agrega, bağlayıcı madde, toz malzeme, su ve akışkanlaştırıcı türlerinin miktar ve özellikleri incelenerek çeşitli karışım metotları ortaya konulmuştur. Bulunan bu metotlar, Japon Hazır – Beton Birliği (JRMCA) tarafından kullanılan metoda göre daha basittir, uygulanabilirliği kolaydır ve daha az zaman harcanır. Daha az miktarda bağlayıcı gerektirir ve maliyet bakımından daha tasarrufludur.[24] .
- WenzhongZhu, Peter J.M. Bartos tarafından yapılan çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonun yayılma özelliği incelenmiştir. Aynı mukavemet derecelerine sahip (40 MPa ve 60 MPa) geleneksel vibrasyonlu referans betonu harcı ile KYB karışımlarının farklı bölgelerdeki yayılma özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, KYB karışımları önemli derecede düşük oksijen geçirimsizliğine sahiptir [25].
- Şahmaran, Yaman ve Tokyay tarafından yapılan çalışmada, yüksek hacimli uçucu kül kullanarak KYB üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Yapılan taze beton deneyleri sonunda, betonun yayılma çapı 730 ile 800 mm, T₅₀ süresi ise 2-4 sn arasında değişmektedir. Yayılma testi sonunda bütün karışımların KYB özelliği gösterdiği gözlenmiştir. V-Hunisi testi sonunda elde edilen akma sürelerinde, karışımların viskozitesinin KYB olma standartlarına göre biraz yüksek olduğu

gözlenmiştir. Sertleşmiş KYB' ler üzerinde yapılan basınç dayanım deneyi sonuçlarına göre, 28 günlük basınç dayanımları 46 MPa ile 30 MPa arasında değişmektedir. Uçucu kül miktarı toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %50' sine kadar olan karışımlarda ilk günlerdeki basınç dayanımı farkı kapanmaktadır [26].

- Felekoğlu ve Baradan' nın yaptığı çalışmada, KYB tasarımında çimento dozajı sabit tutulup, akışkanlaştırıcı miktarı artırılıp, su azaltıldıkça, yayılma değeri uygun sınırlar arasında kalırken viskozite hızla artmaktadır. Aynı zamanda, Sabit çimento dozajında, su/toz oranının artırılıp, katkının azaltılması, taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneğini arttırmaktadır. Bu çalışmada üretilen KYB' lerin çekme dayanımları aynı dayanım sınıfındaki normal betonlara göre %3 ile %17 arasında değişen oranlarda daha yüksektir[27].
- Karataş doktora tez çalışmasında, mineral katkı dozajının ve türünün KYB' deki donatı aderansına etkisini incelemek amacıyla farklı oranlarda uçucu kül ve silis dumanı (%25, 30, 35, 40 UK ve %5, 10, 15, 20 SD) içeren KYB' den kırı ş numuneleri hazırlamıştır. SD içeren KYB kırı ş numunelerine ait aderans dayanımlarının hem UK içeren KYB kırı ş numunelerinin hem de kontrol betonuna ait numunelerin aderans dayanımlarından yüksek oldu ğ u deney sonuçlarından anlaşılmaktadır [28].

KYB ile ilgili yapılmış araştırmalar dört ana başlık altında toplanabilir. Bunlar:

1. Yeni karışım dizaynları [22, 29-32],
2. Farklı viskozite sağlayıcıların kullanılması [33, 34],
3. Dayanıklılık problemlerinin araştırılması [35, 36],
4. Lif takviyesidir [37, 38].

Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri ve aderans dayanımı üzerine agrega tipinin etkisi incelenmiştir. Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından finanse edilmiştir (Proje No: 1984).

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

2.1. Tanım ve Tarihsel Gelişim

Son yıllarda beton konusundaki en önemli gelişmelerden biri, devrim niteliğinde kabul edilen kendiliğinden yerleşen betondur (KYB). Genel bir ifade ile çoğu kaynakta KYB, sıkıştırmak için herhangi bir iç veya dış vibrasyona ihtiyaç duyulmayan bir beton türü olarak tanımlanmaktadır. Başka bir tanıma göre KYB, kendi ağırlığı ile herhangi bir sıkıştırma işlemi gerektirmeden sık donatılı ve aynı zamanda dar, derin kesitlere ayrışma ve terleme yapmadan yerleşen akıcı kıvamlı betondur [24, 39-42].

Beton yapıların dayanıklılık problemi Japonya’da 1983 yılı ve sonraki birkaç yıl için ana ilgi konusu olmuştur. Dayanıklı beton üretimi ise yüksek işçilik sonucu iyi sıkıştırma işlemi gerektiriyordu. Hajime Okamura tarafından 1986 yılında, sıkıştırma işlemi gerektirmeyen ve kendiliğinden kalıba yerleşebilen bir betonun gerekliliği ileri sürüldü ve 1988 yılında KYB’ nin ilk prototipi tamamlandı[19]. KSB konusunda ilk makale, 1989 yılında Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansı’nda (EASEC) sunulmuştur. KSB konusunda ilk kitap Okamura tarafından yazılmış olup, 1993 yılında Japonca olarak yayınlanmıştır. KSB’ un dünyaya tanıtılmasında, Ozawa’ nın 1992 yılında İstanbul’daki Uluslararası CANMET-ACI konferansında yaptığı sunum hızlandırıcı bir etki yapmıştır.

RILEM (Uluslararası Bina Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Uzmanları ve Laboratuvarları Birliği) bu konuda öncü kuruluşlardan biri olmuştur. KYB konusunda raporlar düzenlemiş ve teknik bir komite oluşmasını sağlamıştır. Bu komite dünyanın birçok yerinde sempozyumlar düzenleyerek yaygınlaşmada önemli rol oynamıştır [43].

KYB üretiminde metot geliştirme çalışmaları yapan birçok kuruluş vardır. Bu çalışmalar Tablo 2.1’ de verilmiştir. En fazla kabul gören ve takip edilen KYB ön görüşleri Rilem tarafından yayınlanmış olan EFNARC 2002 ve EFNARC2005’dir [44].

Kendiliğinden yerleşen beton literatürde farklı isimlerle anılmaktadır. Özellikle döşeme tipi, geniş boyutlu yüzeyel alanlarda kullanılması halinde, Kendiliğinden Yüzeylenen Beton (Self Levelling Concrete- **SLC**) adını almaktadır. Kendiliğinden Yüzeylenen Beton’dan kendi ağırlığı ile her 4 metrede 1 mm’den fazla kot farkı oluşturmaksızın, akarak yatay konum alması beklenmektedir [45, 46]. Khayat vd. [47],

Kendiliğinden Konsolide Olan, Çöken Beton (Self-Consolidating Concrete - **SCC**) adını kullanmıştır (Şekil 2.1).

Tablo 2.1.KYB üretiminde metod geliştirme çalışmaları yapan kuruluşlar [48, 49]

1990-1993	Yüksek Performanslı Betonda Çimento Seçimi (JCA: Japon Çimento Üreticileri Birliği)
1992-1994	Süper Akıcı Beton (JCI: Japon Beton Enstitüsü)
1994-1997	Yüksek Akışkanlığa Sahip Beton (JSCE: Japon İnşaat Mühendisleri Odası)
1995-	Kendiliğinden Yerleşen Beton (JSCE)
1997-	Kendiliğinden Yerleşen Beton Üretimi (RILEM: Malzeme ve yapılar için uluslar arası deney ve araştırma birliği)
1999-2002	KYB kullanımı ile üretim rasyonalizasyonu ve çalışma koşullarının iyileştirilmesi (Brite Euram Project: KYB kullanımı ile ilgili çokuluslu proje grubu)
2000-	KYB' nin taze özelliklerini ölçme yöntemleri (Growth Project: KYB kullanımı ile ilgili çokuluslu proje grubu)
2001-	ASTM C 09.47 KYB ile ilgili standart hazırlığı (ASTM: Amerikan Test ve Standart Oluşturma Birliği)
2001-	KYB ile ilgili prefabrike beton üretimine uyarlama kılavuzu hazırlığı (PCI: Amerikan Prefabrike Beton Üreticileri Birliği)
2002-	ACI – 236 B KYB ile ilgili kılavuz doküman hazırlığı (ACI: Amerikan Beton Enstitüsü)
2005-	BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA ve EFNARC



Şekil 2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) [22].

2.2. KYB' nin Avantaj ve Dezavantajları

KYB' nin sağladığı faydalardan bazılarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür :

- Betonda vibrasyonsuz yerleşmeye imkan vermesi,
- Betonun kalıba yaptığı basınç optimum karışımlarla ayarlandığında, vibrasyonda olmadığından kalıp maliyetlerini azaltması,
- Enerji ve zaman tasarrufu sağlaması,
- Gürültü kirliliğini önlemesi,
- İşçilik tasarrufu sağlaması,
- Sık donatılı, dar ve derin kesitli betonarme elemanların üretimine imkân vermesi,
- Boşluksuz ve geçirimsiz beton elemanlar üretilebilmesi,
- Dayanımı ve kalıcılığı yüksek, uzun ömürlü beton elemanların üretilebilmesi,
- İşçilik hatalarından kaynaklanan çok önemli sorunların aşılmasını sağlaması,
- Estetik mimari öğelerin kolayca üretilebilmesi,
- Yüksek miktarda atık toz kullanımına uygun olması,

- Paspayı aparatlarının kullanılması ile birlikte, pürüzsüz bir yüzey elde edilmesini, böylece donatı korozyonunu önlemesi ve sıva-kaplama maliyetlerini azaltması[50, 51].

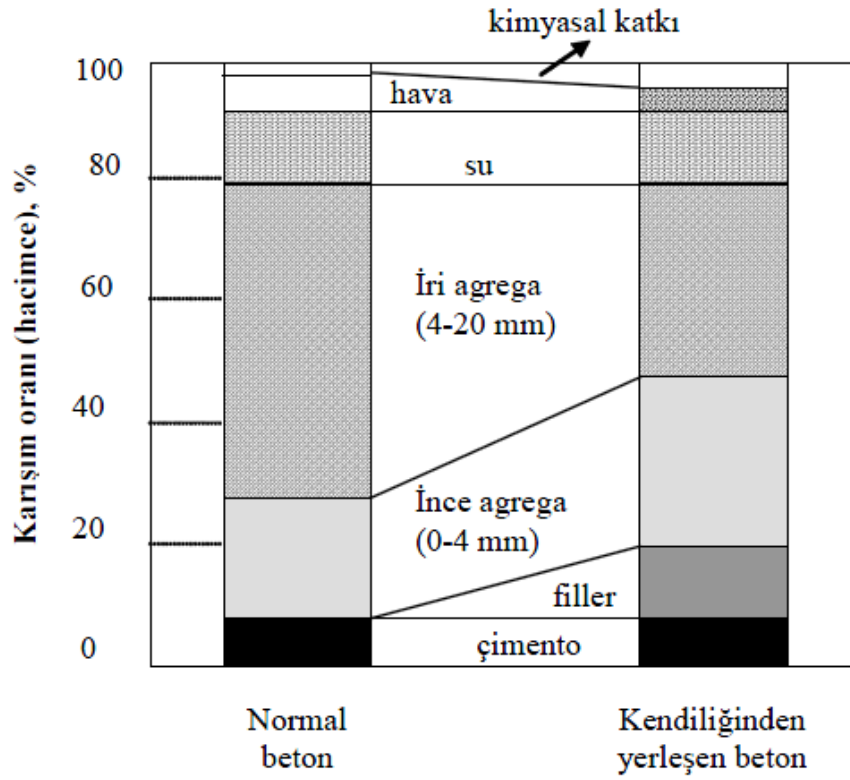
Dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Geleneksel betona göre maliyetinin yüksek olması,
- Üretim ve uygulamasının profesyonel kontrol süreci gerektirmesi,
- Uygulanacağı her yapı için özel karışım oranlarının ve taze beton özelliklerinin belirlenmesi için daha fazla zaman gereksinimi,
- Eksik standartlaşma,
- Her akışkanlaştırıcının farklı etki göstermesi,
- Lifli beton üretiminde kendiliğinden yerleşebilirliğin zor sağlanması,
- Pürüzsüz yüzeyin sıva tutmayabilmesi [52-54].

2.3. KYB Bileşenleri

KYB' nin bileşimi geleneksel betona göre değişiklik gösterir. En büyük fark, ince malzeme miktarının artması ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılmasıdır. Bu ince malzemeler genel olarak betonda kullanımı kanıtlanmış olan silis dumanı, uçucu kül, taş tozu, tuğla tozu ve mermer tozu gibi atık malzemelerdir. Diğer farklılıklar ise; su-bağlayıcı oranı, en büyük agrega boyutu, kum-toplam agrega oranı ve toplam iri agrega miktarıdır. Kullanılan bu malzemelerle, taze betona kendiliğinden yerleşebilirlik, sertleşmiş betona ise yüksek performans özellikleri kazandırılmaya çalışılır [55-57].

Bunun yanında, KYB' deki iri agrega miktarı da normal betondakine göre daha az olup, iri agreganın yerini genellikle ince agregalar almaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Normal betonla KYB' nin karşılaştırılması [58, 59]

Karışımında yer alacak her malzeme farklı bir özellik göstereceğinden, KYB üretiminde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu özelliklerin bilinmesi ile ancak optimum karışım oranları belirlenebilir [60].

EFNARC tarafından önerilen KYB karışım oranları Tablo2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 EFNARC tarafından önerilen KYB karışım oranları [22]

Bileşen	Kütlece tipik aralık (kg/m ³)	Hacimce tipik aralık (litre/m ³)
Toz	380-600	
Hamur		300-380
Su	150-210	150-210
İri agregat	750-1000	270-360
İnce agregat (kum)	Bu miktar diğer bileşenlerin hacmini dengeler, tipik olarak toplam agregat ağırlığının %48-%55'idir.	
Hacimce su/toz oranı		0.85-1.10

2.3.1. Agrega

Agrega betonun ana bileşenlerindendir. Bu nedenle karışımda agregâ ile ilgili en uygun değerlerin kullanılması beton dayanımını ve dayanıklılığını olumlu yönde etkileyecektir. Çakıl ve kum oranı, agregâ tipi, en büyük dane çapı ve granülometri gibi özellikler normal betonda olduğu gibi KYB' nin de taze ve sertleşmiş beton özelliklerinde direkt etkilidir [61].

KYB' nin işlenebilirliği üzerinde agregâ boyutu ve türü önemli rol oynamaktadır.

KYB üretiminde kullanılacak agregâ, mineralojik köken açısından normal betonda kullanılabilecek özellikte olmalıdır. Kırma kireçtaşı iri agregâ olarak kullanılabilir. Doğal kum, kırma kuma göre işlenebilirlik açısından daha avantajlıdır. Aynı şekilde iri agregâ olarak dere çakılı kullanılması iç sürtünmeyi azalttığı için akışkanlığı artırır [62, 63].

Günümüzde KYB için kılavuz olan EFNARC' da Agregâ boyutu olarak 20 mm tane çapı üzerindeki agregaların kullanılmaması öngörülmekteyse de bu konuda kesin bir rakam verilmemiştir. Ancak KYB özeliği gereği akışkanlığını ve sık donatılar arasından geçebilme yeteneğini gösterebilmesi gereklidir. Bazı çalışmalarda KYB' nin özelliklerini en iyi şekilde gösterebilmesi için en büyük agregâ tane boyutunun 16 mm olduğu görülmektedir. Ayrıca geleneksel betondan farklı olarak kum oranı da arttırılmakta, buna karşılık iri agregâ miktarı azaltılmaktadır. Diğer yandan 0.125 mm elek altında kalan agregalar ince malzeme miktarına ilave edilmektedir [64, 65].

2.3.2. Çimento

Geleneksel betonda kullanılan tüm çimentolar KYB için de kullanılabilir. Sağlam vd., 2004 ve Özkul, 2002, yaptıkları çalışmada KYB ile CEM I 42,5 tipi çimento kullanımını öngörmüşlerdir. Çimento dozajının 350 ile 450 arasında olması önerilmektedir. Dozajın 350'den az olması durumunda betonun kendiliğinden yerleşebilirlik için ihtiyaç duyduğu ince malzeme miktarı ve betondaki bağlayıcı miktarının azalmasıyla betonun dayanım ve dayanıklılığı azalacaktır. 350 kg/m³'ün altında kullanımı, ilave fillerle veya viskozite arttırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılması halinde uygundur. Çimento dozajının 500'den fazla olması durumunda ise rötire oluşumu artarak kılcal çatlaklar oluşacaktır. Eğer viskozite ayarlayıcı kimyasal katkı kullanılmıyorsa, kendiliğinden

yerleşen betonda toplam toz madde miktarı hiçbir zaman 500kg/m^3 'ün altına inmemelidir [65-67].

Çimentonun C_3A oranı % 10'un üzerindeyse, kullanılmaması EFNARC[22], tarafından tavsiye edilmektedir. Yüksek C_3A oranı, hızlı etrenjitoluşumu ve hidrasyon ısısı artışından kaynaklanan su buharlaşması nedenleriyle işlenebilirlik kaybına sebep olacağından, taşıma ve yerleştirme sırasında betonun kendiliğinden yerleşebilme özelliklerini hızla kaybetmesine sebep olur. Kimyasal etkiler, özellikle sülfat saldırısı açısından da C_3A 'sı fazla çimento kullanmak sakıncalıdır.

2.3.3. Mineral Katkı

KYB' nin taze haldeki şartları nedeniyle, puzolanik olmayan ve puzolanik/hidrolik mineral katkıları, ayrışma ve kohezyon direnci sağlamak ve arttırmak için yaygın olarak kullanılır. Tane boyutları $0.125\ \mu$ dan daha azdır. Bu ilave mineral katkı, hidrasyon ısısını ve termal büzülmesini azaltmak için çimento miktarını da düzenler. Harcın agregaları daha iyi sarmasını sağlar. Toz malzeme oranının 400 ila $650\ \text{kg/m}^3$ arasında olması, kum ve agrega tanecikleri arasındaki boşlukların doldurulması ve daha iyi sıkışma sağlanması için önerilmektedir. Toz malzemenin doldurma kapasitesini arttırmak için eş boyutlu, çok küçük çaplı öğütülmüş halde kullanılması mümkündür [22, 68].

EFNARC' a göre Mineral katkıları suyla reaksiyon kapasitelerine göre Tablo 2.3' daki gibi sınıflandırılırlar.

Tablo 2.3.Mineral katkıların suyla reaksiyon kapasitelerine göre sınıflandırılması

TİP I	Puzolanik olmayan yada yarı puzolanik	• Mineral filler (kireçtaşı, dolomit vs.) • Pigmentler
TİP II	Puzolanik	• EN 450'ye uygun uçucu kül • EN 13263'e uygun silis dumanı
	Hidrolik	• Yüksek fırın cürufu

2.3.3.1. Silis Dumanı

Kuars, silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır.

Üretim işleminde gazlar oluşmaktadır. Bunların çok büyük miktarı SiO ’dur. Gaz halindeki SiO , fırının soğuk bölgelerinde havayla temas ederek ve çok çabuk yoğunlaşarak, amorf yapıya sahip SiO_2 durumuna dönüşmektedir. Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucu elde edilen %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye silis dumanı adı verilmektedir [69].

Puzolanlar gibi C_3S ve C_2S hidratasyonundan gelen serbest kireci bağlar ve ilave kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşumuna neden olur. Buradaki CSH yapısı normal çimento hidratasyonundan oluşan CSH yapısından farklıdır. Silis dumanı kullanımı yüzey alanı artışıyla kimyasal katkı absorpsiyonunu arttırdığından katkının efektifliğini azaltır [24]. Bu nedenle silis dumanı, diğer puzolanlar gibi yüksek dozajlarda kullanılmamalıdır. Silis dumanı için en yüksek dozaj, çimento ağırlığının %15’i, optimum dozaj ise % 10’u kadardır. Bu değerin geçilmesi halinde hızlı işlenebilirlik kaybı ve yükselen hidratasyon ısısı sebebiyle uygulamada zorluklar yaşanabilir [70].

Silis dumanındaki %85’ in üzerindeki SiO_2 ’ nin yanı sıra başka maddeler de bulunabilmektedir. Tablo 2.4 ABD, Norveç ve Türkiye’ de üretilen silis dumanlarının kimyasal bileşenlerini vermektedir [69].

Tablo 2.4. Silis dumanlarının kimyasal bileşenleri

İçerik	ABD	Norveç	Türkiye
SiO_2	90-93	90-96	93-95
C	1.3-2.6	0.5-1.4	0.8-1.0
Fe_2O_3	0.4-0.7	0.2-0.8	0.4-1.0
Al_2O_3	0.5-1.6	0.5-3.0	0.4-1.4
MgO	0.3-0.5	0.5-1.5	1.0-1.5
CaO	0.5-0.8	0.1-0.5	0.6-1.0
Na_2O	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.4
K_2O	1.0-1.2	0.4-1.0	0.5-1.0
S	0.1-0.2	0.1-0.4	0.1-0.3
Kızdırma Kaybı	1.4-2.8	0.7-2.5	0.5-1.0

2.3.3.2. Uçucu Kül

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için kömür, çok ince olarak öğütülüp havayla birlikte buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla yakıt olarak püskürtülür. Pulverize kömürün yanmasıyla büyük miktarı çok ince olan kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Atık malzeme olarak gazlarla birlikte uçarak bacadan dışarı çıkan bu çok ince taneli küllere uçucu kül denilmektedir. Gazlarla birlikte dışarı çıkan ve çevreye büyük miktarda zarar vermesi kaçınılmaz olan bu uçucu küller, elektrostatik veya elektromekanik yöntemlerle tutularak silolarda depolanmaktadır.

Uçucu küller çok yüksek oranlarda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içermektedir. Bunlardan başka bir miktar CaO , MgO , C (çok ince taneli yanmamış kömür) ve Na_2O da içermektedir. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli oldukları için uçucu küller, puzolanik özellik göstermektedirler ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcı gibi davranmaktadırlar [69].

Uçucu Küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C618 ve TS EN 197-1 standartları temel alınmaktadır [71-73].

ASTM C618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

- F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10 altında olduğu için düşük kireçli olarak adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50' den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğinin yanı sıra bağlayıcı özelliğe sahiptirler.

TS EN 197-1' e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar

- V sınıfı uçucu küller, çoğunlukla puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10' dan az reaktif silis miktarının %25' den fazla olmaması gerekmektedir.

- W sınıfı küller ise, hidrolik ve /veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ’ den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşeni içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’ dan fazla, silis miktarının da %25’ den fazla olması gerekmektedir.

Küresel mikro yapısı nedeniyle KYB üretiminde kullanılması uygundur. Bilindiği gibi uçucu küllerin kimyasal bileşenlerinin oranları ve fiziksel özellikleri farklılıklar göstermektedirler. Birçok uçucu kül tipinin KYB üretiminde olumlu özellikler gösterdiği bilinmekle birlikte, deneme karışımları ile ayrıca özellikleri belirlenmelidir [74-76].

2.3.4. Kimyasal Katkı

Kimyasal katkıları, betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi sırasında betona, çimento miktarının %5’ini geçmemek üzere eklenen ve çoğunlukla sıvı halde bulunan maddeler olarak tanımlanır.

Başlıca kimyasal katkıları şu şekilde sınıflandırılabilir;

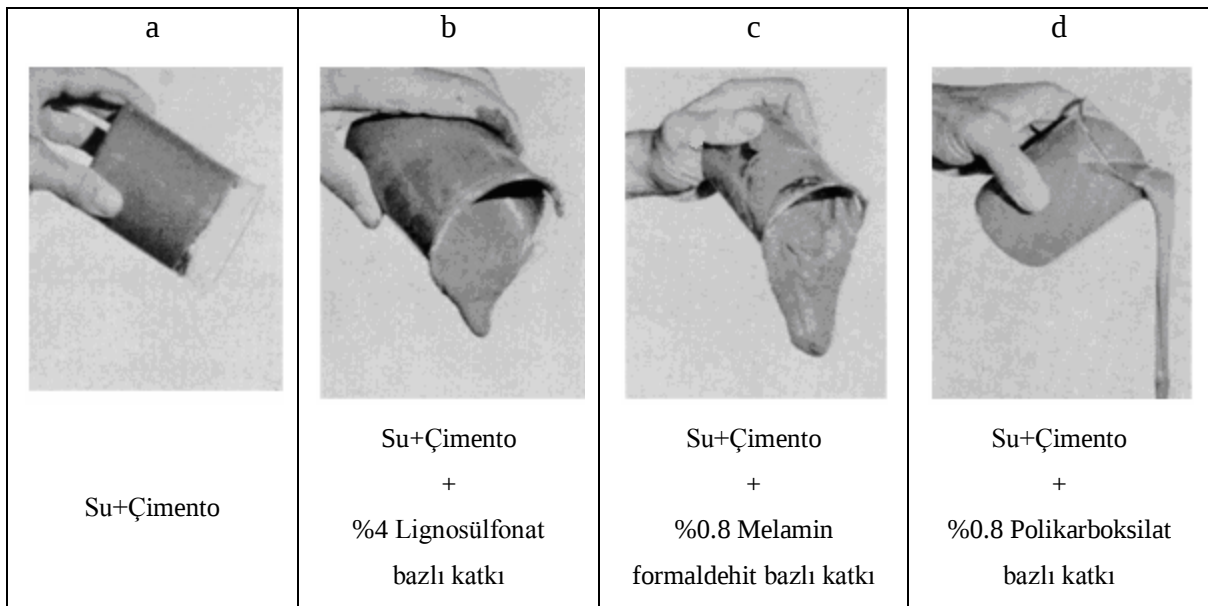
- Akışkanlaştırıcı,
- Priz kontrol edici,
- Viskozite arttırıcı,
- Hava sürükleyici,
- Hava uzaklaştırıcı.

Betonun, KYB özelliğini gösterebilmesi için iki koşulu bir arada sağlaması gerekmektedir. Bunlardan birincisi; kayma eşiğinin küçük olmasında dolayı yüksek işlenebilirlik (şekil değiştirebilme). İkincisi ise, ayrışmaya karşı yüksek direnç sağlamaktır. Birinci koşulun, su miktarını artırarak sağlanması durumunda betonun kararlılığı bozulmakta, yani ayrışma eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bu olumsuz durum, ancak etkili bir kimyasal akışkanlaştırıcı (süperakışkanlaştırıcı) kullanımıyla düzeltilir. Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıları polikarboksilat bazlı katkılarıdır. KYB üretiminde kimyasal katkı olarak naftalin sülfonat formaldehit, melaminsülfonat formaldehit polikondanseleri, vinil kopolimerler ve polikarboksilik asit bazlı katkıları da kullanılabilir [77, 65]

Çimento ile kimyasal katkıları arasındaki etkileşim fizikseldir. Katkısız çimento hamuru, karma oksitlerinin elektro-potansiyellikleri gereği, birbirlerini elektrostatik etkiyle

çekerek topaklaşır. C_3S ve C_2S negatif zeta potansiyeline sahipken, C_3A ve C_4AF pozitif zeta potansiyeline sahiptir. Bu da çimento taneciklerinin su veya nem ile temas ettiğinde topaklaşmasına sebep olur. Katkı ilavesi ile tüm çimento karma oksitlerinin negatif zeta potansiyeline sahip olduğu deneysel olarak ortaya konulmuştur [78-81]. Tüm bileşenlerin negatif yüklenmesi topaklaşmayı önler.

KYB tasarımında kullanılan polikarboksilat bazlı katkıların, lignosülfonatlar, melamin ve naftalin formaldehitlere göre akışkanlığı arttırma açısından önemli üstünlükleri vardır. Şekil 2.3a, b, c ve d’ de görülen çimento hamuru karışımlarının tümünün S/Ç oranları eşittir.



Şekil 2.3. Kimyasal katkı tipinin akışkanlık arttırıcı etkisi

Şekil 2.3c ve d’de görüldüğü gibi, aynı dozajda katkı kullanımında polikarboksilat bazlı katkılar akışkanlığı arttırmada daha etkilidirler. Şekil 2.3b’de görülen lignosülfonat bazlı katkının dozajının % 0.4’ de tutulmasının sebebi daha yüksek dozajlarda bu katkının priz geciktirici özelliğinin bulunmasıdır [59].

2.3.5. Karışım Suyu

Beton karışım suyu TS EN 1008’ e uygun olmalıdır. Endüstrisinden elde edilen atık sular, karma suyu olarak kullanılacaksa, bu suların içeriğine dikkat edilmeli ve mutlaka KYB için deneme karışımları yapılmalıdır [82].

2.4. KYB Test Metotları

Betonun, KYB olarak tanımlanabilmesi için doldurma kabiliyeti, geçme kabiliyeti ve ayrışmaya karşı direncinin belirli sınır değerler içinde kalması gerekmektedir. Bunun için çeşitli deney metotları geliştirilmiştir. Tablo 2.5’ de en yaygın olan deney yöntemleri verilmiştir. Avrupa’da en yaygın kullanılan yöntemler çökme-yayılma, T_{50} (T_{500}), V-hunisi, L-kutusu ve Elek ayrışma deneyleridir [22]. Hiçbir deney tek başına parametreleri belirleyemez, bu yüzden KYB tasarımı yapabilmek için bu deneylerin birleşimi gerekmektedir.

Tablo 2.5 .KYB Test Metotları

İstenilen özellik	Test Metodu	Ölçülen Değer
Akıcılık / doldurma yeteneği	Çökme-akma	Toplam yayılma
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
Viskozite / akıcılık	T_{50} süresi	Akma zamanı
	V-hunisi	Akma zamanı
	O-hunisi	Akma zamanı
	Orimet	Akma zamanı
Geçme yeteneği	L-kutusu	Geçme oranı
	U-kutusu	Yükseklik farkı
	J-halkası	Kademeli yükseklik, toplam akma
	Kajima kutusu	Görsel geçme yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışması	Terleme yüzdesi
	Oturma kolonu	Ayrışma yüzdesi

KYB’ lerin kendiliğinden sıkışabilirlik sınır değerleri, önerilen taze beton deney yöntemlerinden faydalanarak elde edilen sınıflandırmalara göre EFNARC tarafından tespit edilmiştir. Bu sınıflandırmalar Tablo2.6’ daki gibidir.

Tablo 2.6.Taze beton deney yöntemlerine göre yapılan sınıflandırma

	Sınıf	Çökme-yayılma (mm)	T ₅₀ (sn)	V-hunisi (sn)	Geçme yeteneği	Ayrışma direnci(%)
Çökme- yayılma sınıfı	SF1	55-65				
	SF2	66-75				
	SF3	76-85				
Viskozite sınıfı	VS1/ VF1		≤2	≤8		
	VS2/ VF2		>2	9-25		
Geçme sınıfı	PA1				≥0,80 (2 donatı)	
	PA2				≥0,80 (3 donatı)	
Ayrışma direnci	SR1					≤ 20
	SR2					≤15

Çökme-yayılma sınıfları:

1. SF1:

- Uzun yatay akışları engellemeyecek kadar küçük kesitlerde (kazıklar ve bazı derin temeller),
- Pompa enjeksiyon ile döküm yapılırken (tünel kaplaması),
- Salınma noktasından serbest yer değiştirmeye üstten dökülen donatısız yada çok az donatılı yapılarda (konut döşemeleri) kullanılır.

2. SF2: Pek çok normal uygulama için uygundur (duvarlar, kolonlar).

3. SF3:

- Maksimum agrega boyutu 16'mm den küçük agregalarla üretilir,
- Ayrışma direncini kontrol etmek zordur,
- Çok yoğun donatılı yapılarda,
- Karmaşık şekillere sahip binalarda düşey uygulamalar için,

- Kalıp altından doldurmalarında kullanılır.

Viskozite Sınıfları:

1. VS1/VF1:

- Çok yoğun donatıda bile iyi doldurma yeteneğine sahiptir,
- Kendi kendine seviyelenme çok iyi olduğu için pürüzsüz yüzeyler elde etmek için de iyidir,
- İnce malzemeyi kuma ve ayrışma ihtimali yüksektir.

2. VS2/VF1:

- Sınıfının üst limiti yoktur,
- Akma zamanının artmasıyla, tiksotropik (viskozitedeki zamana bağlı değişim) etkilerin sergilenme olasılığı da artar.

Dar Engeller Arasından Geçme Sınıfları:

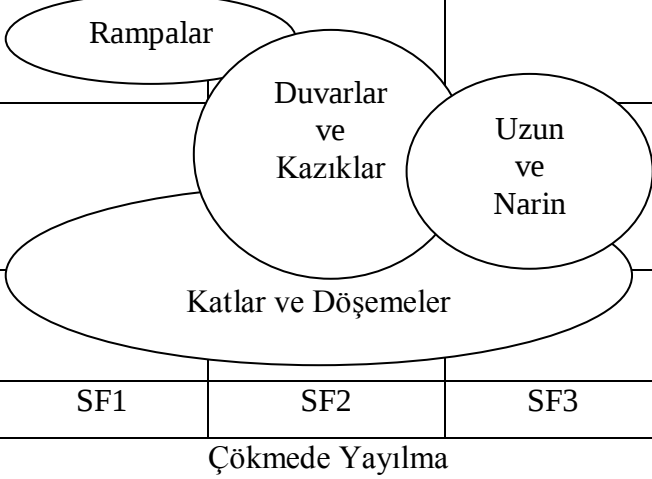
1. PA1: 80-100 mm donatı aralıklı yapılar (konut ve düşey yapılar gibi) için uygundur.
2. PA2: 60-80 mm donatı aralıklı yapılar (inşaat mühendisliği yapıları) için uygundur.

Ayrışma Direnci Sınıfları:

1. SR1: Genellikle ince döşemeler için ve 5 m' den daha az bir akma mesafesi ve 80 mm' den daha büyük sınırlı aralığı olan düşey uygulamalar için uygundur.
2. SR2: Akma ayrışmayı kontrol altına almak için 5 m' den daha az bir akma mesafesi ve 80 mm' den daha büyük sınırlı aralığı olan düşey uygulamalar için uygundur.

Aşağıdaki Tablo 2.7' de farklı uygulamalardaki KYB' yi belirlemek için düşünülen başlangıç parametrelerini ve sınıflarını vurgulamaktadır.

Tablo 2.7. Çeşitli uygulama alanları için KYB kıvam özellikleri [83]

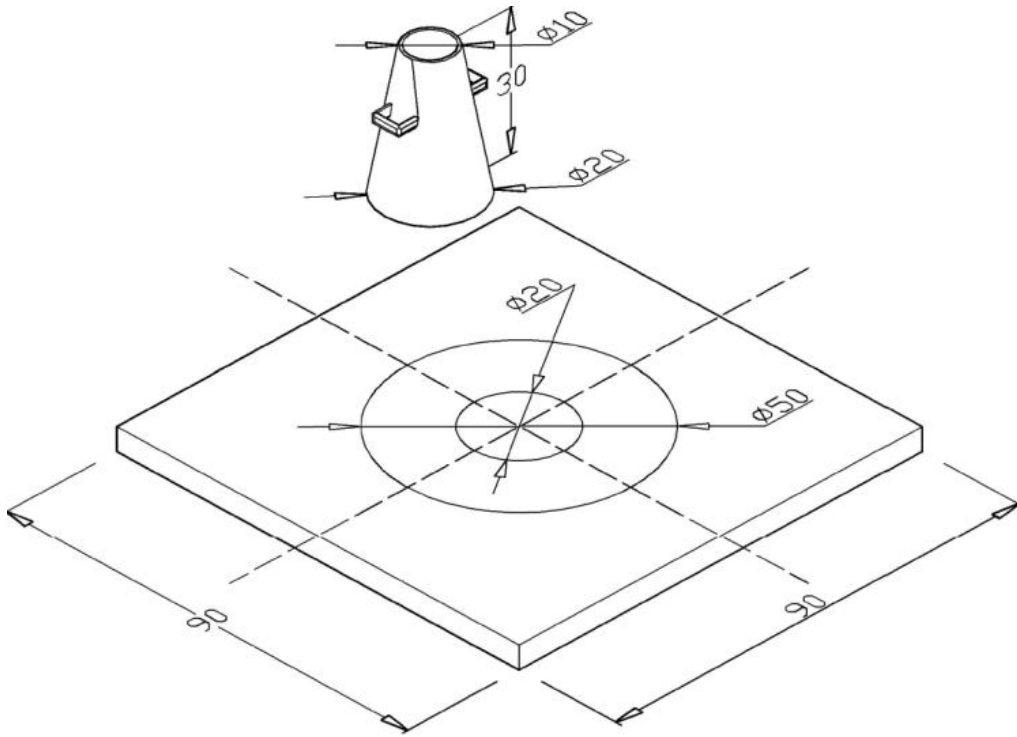
Viskozite				Ayrışma Direnci veya Geçme yeteneği
VS2 VF2				SF1 ve SF2 için geçme yeteneğini belirtmek
VS1 veya VS2 VF1 veya VF2 Yada hedef değer				SF3 için SR Belirlemek
VS1 VF1				SF2 ve SF3 için SR belirlemek
	SF1	SF2	SF3	
	Çökmede Yayılma			

2.4.1. Çökme-Yayılma ve T_{50} Zamanı Deneyi

Çökme-yayılma ve T_{50} zamanı deneyi, KYB' nin, bir engel olmaksızın akma oranını ve akabilirliğini belirleyen bir deneydir. Deney için 90x90 cm ebatlarında su geçirmeyen, çimento hamurundan etkilenmeyen ve paslanma eğiliminde olmayan sert malzemeden yapılmış (çelik veya kontrplak) pürüzsüz bir tabakaya, akış zamanını kaydetmek için kronometre ve slump hunisine ihtiyaç vardır.

Pürüzsüz tabakanın merkezine Şekil 2.4'de görüldüğü gibi Ø20 cm ve Ø 50 cm çaplı daireler çizilir. Tabaka ve huni ıslak bir bezle silinir, tabakada kuru yer kalmayacağı gibi su artığı da olmamalıdır. Temizlenmiş tabaka sabit ve dengeli bir şekilde yerleştirilir. Huni 20 cm' lik dairenin içerisine yerleştirilerek şişleme yapılmadan doldurulur. Huninin hidrostatik basınç etkisiyle yukarı kalkmasını ve betonun sızmasını engellemek için doldurma sırasında huniyi tabakaya doğru bastırmak gerekir. Huni 30 sn'den fazla bekletilmeden tabakaya dik olarak tek bir hareketle yukarı doğru kaldırılır. T_{50} değeri için, huninin tabaka ile bağlantısının koptuğu anda kronometre başlatılır ve harç 50 cm halkasına ilk değdiği anda durdurulur ve bu değer kaydedilir. Yayılma tamamlanıncaya kadar beklenir. Bu değer taze betonun akış hızını belirler ve plastik viskozite ile

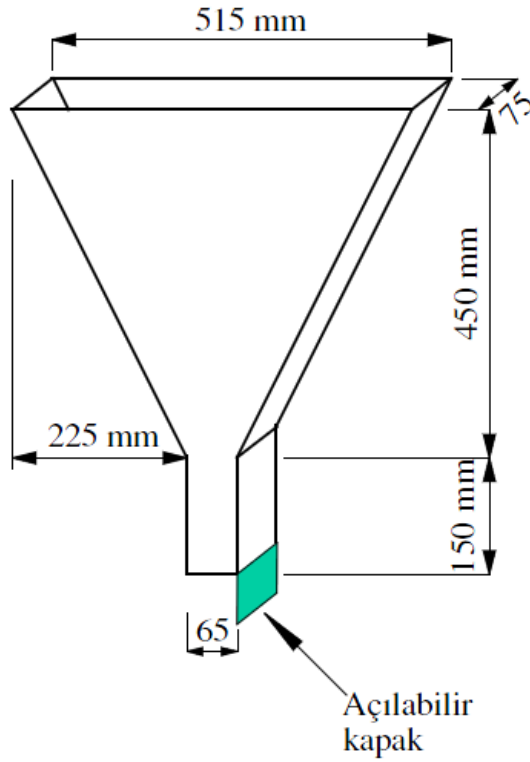
ilişkilendirilmektedir. Harcın 50 cm çapa ulaşma süresi T_{50} olarak adlandırılır. Viskozitesi yüksek karışımlarda yayılmanın tamamlanması için birkaç dakika beklemek gerekebilir. Yayılma durunca birbirine dik iki çap ölçülerek deney tamamlanır. Bu çaplar arasındaki fark 5cm'den fazla ise deney tekrarlanmalıdır [22]. Dowson' a göre, yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda, kendiliğinden yerleşebilirlik için yayılma değerinin 65-80 cm arasında ve T_{50} süresinin 3sn' den fazla olmaması şartını önermiştir [84].



Şekil 2.4. Çökme-yayılma ve T_{50} zamanı deney düzeneği

2.4.2. V Hunisi Deneyi

V Şeklinde olan akış hunisi, taze beton viskozitesini ölçmek amacıyla kullanılır. Boyutları Şekil 2.5'de verilen huninin orifis çıkışı 15cm uzunluğundadır. Deneyde 10 litre harç kullanılır, agreg a çapı en fazla 20 mm olmalıdır. Daha büyük agreg a çapları içeren karışımlar için orifis ağzının modifiye edilmesi gerekmektedir. Örneğin, 32 mm maksimum agreg a çapına sahip beton karışımları için 7.5 x 7.5 cm' lik orifis ağzı kullanılır [85].



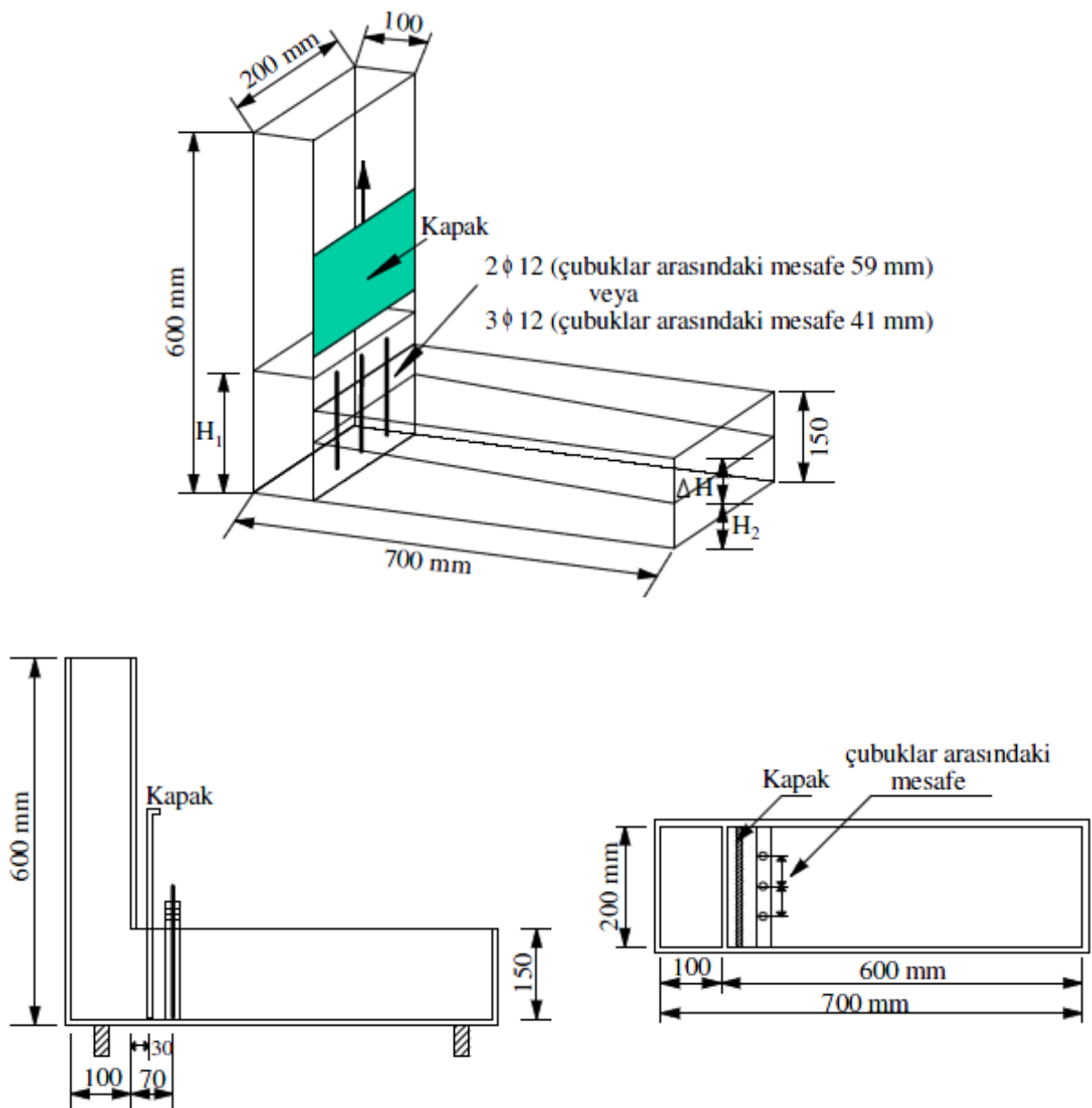
Şekil 2.5. V hunisi

Deney yapılırken, V hunisinin içi ıslak havlu veya sünger ile silinir. Huni dik olarak sabit kalacak şekilde yerleştirilir ve KYB ile herhangi bir sıkıştırma yapmadan doldurulur. 10 ± 2 s'lik bir beklemeden sonra kapak açılır. Kapağın açıldığında süre başlatılır. Kabın üst kısmından içerisine doğru bakılınca, harç akıp ışık görüldüğü anda kronometre durdurularak süre ölçülmüş olur. Khurana ve Topçu, maksimum tane çapı 15 mm olan KYB'lerin V hunisi akış süresinin 8-12 sn, maksimum tane çapı 18 mm olanlarda ise 11-15 sn arasında olmasını önermektedir [86].

Beş dakika gecikmeli V hunisi deneyinde ise V-hunisi akış süresi deneyi yapıldıktan hemen sonra, v hunisi yıkanmadan yeniden taze betonla doldurularak 5 dakika bekletilir ve deney tekrarlanır. Statik ayrışma direnci ölçülür. Bu sırada taze beton yeterli stabiliteye sahip değilse, ayrışma meydana gelir. iri agrega çökelerek bloke olur. 5 dakika sonunda orifis ağzı açılarak akış süresi belirlenir. İlk andaki akış süresine göre 3 saniyeden fazla uzama varsa bu durum statik ayrışma olduğuna işarettir.

2.4.3. L Kutusu Deneyi

Bu metotla taze haldeki KYB' nin donatılar arasından geçiş yeteneği belirlenir. L kutusu ilk olarak Petersson tarafından Japonya'da bir su altı beton dizaynının yapımında kullanılmıştır. L şeklinde yatay ve düşey prizmatik dikdörtgen bölümlerden oluşan aparat Şekil 2.6'dagörülmektedir. Yatay ve düşey prizmalar arasındaki geçiş kesitinde 41-59 mm aralıklarla iki veya üç düz çelik çubuk ve bir kapak vardır. Donatılar arası mesafe en büyük agrega çapının 3 katından az olmamalıdır. Agrega çapına göre donatı aralıkları değiştirilerek aparat modifiye edilebilir [18].



Şekil 2.6. L kutusu deney aparatı

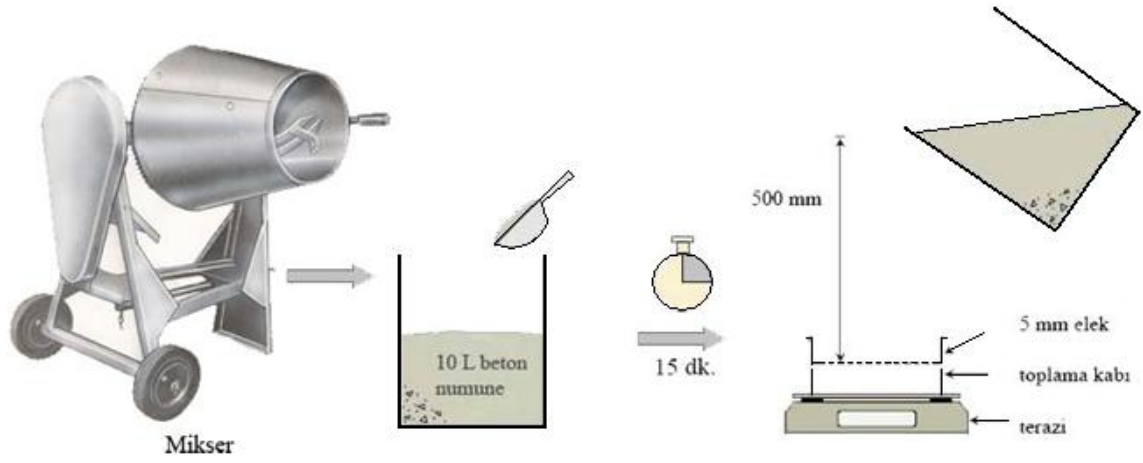
Deney yapılırken L kutusu düzgün ve dengeli bir şekilde yerleştirilir. L kutusunun dikey bölümü 12,7 lt taze KYB ile doldurulur. Beton doldurulduktan 1 dk (± 10 sn) sonra kapak kaldırılarak betonun, L kutusunun dikey bölümden yatay bölüme akması sağlanır. Taze betonun hareketi durduğunda yatay kısmın başındaki (H_1) ve sonundaki beton derinlikleri (H_2) ölçülür. Bu yükseklikler arası oran (H_2/H_1) hesaplanır. Bu değer L kutusu oranı (bloklaşma oranı) olarak adlandırılır. L-kutusu oranı su gibi çok akışkan bir malzemede 1'e eşit olur [87], bu değer 0.8'den küçük olması halinde agreganın bloke olma riski olduğunu belirtmiştir. Fakat Bernabeu ve Laborde, yaptıkları deneylerde L kutusu oranı 0.65 olan karışımların (Yayılma çapı 60 cm) sık donatılı kalıbı rahatlıkla doldurduğunu rapor etmiştir.

2.4.4. Elek Ayırma Direnci Testi

Betonun ayırma direnci, betonun taze haldeyken yerleşmesi, geçiş kabiliyeti ve sertleştikten sonra yüzey düzgünlüğü için önemlidir. Ayırma, agrega tane dağılımı, toz malzeme çeşidi ve miktarı, S/Ç oranı ve süperakışkanlaştırıcı gibi birbiri ile ilişkili olan birçok parametreye bağlıdır. Ayırmanın olmaması için, uygulama ve döküm şartlarına uygun karışım elde edilmelidir. Ayırma belirli bir seviyeye kadar kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Bu sınırlar, KYB' nin kullanılacağı yapıya göre belirlenmelidir. Ayırma olup olmadığı ve yaklaşık olarak ayırma düzeyinin ne olduğu, doldurma ve geçiş kabiliyeti deneylerinde de gözlemsel olarak belirlenir. Ancak kesin sonuçlar ayırma direnci deneyleri ile bulunabilir [44].

Şekil 2.7' de görünen deney düzeneğinde tabanı 5 mm' lik kare göz açıklıklı 30 cm çaplı elek kullanılmaktadır. Bu deney için 10 lt harç hazırlanır. Hazırlanan harç kapaklı kovada 15 dk bekletilir. 15 dk sonunda kovanın kapağı açılarak, yüzeyde su kusması olup olmadığı kaydedildikten sonra 4.8 ± 0.2 kg harç 50 cm yükseklikten eleğin ortasına dökülür. Elekten harcın geçmesini sağlamak amacıyla herhangi bir sarsma yapılmadan 2 dk beklenir. Sonuç olarak, elek üstünde kalan harç ağırlığı (W_a) ve elekten geçen harç (W_p) kaydedilir. Elekten geçen numunenin yüzde oranı;

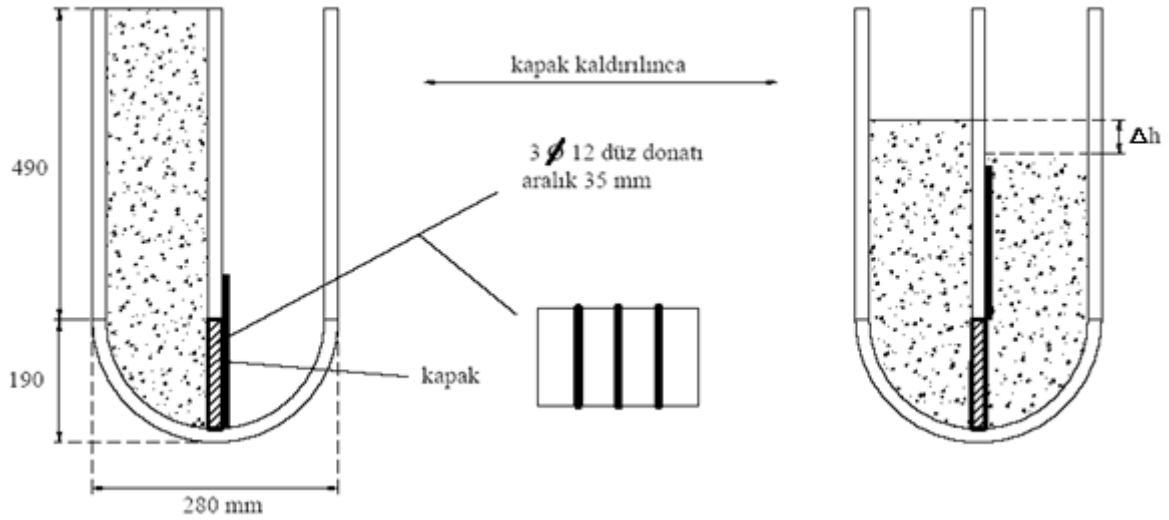
$$\text{Ayırma oranı} = \frac{W_p}{W_a + W_p} \quad \text{olarak hesaplanır [18].} \quad (2.1)$$



Şekil 2.7. Elek ayırma direnci testi

2.4.5. U Kutusu Deneyi

Betonun geçiş kabiliyetini ölçen etkili bir metottur. Kutunun bir tarafına beton doldurulduktan sonra aradaki kapak açılır, iki seviye arasındaki fark veya oran geçiş kabiliyeti olarak tanımlanır. Şekil 2.8’de deney aparatının boyutları ve kullanım şekli görülmektedir.

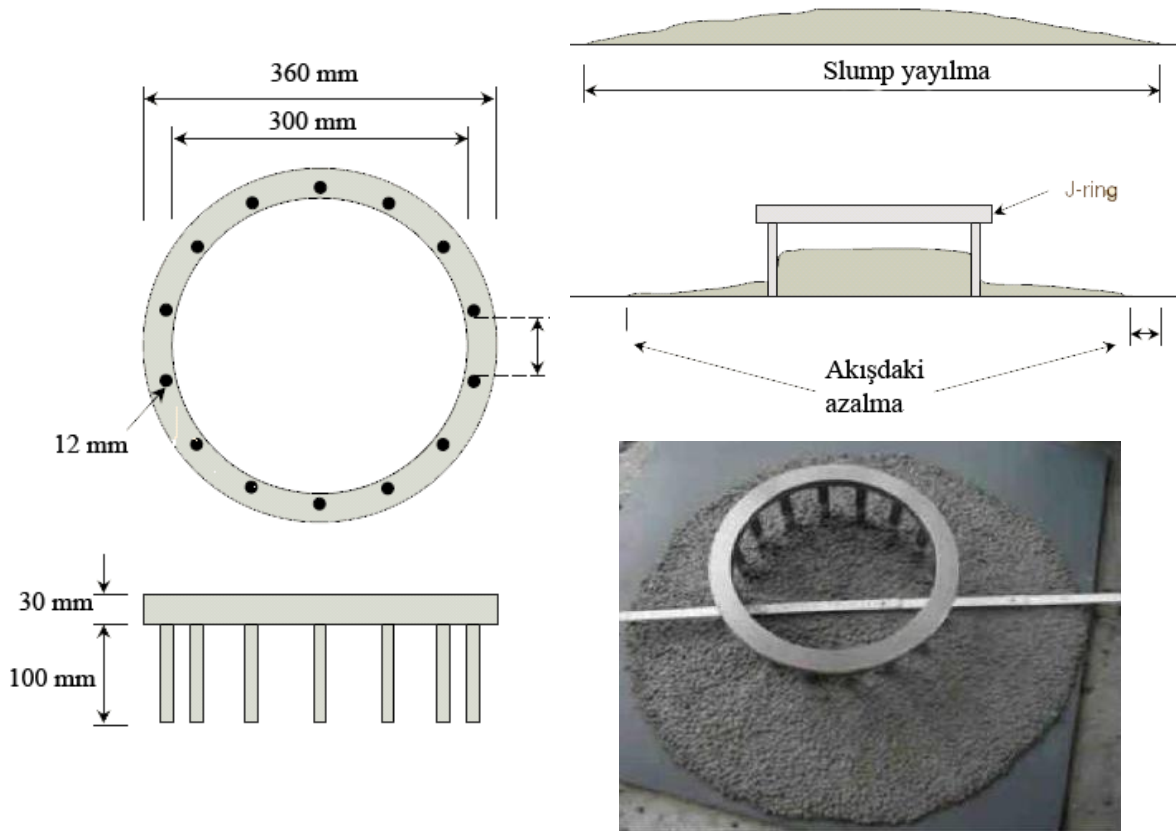


Şekil 2.8. U kutusu deney aparatı

U kutusu, su ile doldurulursa iki seviye arasındaki fark 0, oran ise 1’e eşit olur. Kollar arasındaki fark ne kadar az olursa, betonun geçiş yeteneği o kadar fazladır. Farkın 3 cm’den az olması veya diğer koldaki yükselmenin 30 cm ve üzeri olması geçiş yeteneğinin iyi olduğunu gösterir [67, 88].

2.4.6. J Halkası Deneyi

J halkası deneyi, yayılma deneyi ile bir arada uygulanır. Aparatın felsefesi Japonya'da oluşturulmuşsa da bu aparatla ilk deneyler Paisley Üniversitesi'nde yapılmıştır. Aparat Şekil 2.9' da görüldüğü gibi 30 cm çaplı halkaya sabit aralıklarla, 12 mm çaplı dikey çelik çubukların bağlanmasıyla yapılmıştır. Çubuk çapları çalışmalara göre farklılık gösterebilir. Bu çubuklar donatıları temsil etmektedir. Çubuklar arası açıklık, kullanılacak betonun maksimum agregâ çapının 3 katından az olmamalıdır. [18, 88].



Şekil 2.9. J halkası deney aparatı

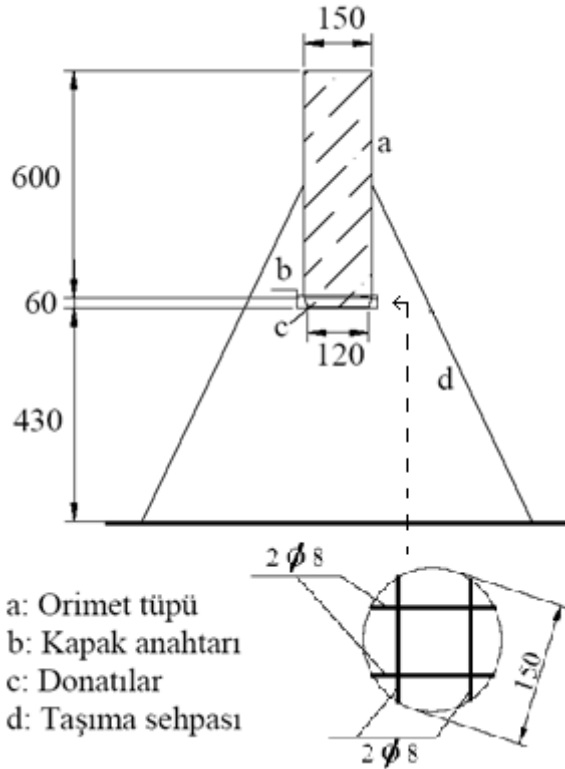
J-halkası içerisinde kalan beton yüksekliği ile, halka dışında kalan beton yüksekliğinin farkından bloklaşma derecesi (stj) elde edilir. J halkası dışındaki ölçüm, alınan ölçümlerin aritmetik ortalamasıdır. J-halkası içerisinde bloklaşma nedeniyle kalan beton hacminin (Vblok) toplam beton hacmine (Vc) oranlanmasıyla bloklaşma indeksi aşağıdaki Denklem 2.2' den hesaplanabilir.

$$\beta_j = \frac{V_{blok}}{V_c} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} st_j}{V_c} \quad (2.2)$$

Eşitlikte; β_j , betonun bloklaşma indeksini; D, bloklaşan betonun çapını simgelemektedir. [63].

2.4.7. Orimet Deneyi

Bu deney, çelikten yapılmış 60 cm uzunluğunda ve 8 – 12 cm çapında bir tüp ve tüpün altında açılabilir bir kapaktan oluşur (Şekil 2.10). Bu aparatta farklı çaptaki iri agregalara göre boru çapı ve orifis ayarlanabilmektedir. Deneye başlarken tüpün içi nemlendirilir. Tüp dengeli hale getirildikten sonra V hunisindeki gibi içerisi KYB ile doldurulur ve 10 ± 2 saniyelik beklemeden sonra kapak açılır. KYB' nin tüpü terk etme süresi kaydedilir [44, 89].



Şekil 2.10. Orimet deney aparatı

2.5. KYB' nin Karakteristik Özellikleri

Aynı basınç dayanımlarına sahip KYB ve geleneksel vibrasyonlu beton birbiriyle kıyaslanabilir özelliklere sahiptir. Eğer farklılıklar varsa, bu farklılıklar tasarım kodlarının temel alındığı güvenli varsayımlar içindedir. Fakat KYB' nin bileşimi geleneksel vibrasyonlu betonunkinden farklılıklar gösterir. Bu nedenle gözlemlenebilecek herhangi bir küçük farklılık aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

Dayanıklılık, beton bir yapının tasarım ömrü boyunca çevresel etkilere karşı gerekli performansında bir azalma olmadan dayanma yeteneği, genellikle çevresel etki sınıflarının belirlenmesiyle göz önüne alınır. Bu durum beton bileşimi değerlerine ve minimum pas payına dair sınır değerlerin uygulanmasını gerektirir.

Beton yapıların tasarımında mühendisler, zaman zaman beton şartnamelerinde doğrudan yer almayan beton özelliklerine değinmek zorunda kalabilirler.

Bu özellikler şunlardır:

- Basınç dayanımı,
- Çekme dayanımı,
- Elastisite modülü,
- Sünme, Büzülme,
- Sıcaklıkla genleşme katsayısı,
- Donatı ile beton arası aderans,
- Soğuk derzlerde kesme kuvveti kapasitesi,
- Yangına karşı dayanıklılıktır [22].

2.5.1. Basınç Dayanımı

Benzer su-çimento yada çimento bağlayıcı oranına sahip KYB geleneksel vibrasyonlu beton ile karşılaştırıldığında, KYB' nin genelde biraz daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülür. Çünkü KYB' de vibrasyon uygulanmasının yer almaması, agrega ile sertleşmiş çimento hamuru arasında daha iyi bir ara yüz oluşumuna katkıda bulunmaktadır. KYB' nin dayanım kazanması geleneksel betonunkine benzer olacaktır [22].

2.5.2. Çekme Dayanımı

KYB herhangi bir tanımlanmış basınç dayanımı sınıfında sağlanabilir. Verilen bir beton dayanım sınıfı ve olgunluk değeri için çekme dayanımının normal betonunkiyle aynı olduğu güvenle varsayılabilir; çünkü çimento hamuru hacminin miktarı (çimento + ince malzeme + su) çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.

Betonarme kesitlerin tasarımında, öngermeli elemanların çatlama momentlerinin değerlendirilmesinde, kontrollü erken termal büzülmenin sebep olduğu çatlak genişliğini ve çatlak aralığını kontrol etmek için donatı tasarımında, moment-eğrilik diyagramlarının çiziminde, donatısız beton yolların tasarımında ve fiberli betonarme tasarımında betonun eğilmede çekme dayanımı kullanılır.

Öngermeli birimlerde teller etrafındaki ayrılma çekme gerilmeleri ve betonda öngerme kuvvetleri uygulandığında tellerin uçlarında oluşan kayma oranı, öngerme kuvvetlerinin uygulandığı andaki basınç dayanımına bağlıdır [22].

2.5.3. Elastisite Modülü

Elastisite modülü ön ya da art germeli elemanların deformasyonlarının elâstik hesabında kullanılır. Çoğunlukla döşeme tasarımında kontrol parametresidir.

Beton hacminin önemli kısmı agrega olduğu için agreganın tipi, miktarı ve E değeri en belirleyici etkiye sahip etmendir. Yüksek E değerine sahip agrega seçmek betonun elastisite modülünü artırır. Bununla birlikte hamur hacmini artırma E değerini azaltabilir. KYB’ de, geleneksel vibrasyonlu betondan daha yüksek hamur içeriğine sahip olduğu için bazı farklılıklar beklenebilir. KYB’ lerde E değeri, standartlar içinde olup normal betona göre daha düşüktür.

Eğer KYB geleneksel vibrasyonlu betondan biraz daha düşük E modülüne sahip olursa, bu basınç dayanımı ve öngerilme yâda artgerme nedeniyle oluşan eğrilik arasındaki ilişkiyi etkileyecektir. Bu nedenle öngerme ve artgerme tel ve halatları bırakıldığında dayanım üzerinde dikkatli bir kontrol yapılmalıdır [22].

2.5.4. Sünme

Sünme sabit gerilme altında zaman içinde oluşan deformasyon (birim şekil değiştirme) olarak tanımlanabilir. Sünme belirlenirken uygulanan gerilmeyle bağlantılı olmayan büzülme, şişme ve termal deformasyonlar gibi diğer zamana bağlı deformasyonları da göz önüne alır.

Basınç altında sünme, öngerilmeli beton elemanlardaki öngerilme kuvvetlerini azaltır ve betondan donatıya doğru yavaş bir yük iletimine neden olur. Çekme altındaki sünme diğer kontrollü hareketlerin sebep olduğu gerilmeleri kısmen azalttığı için faydalı olabilir.

Sünme çimento hamurunda olur ve su/çimento oranıyla direkt olarak ilgili olan çimento hamurunun boşluklarına bağlıdır. Hidratasyon sırasında çimento hamurunun boşluğu azalır ve belli bir beton için dayanım artarken sünme azalır. Eğer yükleme yaşı sabitlenirse çimento tipi önem kazanır. Hidratasyonun daha hızlı gerçekleştiği çimentolar yükleme devrinde daha yüksek dayanıma, daha düşük gerilme/dayanım oranına ve daha düşük sünmeye sahip olacaktır. Agregalar çimento hamurunun sünmesini kısıtladığı için, agreganın hacmi ve E-değeri arttıkça daha az sünme olacaktır.

Daha yüksek çimento hamuru hacmi nedeniyle, KYB için sünme katsayısı aynı dayanımdaki normal betonun sünme katsayısından daha yüksek olabilir [22].

2.5.5. Rötire

Büzülme otojen (kendiliğinden olan) ve kuruma rötresinin toplamıdır. Otojen büzülme priz sırasında olur ve hidratasyon sırasında suyun iç tüketimi sebep olur. Hidratasyon ürünlerinin hacmi hidratasyon olmamış çimento ve suyun orijinal hacminden daha azdır. Hacimdeki bu azalma çekme gerilmelerine sebep olur ve otojen büzülmeye sebep olur.

Kuruma rötresine betondan atmosfere doğru gerçekleşen su kaybı neden olur. Genellikle bu su kaybı çimento hamurundandır, fakat çok az agregası için temel su kaybı agregadan olur. Kuruma rötresi göreceli olarak yavaş olmakla birlikte sebep olduğu gerilmeler kısmen çekme sünmesi azalması ile dengelenir.

Agrega, çimento hamurunun büzülmesini engeller ve sonuçta agregası hacmi arttıkça ve agreganın elastisite değeri arttıkça kuruma rötresi azalır. Daha yüksek hamur hacmine sebep olan maksimum agregası boyutundaki azalma kuruma rötresini artırır.

Normal beton için verilen değer ve formüller KYB için de geçerlidir. Beton basınç dayanımı su/çimento oranıyla ilgili olduğu için, düşük su/çimento oranına sahip KYB' de kuruma rötresi azalır ve otojen büzülme kuruma rötresini asabilir.

Farklı tiplerdeki KYB' nin büzülme ve sünmesi üzerinde gerçekleştirilen testler ve referans betonu aşağıda listelenen sonuçları göstermektedir;

- Rötrenin sebep olduğu deformasyon daha yüksek olabilir,
- Sünmenin sebep olduğu deformasyon daha düşük olabilir,
- Büzülme ve sünme nedeniyle oluşan deformasyonların toplam değeri hemen hemen benzerdir [22].

2.5.6. Sıcaklıkla Genleşme Katsayısı

Betonun sıcaklıkla genleşme katsayısı betonun içten (donatı ile) ya da dıştan engellendiği durumlarda, sıcaklıktaki birim değişmeden ötürü betonda oluşan birim deformasyondur.

Betonun sıcaklıkla genleşme katsayısı betonun yaşına, bileşimine ve nem miktarına göre değişir. Betonun önemli bir kısmını agrega oluşturduğu için daha düşük sıcaklık genleşme katsayısına sahip agrega kullanımı, üretilen betonun sıcaklıkla genleşme katsayısını da azaltacaktır. Sıcaklıkla genleşme katsayısının azalması çatlak kontrol donatısında da doğru orantılı azalmaya yol açar.

Sıcaklık genleşme katsayısı 8 ile 13 mikrogerilme/K aralığında alınabilir. Aynısı KYB için de varsayılabilir [22].

2.5.7. Aderans

Betonarme beton ve donatı arasındaki etkin bir aderansı temel alır. Sıyrılmayı önlemek için beton yeterli bir aderans dayanımına sahip olmalıdır. Aderans etkinliği donatıların pozisyonuna ve dökülen beton kalitesine bağlıdır. Beton ve donatı arasındaki aderans gerilmelerini uygun bir şekilde aktarmak için yeterli beton paspayı gereklidir.

Zayıf aderans betonun yerleştirilmesi esnasında donatı çubuğunun etrafını tam olarak sarmamasından veya betonun priz almadan önce ayrışarak ve terleyerek, betonun alt yüzeyinin kalitesinin düşmesi nedeniyle oluşur. KYB akışkanlık ve kohezyon özellikleri ile derin kesitlerdeki üst donatılar için bu negatif etkileri en aza indirir.

Öngerme tellerinin kullanılması durumunda KYB 'nin farklı tiplerinde transfer ve ankraj uzunluğu aynı basınç dayanımına sahip vibrasyonlu betondaki performans ile karşılaştırılmıştır. KYB içine yerleştirilmiş teller için transfer boyu, EN 1992-1 ve EN 206-1' e göre hesap edilen değerlerle karşılaştırıldığında güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. KYB kullanıldığı zaman aderans özellikleri genellikle arttırılmış olsa bile verilen bir beton dayanımı için yönetmelikte verilen formüller kullanılmalıdır [22].

2.5.8. Dökme Düzlemleri Boyunca Kesme Kuvveti Kapasitesi

Sertleşmiş KYB' nun yüzeyi döküm ve sertleşmeden sonra oldukça düz ve geçirimsiz olabilir. İlk tabakayı yerleştirdikten sonra herhangi bir yüzey işlemi yapmaksızın, ilk ve ikinci tabakalar arasındaki kesme kuvveti kapasitesi vibrasyonlu betonunkinden daha düşük olabilir ve sonuçta herhangi bir kesme kuvvetini taşımakta yetersiz kalabilir [22].

2.5.9. Yangına Karşı Dayanıklılık

Beton yanmayan bir özelliğe sahiptir ve alevlerin yayılmasına sebep olmaz. Beton yangına maruz kaldığında duman, toksit gazlar yada başka tür salınımlar üretmez ve yangını arttırmaz. Beton onu komşu bölmeler için etkin bir yangın siperi yapan yavaş bir ısı transfer hızına sahiptir ve beton dayanımının çoğu tipik yangın şartlarında korunur. Avrupa Komisyonu betona en yüksek muhtemel A1 yangın sınıfını vermiştir.

KYB' nin yangın dayanımı normal betonunkine benzer. Genellikle az geçirimli beton yüzey atmalarına karşı daha meyillidir; fakat şiddeti agrega tipine, beton kalitesine ve nem oranına bağlıdır. KYB yüksek dayanımlı düşük geçirimli beton şartlarını kolaylıkla sağlayabilir ve yangın şartları altında herhangi bir yüksek dayanımlı normal betonla benzer şekilde davranır.

Betonda polipropilen liflerin kullanılmasının yüzey atmalarına karşı dayanımının iyileştirilmesinde etkin olduğu gösterilmiştir. Mekanizmanın çimento matrisindeki eriyen ve emilen lifler nedeniyle olduğuna inanılmaktadır. Lif boşlukları daha sonra buhar için genleşme hazneleri sağlar ve böylece yüzey atmaları riskini azaltır. Polipropilen lifler KYB ile başarılı bir şekilde kullanılmıştır [22].

2.5.10. Dayanıklılık

Beton bir yapının dayanıklılığı yüzey tabakasının geçirgenliğiyle yakından ilişkilidir. Yüzey tabakası muhtemel zararlı hareketleri başlatan veya bu hareketlerin ilerlemesini sağlayan maddelerin girişini sınırlandırmalıdır (CO₂, Klorür, Sülfat, Su, Oksijen, Alkaliler, Asitler vb). Dayanıklılık, uygulamada malzeme seçimine, beton kompozisyonuna ve yerleştirme, sıkıştırma, bitirme ve kür sırasındaki denetim derecesine bağlıdır.

Kalıp ve donatılar yada beton içine yerleştirilen diğer elemanlar (örneğin artgerme kanalları) arasındaki dar boşluklarda vibrasyon zorlukları nedeniyle yüzey tabakasının sıkıştırma eksikliği, agresif çevre koşullarına maruz betonarme yapıların dayanıklılık performanslarının zayıf olmasında temel faktör olarak kabul edilmiştir. Japonya'da KYB' nin asıl gelişiminin temel sebeplerinden birisi, yukarıda bahsedilen problemin üstesinden gelinmesidir.

Geleneksel vibrasyonlu beton süresiz bir işlem olan vibrasyonla (yâda tokmaklama) sıkıştırmaya maruz kalmaktadır. İç vibrasyon durumunda, doğru bir şekilde uygulansa bile, vibratörün etki alanındaki beton hacmi aynı sıkıştırma enerjisini almaz. Benzer şekilde, dış vibrasyon durumunda, sonuç sıkıştırma vibrasyon kaynağına olan mesafeye bağlı olarak heterojendir.

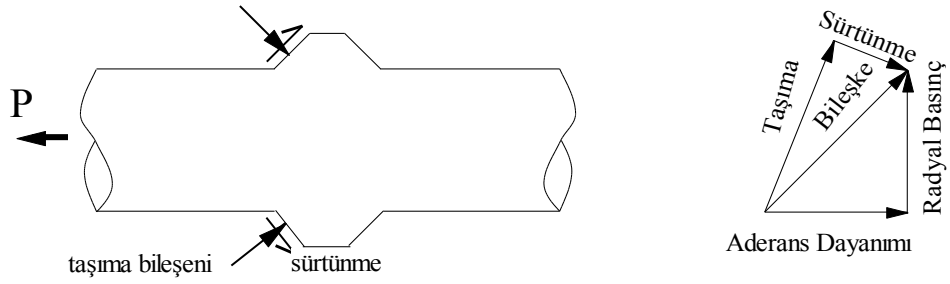
O halde vibrasyonun sonucu, düzgün olmayan bir sıkıştırmaya ve çeşitli geçirimsizliklere sahip ve zararlı maddelerin girişini arttıran bir betondur. Doğal olarak yanlış vibrasyonun sonuçları (segragasyon, terleme, peteğimsi delikler vs.)geçirgenlik ve sonuçta dayanıklılık üzerinde daha olumsuz etkilere sahiptir.

Doğru özelliklere sahip KYB yukarıda bahsedilen eksikliklerden muaf olacaktır ve tutarlı bir şekilde düşük ve üniform geçirgenliğe, zararlı çevresel etkilere karşı daha az zayıf noktaya ve daha iyi dayanıklılığa sahip bir malzeme ortaya çıkaracaktır. KYB ve normal vibrasyonlu beton arasındaki geçirgenliğin karşılaştırılması malzemelerin seçimine ve etkin su-çimento ya da su-bağlayıcı oranına bağlı olacaktır [22].

3. BETONARMEDE ADERANS

Betonarmenin tanımı; beton ile çelik donatı çubuklarının beraber çalışacak ve birbirlerinin eksikliklerini tamamlayacak şekilde bir araya getirilmesidir. Donatı betona kenetlenmeli ki, betonarme bir yapı elemanı gerektiği gibi davranabilsin. Donatının eksenine paralel olarak, çevresini saran betona göre rölatif kaymasına karşı gelerek kuvvet aktarımını sağlayan bağ kuvvetleri, donatının betona kenetlenmesine yardımcı olur. Donatı çubuğunun betonun içinde kaymasını önleyen ve kenetlemeyi sağlayan bağ kuvvetlerine aderans denir. Genellikle betonarmede aderans değimiyle; çelik ve betonun yapışması, birbirlerini ortak harekete zorlayabilme kabiliyeti kastedilir. Aderans olayı, betonarme elemanların dayanımlarını yüklenme durumlarına bağlı olarak iki ayrı şekilde etkilemektedir. Donatı çubuklarını basınç veya çekme tesirleri vererek betondan sıyırmaya çalışan yük durumunda, aderans donatının ankrajını sağlar. Bu çeşit bir bağlantıyı gerçekleştiren aderans, ankraj aderansı veya dış aderans olarak adlandırılmaktadır. Çekme veya eğilmeye çalışan ve donatı çubuklarının sıyrılmaya zorlanmadığı betonarme elemanlarda ise, aderans her iki malzemenin birlikte çalışmalarını sağlar ve böylece elemanın çatlama durumunu tayin eder. Bu ikinci çeşit çalışmayı gösteren aderansa da iç aderans adı verilmektedir.

Modern betonarme donatısı olan nervürlü çubukların aderans dayanımı, öncelikle nervürlerin çevresini saran betona karşı gösterecekleri taşıma gücüne bağlıdır. Çubuk nervürü yüzü boyunca, çelik ve beton arasındaki sürtünme, nervüre göre rölatif kayma sonucu beton dışı önlemeye yardım etmekle aderans dayanımını geliştirmede önemli rol oynar. Sürtünmeden dolayı oluşan kuvvet, nervüre dik etki eden aderans taşıma bileşenine vektörel olarak eklenir. Bileşke aderans kuvvetinin düşey bileşeni ise, donatıyı çevreleyen betona dik etki eden radyal basınçtır. Yatay bileşen ise, etkin aderans dayanımıdır (Şekil 3.1). Bunun yanı sıra yüksek dayanımlı betonların da geniş ölçüde kullanılmaya başlanmasıyla aderans problemi yeniden önem kazanmıştır. Aderans üzerine geniş çapta ilk araştırmaları 1909 – 1912 yıllarında Illinois Üniversitesinde, çekip – çıkarma deneyleri ve kırış deneyleri üstüne Abrams yapmış, bunun üstüne daha sonra birçok araştırmacı bu sorunu ele almıştır.



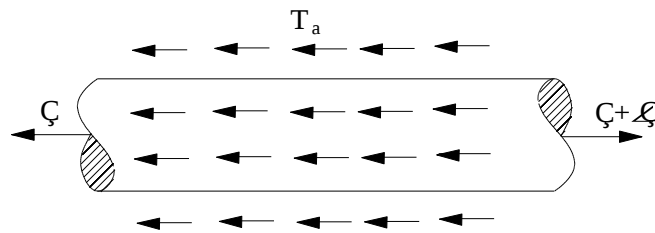
Şekil 3.1. Betona gömülü donatı çubuğu parçasının serbest cisim diyagramı ve aderans dayanımı bileşenleri [90]

3.1. Aderans Mekanizması

Aderans gerilmeleri çelik ile betonun, aralarındaki sınırlarda birbirlerine paralel yönde rölatif yer değiştirmelerine mani olan kuvvetlerdir. Kuvvetlerin oluşabilmesi için donatı çeliği ve betonun birbirlerini rölatif olarak harekete zorlaması gerekir. Kuvvet tesirleri altında beton ile çeliğin rölatif olarak birbirleri üstünde kaymasına “aderans kayması” denir.

Aderans kaymaları fazlaştıkça beton çatlakları genişler. Kayma sınırsız bir hal alıp aderans tamamen kaybolursa, donatı betondan sıyrılıp çıkar.

Şekil 3.2’ de görülen, donatı çubuğunun bir noktasından diğerine kuvvet ve dolayısıyla gerilme değişimi söz konusu olduğunda, çubuğu dengede tutan çubuk çevresi boyunca oluşan kayma gerilmeleridir. Bu kayma gerilmelerine “aderans gerilmeleri” denir [28].



Şekil 3.2. Donatı Çubuğu Boyunca Gerilme Değişimi

3.2. Aderansın Nedenleri

Aderansın nedenleri genellikle donatı ile beton arasındaki üç ana sebepten ileri geldiği kabul edilmektedir.

- Çelik ve beton arasında yapışmaya sebep olan molekül sel ve kapiler bağ kuvvetleri: Bu yapışma çok düşük değ erli olup zayıf zorlar altında, çelik ve betonun birbirlerine göre pek küçük yer değ iştirmeleri sonunda kopar. O kadar ki Robinson ve Saillard bu bağ ın ihmal edilmesi gerektiğ i kanısındadırlar.
- Çubukların dü z denilen kısımlarının yüzeyinde yeni imal edilmiş bile olsalar var olan pürüzlerin betona tutunmasından ileri gelen sürtünme kuvvetleri: Sürtünme kuvvetleri molekül sel kuvvetlerden daha çok önemlidirler. Dü z yuvarlak demirlerin aderansının hemen tamamı ikinci olarak ele alınan bu sürtünme kuvvetlerinden ileri gelmektedir.
- Çubuk yöresindeki betonun makaslama ve basınç dirençlerini de olaya karış tıran, helisel, tek veya çok sayıda, sürekli veya süreksiz nervürlerden ve enine çıkıntılardan ileri gelen mekanik dış kuvvetleri: Bu durum özellikle aderansı geliştirilmiş çubuklarda ortaya çıkar. Seçilen yüzey biçimlerinin uygun olması halinde aderans önemli ölçüde artar [2].

3.3. Aderansı Etkileyen Unsurlar

3.3.1. Donatının Özellikleri

Çelik çubuğ un çapı, akma veya elastiklik sınırı, özel profil şek li ve yüzeyinin niteliğ i aderans açısından önemlidir.

Donatı çapı değ iştikçe, kenetlenmeyi sağ layan çevrenin, uygulanan kuvveti etkileyen alana oranı değ işmektedir. Yani, donatı çapı artıkça hem kesit alanı artan donatıya gelen kuvvetin artması sonucu kenetlenme azalmakta, hem de donatı dış kuvvetlerinin oluşturduğ u ve yarı lma çatlağ ına sebep olan radyal gerilmelerin artması da söz konusu olmaktadır. Buradan, yarı lma kırılmasında, betonda oluş an çekme gerilmelerinin çapla orantılı olarak arttığ ı ortaya çıkmaktadır. Kullanılan boyuna donatının çapının aderansa etkisi, yapılan önerilere göre artan donatı çapına karş ılık lineer bir şekilde azalan aderans dayanımı hesaplanarak göz önüne alınabilir [2, 91, 92].

Donatının akma dayanımı, kenetlenme boyunca aderans gerilmesinin dağılımında ve bindirmeli eklerde ise, gerilme aktarımında büyük rol oynamaktadır. Donatıdaki yüksek gerilmeler, aderansı olumsuz yönde etkilemekte, dolayısı ile düşük dayanımlı çelikler diğerlerine kıyasla daha avantajlı duruma gelmektedirler.

Çubuk yüzeyinin düz ya da nervürlü olması da aderansı etkilemektedir. Nervürün aderansı arttırdığı kesin olarak bilinmekte ise de hangi profilin en uygun profil olduğu ve profil seçiminde hangi kıstasların geçerli olduğu sorunları henüz tamamen çözülememiştir. Düz yüzeyli çubuklarda aderans, yapışmaya ve sürtünmeye dayanmaktadır. Nervürlü çubukların aderansında bu iki nedenin etkisi ihmal edilebilecek kadar azdır. Bu tür çubukların aderansı çubuk üzerindeki çıkıntıların betona yaslanmasıyla sağlanmaktadır.

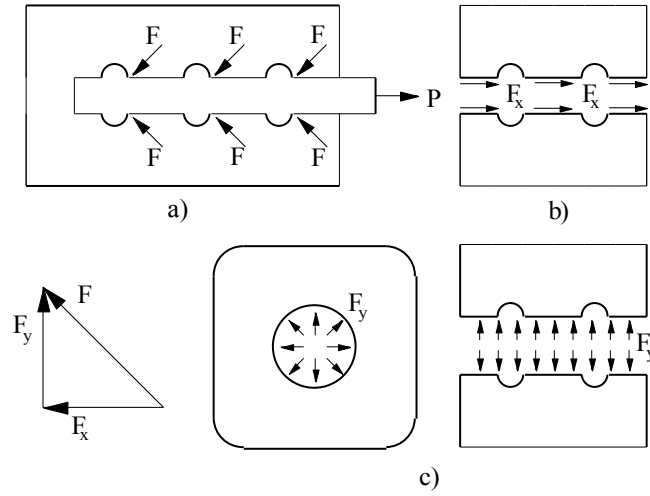
Çubuk yüzeyinin niteliği faktörü, donatının profil şekli etkenine benzerdir. Asıl sorun beton ile çeliğin birlikte çalışması olduğuna göre çubuk yüzeyinin niteliğinin önemi açıktır. Pürüzlülük ve hafif bir pas aderansı artırırken, ilerleyip kabuk görünüşünü almış pas zararlı olmaktadır. Benzer olarak, topraklı, çamurlu, yağlanmış çubukların aderansı da yok denecek kadar azdır [93].

Beton bir kütleye gömülmüş bir betonarme çubuk eksenel bir çekme kuvveti uygulanarak çekip çıkarılmaya çalışılırsa çubuğun sıyrılıp çıkmasına, çubuk boyunca oluşan aderans gerilmeleri engel olur. Uygulanan kuvvet küçük olduğu takdirde çubuğun düz yüzeyli veya nervürlü olması önemli bir fark oluşturmaz. Bu durumda aderans oluşturan temel neden, beton ile çelik arasındaki yapışma kuvvetleridir. Donatıya uygulanan kuvvetin artması ile çelik, beton içinde kaymaya başlar ve bunun neticesinde yapışma kuvvetleri kaybolur. Bunların yerini sürtünme kuvvetleri alır. Yapılan deneyler, çeliğin betona göre kaymasının, donatı gerilmelerinin çok düşük olduğu düzeyde başladığını göstermiştir. Bu nedenle, birçok araştırmacı yapışma etkisinin ihmal edilebileceğini savunmuşlardır.

Yükün artması ile çelik beton içinde kaymaya devam eder. Bu kaymanın mertebesi çoğaldıkça sürtünme kuvvetleri de azalmaya ve kaybolmaya başlar. Artık çelik betondan sıyrılmaya başlamıştır ve bu sıyrılma bütün çubuk boyunca oluştuğunda, düz yüzeyli çubukların aderans dayanımı tükenmiş olur. Bu aşamada çubuk, uygulanan kuvvet altında betondan çekilip çıkarılabilir.

Sürtünme kuvvetleri, aderansı etkileme yönünden düz yüzeyli çubuklarda önemli rol oynar. Haddelme sırasında oluşan pürüzler ve paslanma, sürtünme yüzeyini arttırmanın yanı sıra, küçük de olsa mekanik dış kuvvetlerinin oluşmasını sağlar ve

dolayısı ile aderansı artırır. Çubuk yüzeyinin niteliği nervürlü çubuklar için büyük önem taşımaz. Beton ile çeliğin birlikte çalışmasında çubuk yüzeyinin niteliğinin önemi açıktır. Bir çelik çubuk haddeden yeni çıkmış bile olsa yüzeyinde bir takım pürüzler gösterir. Zamanla paslanmanın da işe karışmasıyla yuvarlak düz demirler küçük bir mertebede de olsa aderansı geliştirilmiş çubuk durumuna gelirler. Asitle büyük ölçüde korozyona uğratılmış bir yuvarlak düz demirin, az çok haddeden yeni çıkmış bir aderansı geliştirilmiş çubuk kadar direnç gösterdiği görülmüştür [2].



Şekil 3.3. Kenetlenme Aderans Deneyi

Şekil 3.3a da gösterildiği gibi, dış olarak adlandırılan çıkıntılarının yüzeylerinin çubuk eksenine göre eğik olması nedeni ile betona eğik kuvvetler uygulanmaktadır. Goto' nun 1971 yılında yaptığı bir çalışmada, bu kuvvetler ile çubuk eksenindeki açının, 40°'den fazla olduğu kanıtlanmıştır. Betona uygulanan eğik kuvvetin yatay ve dikey bileşenlerinin (F_x ve F_y) etkileri Şekil 3.3b ve c'de ayrı ayrı olarak gösterilmiştir. Yatay bileşen çıkıntı yakınındaki betonda basınç, iki çıkıntı arasındaki düzlem boyunca da kayma gerilmeleri meydana getirir.

Genellikle bu yatay bileşen, kırılmaya yol açacak mertebelere ulaşamaz. Şekil 3.3c'de gösterilen düşey bileşen ise (genellikle yatay bileşenden daha büyüktür), donatı çevresindeki betona radyal bir basınç uygular. Bu durumda beton, içinde basınçlı bir sıvı veya gaz taşıyan boru gibi davranır. Düşey bileşenin betonda oluşturduğu çekme gerilmeleri, “yarılma” olarak tanımlanan kırılmaya sebep olabilir. Düz yüzeyli çubuklarda mekanik dış kuvvetler önemli olmadığından, aderans kırılması çubuğun betondan sıyrılıp çıkması ile oluşur. Mekanik dış kuvvetlerinin çok önemli olduğu nervürlü çubuklarda ise

kırılma, çubuğun betona uyguladığı eğik kuvvetlerin etkisi ile, yarıлма şeklinde oluşur. Bu yüzden, yüzeyi düz ve nervürlü çubukların davranışları ve bunlarla donatılmış beton elemanlardaki aderans kırılmaları çok farklıdır [94].

Özet olarak şunlar söylenebilir:

Beton bir kütleyle gömülmüş çelik çubuğa uygulanan çekme kuvveti üç tür kırılmaya sebep olabilir:

- Donatının akma sınırlarına erişmesi: Kenetlenme boyu olarak tanımlanan betona gömülü çubuk boyu yeterince uzun olduğu durumlarda bir aderans kırılması söz konusu olmaz ve çelik akma sınırına ulaşabilir.
- Donatının betondan sıyrılıp çıkması: Düz yüzeyli çubukların kenetlenme boyu yeterli olmadığı durumlarda, bu tür kırılma meydana gelebilir. Seyrek rastlanmasına rağmen nervürlü çubuklarda da sıyrılıp çıkma olabilir. Ancak nervürlü çubuklarda sıyrılma olayının meydana gelebilmesi için iki çıkıntı arasındaki betonun kayma gerilmeleri etkisi ile kesilip kırılması gerekir.
- Eğik dış kuvvetlerinin etkisiyle betonun yarılanması: Bu yarılmaya sebep olan düşey bileşen Şekil 3.3c’de gösterilmiştir. Yarıлма, genellikle çubuğa paralel oluşan çatlaklardan gelişir. Bu tür kırılma, düz yüzeyli çubuklarla donatılmış elemanlarda görülmez [28].

3.3.2. Betonun Özellikleri

Beton bileşimi aderansı etkilemektedir. Karışıma giren çimento, kum veya çakıl miktarında yapılacak değişiklikler, aderans dayanımını $\pm\%20$ oranında değiştirebilmektedir. Yapılan deneyler, çimento türünün de önemli olduğunu göstermiştir. Portland tipi normal ve yüksek dayanımlı çimentolar aderans yönünden en iyi sonuçları vermektedir. Puzzolanlı, yüksek fırın cürufu çimentoların ise yuvarlak düz demirlerde Portland tipine göre %75’e varan bir aderans düşmesine sebep olabildikleri gözlenmiştir. Kullanılan agreganın cinsi ve katkı maddeleri de aderansı etkiler. Örneğin, hafif agrega ile yapılan betonun aderans dayanımı, normal agrega ile yapılan orana daha düşüktür.

Betonun plastikliği azaldıkça daha yüksek aderans direnci gösterir. Beton vibrasyonla sıkıştırılarak, yüksek bir aderans direnci elde edilebilir. Çeşitli usullerle sıkıştırma beton içindeki hava ve su boşluklarını yok ederek betonun donatıları daha iyi sarmasını sağlamaktadır. W.I. Larnach, priz başladıktan sonra betonun yeniden vibrasyonla

sıkıştırılmasının, betonun aderans direnci üzerinde olumsuz etki yaptığını tespit etmiştir. Örneğin karılıp kalıba yerleştirildikten 3 saat sonra aderans direncinde ortalama %33 bir azalma olduğu gözlenmiştir.

Beton döküldükten sonra, muhafaza edildiği ortamın şartları (ısı, nem, don, kür şartları gibi) aderans dayanımını büyük ölçüde etkilemektedir. Yani, betonun sertleşmesi süresince bakımındaki özen aderansı arttırmaktadır. Birbiri peşine gelen donma-çözülme devrelerinin aderans direncini sıfıra indirdiği 1951'de A. Bichora tarafından gözlenmiştir. Donun aderans üzerindeki etkisini inceleyen V. Kohf (1957) da aderansın dona karşı beton dayanımından daha hassas olduğu sonucuna varmış ve yuvarlak düz demirler için beton dökümünden itibaren ilk üç gün ısı 10°C' den, dört ve beşinci günlerde ise 5°C' den daha düşük olmamasını tavsiye etmiştir. R. Dutron betonun sertleşme sürecinde nemlendirilmesinin aderansı arttırdığını gözlemiştir [94].

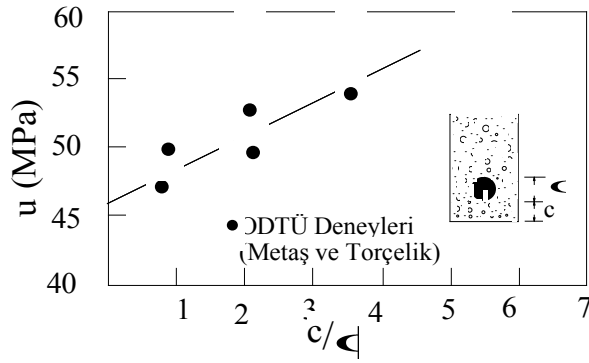
Betonun çekme ve basınç dayanımları, bileşimi, yaşı, sıkıştırılması ve korunması aderans dayanımını etkileyen önemli etkenlerdir. Sürtünme kuvvetlerinin beton çekme dayanımına bağlı olarak değiştiği yapılan deneylerle belirlenmiştir. Nervürlü çubuklardaki çıkıntıların betona uyguladığı eğik kuvvetlerin, betonda çekme gerilmesi meydana getirdiği ve yarılmının bu nedenle olduğu daha önce belirtilmişti. O halde yarıma dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden birisi, betonun çekmeye karşı dayanımıdır. Betonun çekme dayanımı faktörü, aderansı geliştirilmiş çubuklarda önem kazanmaktadır. Çünkü nervürlü çubuklarla donatılmış elemanlarda kırılma, genelde yarıma ile olacağından, betonun çekme dayanımı özellikle önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, beton dayanımının artmasının, aderans dayanımını arttıracığı açıktır. Betonun yaşı, aderans dayanımını, gerek beton dayanımının zamanla artması ve gerekse plastikliğinin azalması yönlerinden etkilemektedir [28].

3.3.3. Betonarme Kesit Özellikleri

Kenetlenme boyunun aderans üzerindeki etkisi bu yüzyılın başlarından beri bilinmektedir. Beton bir kütleyle gömülmüş çubuğa uygulanan çekme kuvveti, çubuk çevresinde oluşan ve aderans gerilmesi olarak adlandırılan kayma gerilmeleri ile dengelenir. Genellikle bu gerilmelerin çubuk boyunca eşit olarak yayıldıkları kabul edilir. Kenetlenme boyu yeterli olduğu takdirde, donatının çekip çıkarılması veya betonun yarılmaları söz konusu olamaz. Ancak, aderans dayanımı ile kenetlenme boyu arasında

doğrusal bir ilişki yoktur. Yani kenetlenme boyu iki katına çıkarılınca dayanımı iki kat artmaz [94].

Donatı etrafındaki beton örtünün kalınlığı, özellikle aderansı geliştirilmiş çubuklarla donatılmış betonarme elemanlar için önemlidir. Beton örtü kalınlığının, yaklaşık donatı çapının üç katından daha az olduğu durumlarda, yapısal açıdan tehlike arz etmeyen yarıлма göçmesi meydana gelmektedir [95]. Yarıлма göçmesinin daha iyi anlaşılması bakımından, iç basınç altındaki boru analogisinden hareket edilirse, betonda oluşan radyal çekme gerilmesinin beton örtü kalınlığı ile ters orantılı olduğu görülür. Aderans dayanımının beton örtü kalınlığı ile değişimi ise, Şekil 3.4’ te görülmektedir [96].



Şekil 3.4. Beton örtü kalınlığının aderans dayanımına etkisi

Bir kesitte kenar çubuğun aderansı, kenardaki beton tabakası ince olduğu ve kolaylıkla enine deformasyon yaptığı için bir iç çubuk kadar iyi olamaz. Aderansın yeteri kadar iyi olması için beton çubuğu kenar ve alttan saran beton tabakasının bir minimum kalınlığı olmalıdır. Bu kalınlık özellikle nervürlü çubuklarda, köşeye doğru olan kuvvetler sebebiyle betonun çatlamaması için de lazımdır.

Bir kirişte üst kısımlarda betonun iyi sıkıştırılamaması, su/çimento oranının artması sonucu beton dayanımının azalması, üst çubukların altında betonun oturmasının alt çubuklara nazaran daha fazla olması gibi nedenlerle üstte veya üste yakın çubuklarda aderans, alt çubuklara göre daha az olmaktadır. Betonarme bir yapı elemanının gerektiği gibi davranabilmesi için donatının betona kenetlenmesi gerekir. Aderansın tam olarak sağlanabilmesi için gerekli kenetlenme boyu, kesitteki donatı çubuklarının betonlama sırasındaki konumuna bağlıdır. Eğimi yatayla 45° ile 90° arası olan çubukları beton iyice sarabilmekte ve bunların aderansı iyi olabilmektedir. Buna göre eğimi yatayla 45° ile 90° arasında olan çubuklarla, eğimi daha az veya yatay olup da betonun üst yüzeyinden en az

30 cm altta olan veya elemanın alt yarısı içinde bulunan çubukların yer ve durumları, TS 500'de [97] konum 2 ve bu tanımın dışında kalan çubukların yer ve durumları konum 1 olarak isimlendirilmiştir. Aynı bir çubuğun konum 2'deki aderansı, konum 1'deki aderansından 2 kat daha iyi olmaktadır [12].

Betonlama sırasında düşey duran çubukların aderans dayanımının yatay olanlara oranla daha yüksek olduğu da yapılan deneylerle saptanmıştır (%50 fazla olduğu ileri sürülmüştür). Ancak nervürlü düşey bir çubuk betonlamanın yapıldığı yönde çekilecek olursa, yatay çubuğa kıyasla daha büyük kayma göstermektedir.

Dayanımı etkilemeyen bu olayın nedeni, döküm sırasında çubuk çıkıntıları altında oluşan, sünger andıran gevşek beton kütleleridir [98]. Üst ve alt sıralara konulan çubukların aderans özellikleri arasındaki farkın nedenleri şunlardır:

- Betonun döküm ve priz anları arasında tasman yaparak üst sıra demirlerin alt yüzeyi ile bağlantısının azalması,
- Prizden önce alt seviyede hidrostatik basıncın daha büyük olması ve bu basıncın betonu alt çubuk sıraları üzerine bastırması,
- Su ve hava dolu boşlukların sıkıştırma sırasında hafiflikleri sebebiyle üst seviyede toplanmaları ve üst sıra çubukları sarmaları.

Aderansı geliştirilmiş çubukların aderansını etkileyen en önemli faktörlerden biri de enine donatıdır. Kayma donatılarının sayısı artırıldığında aderansı yok eden boyuna çatlaklar, daha büyük zorlamalarda meydana gelmektedir. Enine donatının beton-çelik bağlantısı üzerindeki etkisi, yük altındaki aderansı geliştirilmiş bir çubuktan onu saran beton kütesine gelen tesirler göz önüne alınarak incelenebilir. Daha önce donatıyı örten beton kalınlığının etkisini açıklayan düşüncüyü enine donatı bulunması durumu için genişletmek mümkündür. Çatlamadan önce betonu parçalamaya çalışan kuvvetin önemli bir bölümünü alan enine donatının çatlakların oluşmasından sonra bunun tümünü taşıdığı ve böylece engelleyecek aderans çözümünü geciktirdiği görülebilir.

Donatıyı saran betondan çubuk eksenine dik basınç gerilmesi, aderansı büyük ölçüde olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca betonun boyuna doğrultuda çekmeye çalışması ise, enine doğrultuda bir büzülme oluşturmaktadır. Bu olay da rötreye benzer şekilde, betonun donatıyı sıkıştırması ile aderans dayanımının artmasına önemli katkıda bulunur [28].

3.3.4. Diğer Unsurlar

Bu etkenler arasında zorların etkisi ve yükleme hızı gibi zamanla ilgili etkenler, yorulma ve elektro-kimyasal etkenleri sayılabilir. Zamanla ilgili etken denilince, betonda büzülmeye ek olarak, kalıcı yük altında oluşan sünme etkisi söz konusu olmaktadır. Aderans direncinin, bu kalıcı zorların etki süresi arttıkça azaldığı ve bu azalmanın bir asimtota ulaştığı düşünülmektedir. Yükleme hızı ise, aderans dayanımı üzerindeki etkisini beton ve çeliğin birbirlerine göre kaymalarıyla gösterir. Malzemenin diğer bütün mekanik özellikleri gibi aderans direnci de dinamik ve tekrarlanan yükler altında yorulma göstermektedir.

Elektro-kimyasal etken ile ilgili olarak J. Kolek [99], yaptığı çalışmada demirin haricindeki maddelerden yapılan kalıpların betonlamada kullanılması halinde aderansı azalttığını ortaya çıkarmıştır. Çünkü donatı demirleri ile farklı madenden yapılmış kalıp arasındaki potansiyel farktan dolayı bir pil oluşmakta; bu da donatı çevresinde aderansı büyük ölçüde azaltan gaz kabarcıklarının meydana gelmesine yol açmaktadır [28].

3.4. Aderans Çeşitleri

Beton bir bloğa, bir çelik çubuk gömülsün ve bu çubuğun gömülmüş olduğu beton sertleştikten sonra çubuk çekilip çıkarılmak istensin. Çelik çubuğun beton içindeki bir noktasında çelik uzaması (çekme kuvveti, betonun rötresi, sünmesi gibi tesirlerin etkisi dahil olmak üzere) ε_e ve bu noktada çelikle temasta olan beton lifteki uzama da ε_b olmaktadır. Bu iki uzama arasındaki bağıntı;

$$\varepsilon_e = \varepsilon_b \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir. Bu tanım, bir beton bloğa gömülmüş yani ankre edilmiş bir çelik çubukla beton arasındaki aderansın, deformasyonlar tipinden değerini vermektedir [100].

Çelik çubukla beton arasındaki aderansı deformasyonlar cinsinden veren 3.1 denklemi gergilerde ve eğilmeye maruz elemanların çekme bölgelerinde uzamanın belirli bir değerine kadar doğrudur.

Betonun uzama limitinin çeliğin uzama kapasitesi yanında çok küçük olması nedeniyle, çelikte uzamalar belirli bir değeri geçince beton çatlar ve 3.1 bağıntısı çatlama

yerlerinde geçerliliğini kaybeder. Bu tip elemanlarda eleman boyunca mevcut çatlakların çubuk hizasındaki genişlikleri toplamının çubuk boyuna oranı ε_0 olsun. Çelik çubukla beton arasında kayma olmadığını gösteren ve aderansı deformasyonlar cinsinden ifade eden bağıntı,

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_e + \varepsilon_b \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir.

Buna göre betonarme elemanlarda birbirinden farklı iki şekilde aderans var olduğu söylenebilir. Bunlar;

- Beton bir bloğa gömülmüş, ankre edilmiş çubukların çekme veya basınç kuvveti ile çıkıp sıyrılmasına engel olan aderans ankraj aderansı,
- Betonarme bir taşıyıcı elemanda iki malzemenin beraber çalışmasını sağlayan ve o elemanlarda çatlama durumunun şekli üzerinde en önemli rol oynayan aderans bünye veya eğilme aderansı olarak tanımlanmaktadır. Bu eğilme aderansın türü için 3.2 denklemi geçerli olmaktadır [12].

3.4.1. Eğilme Aderansı

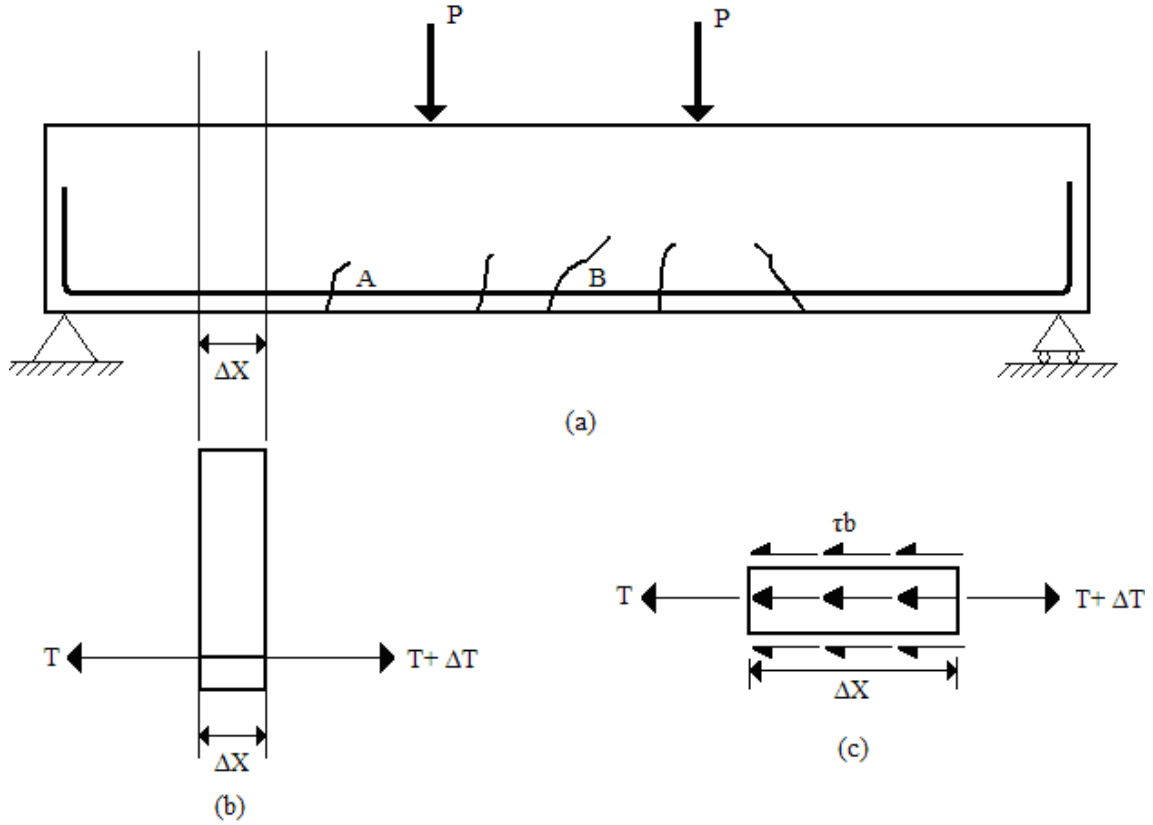
Eğilme altındaki bir betonarme elemanda momentin bir kesitten diğerine değişebilmesi için, donatıdaki gerilmenin de değişmesi gerekir. Şekil 3.5’ de gösterildiği gibi donatıdaki gerilmenin değişebilmesi, ancak donatı çevresinde oluşan ve aderans gerilmeleri olarak adlandırılan kesme gerilmelerinin var olması ile mümkündür. Denge koşulu nedeniyle, Δx uzunluğundaki çubuğun çevresine etkiyen aderans gerilmelerinin toplamı, çubuğun iki ucundaki çekme kuvvetleri farkına eşit olmalıdır. Aderans gerilmesi;

$$\tau_b(u)\Delta x = \Delta T = \frac{\Delta M}{z} \quad (3.3)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde τ_b , aderans gerilmesi, z moment kolu, u ise çubuğun çevre uzunluğudur. $\Delta M / \Delta x = V$ olduğundan, denklem 3.3 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau_b = \frac{V}{u(z)} \quad (3.4)$$

Bu denklem, eğilme aderansı olarak tanımlanır. 3.4 denkleminde V kesme kuvvetidir [101].



Şekil 3.5. Eğilme aderansı

3.4.2. Kenetlenme Aderansı

Betonarmede, donatı beton kütle içine yeterli uzunlukta gömülmüşse, çubuğu çekip çıkartmak mümkün değildir. Gömülme boyunun yeterli olmadığı durumlarda ise, çubuk yüzeyinin geometrisine bağlı olarak, çubuk sıyrılıp çıkabilir veya etrafındaki beton kütleyle yarabilir. Betona gömülen çubuk boyu, “kenetlenme boyu” olarak adlandırılır ve bu tür aderansa da “kenetlenme aderansı” denir. Kenetlenmenin yeterli olabilmesi için donatı akma gerilmesine eriştiğinde veya deprem olduğu gibi donatı akma ötesinde belirli bir birim deformasyona ulaştığında, çubuk betondan sıyrılmamalı ve betonu yarmamalıdır.

Şekil 3.6' de beton bir kütleye gömülen bir çubuk gösterilmiştir. Çubuğun kenetlenme boyunca etkiyen bağ kuvvetleri (τ_b olarak gösterilmiştir), uygulanan çekme kuvvetini dengelemek durumundadır. Donatıdaki çekme kuvveti, $T=A_s\sigma_s$ olarak gösterilmiştir. Yeterli kenetlenmenin sağlanabilmesi için, $\sigma_s=f_{yd}$ olduğunda, çubuk çevresinde oluşan bağ kuvvetlerinin toplamının, çubuğun çekme dayanımına eşit olması gerekir. Bunu ifade eden denklem;

$$\sum (\tau_b \times \text{birim yüzey alanı}) = T = \tau_b \times A \quad (3.5)$$

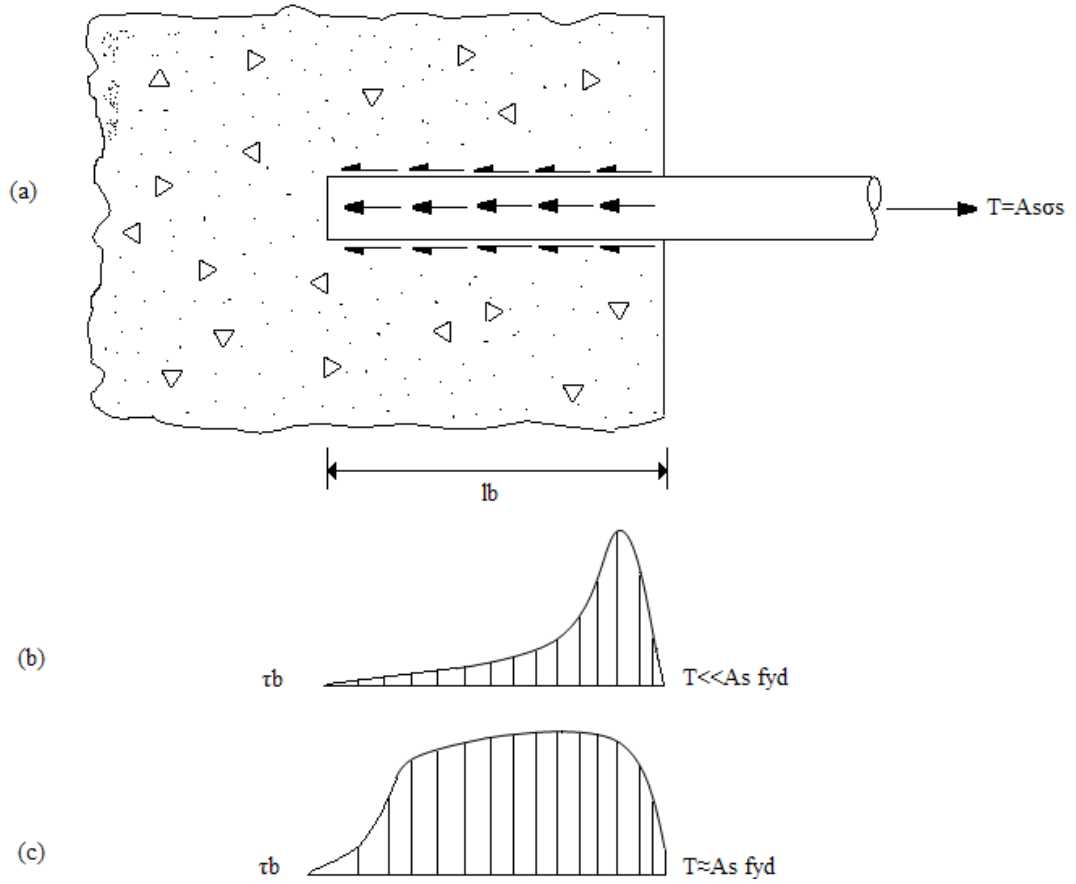
olarak yazılabilir. Eğer τ_b olarak gösterilen aderans gerilmeleri kenetlenme boyunca düzgün yayılı olsaydı veya bu gerilmelerin dağılımı kesin olarak bilinseydi, gerekli kenetlenme boyunun hesabı oldukça kolay olurdu. Yapılan deneyler, aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca düzgün yayılmadığını ve gerçek dağılımın birçok değişkene bağlı olduğunu göstermiştir. Şekil 3.6b ve c'de gösterildiği gibi, aderans gerilmelerinin dağılımı düzgün değildir ve bu dağılım, diğer değişkenlerin yanı sıra çubuktaki gerilme düzeyine göre de değişmektedir.

Aderans gerilmeleri ile kenetlenme boyu arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak saptayabilmek için, aderans gerilmelerinin kenetlenme boyunca değişmediği varsayılabilir. Gerçek dağılım, varsayılandan çok değişik olduğundan elde edilecek bağıntının gerçeğe tam uymadığı unutulmamalıdır. Aderans gerilmelerinin etkidiği alan,

$$A = \pi \times \phi \times l_b \quad (3.6)$$

olarak yazılabilir. l_b boyundaki donatı parçasının yüzey alanıdır. Dolayısıyla, l_b uzunluğunda etkiyen aderans kuvveti ise $A_s \times f_{yd}$ 'ye eşit olmalıdır. Böylece 3.5 denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau_b \times (\pi \times \phi) \times l_b = A_s \times f_{yd} = \frac{\pi \times \phi^2}{4} \times f_{yd} \Rightarrow l_b = \frac{f_{yd}}{4\tau_b} \quad (3.7)$$



Şekil 3.6. Aderans gerilmelerinin çubuk boyunca dağılımı

3.7 denkleminde ϕ , çubuğun çapıdır. Yapılan deneyler, aderans dayanımının birçok değişkene bağlı olduğunu göstermiştir. Bu değişkenlerden en önemlisi, betonun çekme dayanımıdır. $\tau_b = C_1 \times f_{ctd}$ ve $\frac{1}{4C_1} = C_0$ varsayılırsa, 3.7 denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$l_b = C_0 \times \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} \times \phi \quad (3.8)$$

3.8 denklemi, kenetlenme boyunu veren temel denklemdir. C_0 katsayısının deneysel olarak saptanması gerekir [102].

3.5. Aderans Deneyleri

20. yüzyılın başından bu güne kadar, ortalama aderans dayanımının ve gerekli kenetlenme boyunun saptanmasına yönelik çok sayıda deney türü geliştirilmiştir. Hemen belirtmek gerekir ki, geliştirilen bu deney elemanlarının hiçbirisi tam anlamı ile gerçek durumunu yansıtmamaktadır. Bu nedenle deney türlerinin tümü eleştiriye açıktır. Bu güne kadar gerçekçi bir aderans deneyinin geliştirilmemiş olmasının başlıca nedenleri aşağıda sıralanmıştır:

- Aderans- kesme ilişkisi henüz tam olarak aydınlığa kavuşturulmamış karmaşık bir konu olduğundan, bu etkileşimin gerçekçi olarak deney elemanına yansıtılması çok zordur.
- Boyut etkisi aderansı büyük ölçüde etkilemektedir.
- Yerel gerilmelerinin aderans ve kenetlenme üzerinde ihmal edilmeyecek ölçüde etkileri vardır.
- Donatı çubukları arasındaki uzaklık ve beton örtüsü aderansı etkileyen önemli değişkenlerdendir. Deneylerde bunları modellemek çok zordur.
- Sargı donatısı aderansı olumlu yönde etkilemektedir. Deney elemanı bu sargı etkisini de içermektedir.

Bu durumda, aderans ve kenetlenme sorunu incelenecek eleman, laboratuvarında aynı boyut ve sınır koşulları ile imal edilip test edilmedikçe, yapılan deneyin tam olarak gerçeği yansıttığı söylenemez. Karşılaştırılan her sorun için böyle bir deney planlanması, ebettteki pratik ve ekonomik olmayacaktır. Bu konuda yapılan deneyler genelde dış aderans denilen direkt aderansla ilgili özellikleri (kenetlenme, bindirmeli ekleme, sınır gerilme) konu alan çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri ile iç aderans denilen çatlama özelliklerini konu alan giriş deneyleri olmak üzere iki türdür. Yaygınlığı daha az olan itip-çıkarma (push-out) deneyleri de yapılmaktadır[2, 28, 103, 104].

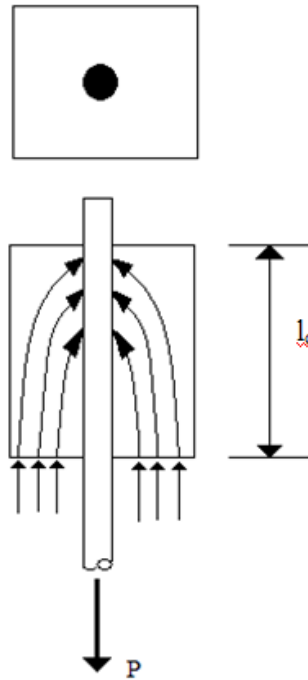
3.5.1. Çekip Çıkarma Deneyi

Aderans deneyleri arasında en eskisi, en yaygın olarak kullanılanı, en basit en pratik olanı, “eksenel çekip çıkarma deneyi” dir. Bu deneyde, Şekil 3.7’ de gösterildiği gibi, tabandan mesnetlenmiş bir beton prizma veya silindirin içine yerleştirilmiş çubuk, alttaki

serbest ucundan çekilip, betondan çıkartılmaya çalışılır. Genelde, alt serbest uçta ve üstte, çubuğun betona göre sıyrılması ölçülür. Bazı araştırmacılar, serbest uçtaki sıyrılmanın 0.25 mm olduğu yükte hesaplanan ortalama aderans gerilmesini, güvenli aderans gerilmesi olarak kabul etmektedirler. Değişik kenetlenme boyları kullanılarak yapılan deneylerle kenetlenme boyunun saptanması, yazarlara daha doğru bir yaklaşım olarak gözükmektedir.

Bu tür deney elemanlarında donatıya dik kesme kuvvetinin bulunmayışı, mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmeleri ve beton örtüsünün gerçekte olandan çok büyük olması ve çekme çatlaklarının oluşmaması gibi sakıncalar söz konusudur. Ancak iki tür donatının izafi aderans ve kenetlenme özelliklerinin saptanıp karşılaştırılmasında bu tür deneylerden yararlanılabilir.

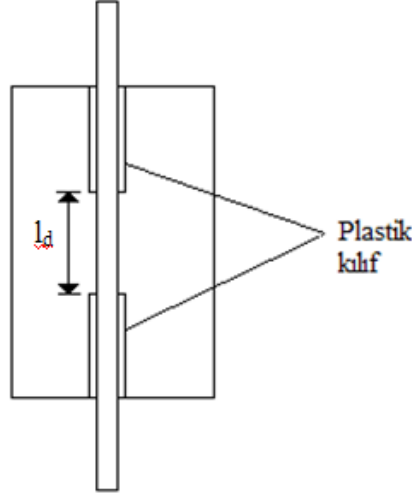
Fakat Şekil 3.7’ de ki eksantrik çekip-çıkarma deney elemanı ile gerçekçi beton örtü kalınlığı ayarlanılabilmekte ve yerel basınç gerilmeleri, uçlardan donatıya geçirilen kılıflarla yok edilebilmektedir. Ayrıca donatıya dik kesme kuvvetinin bulunması ve eğilme nedeni ile çatlamanın olabilmesi, bu deney elemanının daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlamaktadır.



Şekil 3.7. Çekip çıkarma (pull-out) deneyi

3.5.2. İtip-Çıkarma Deneyi

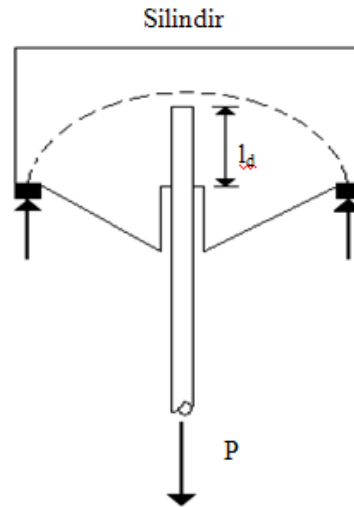
Çekip-çıkarma deneyinden daha az yaygın olan bu deney türünün bir öncekinden tek farkı, çelik çubuğu beton kütleden çözen P kuvvetinin çekici değil itici bir özellik taşımasıdır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Kenetlenme boyunun sınırlanması

3.5.3. Geliştirilmiş Çekip-Çıkarma Deneyi

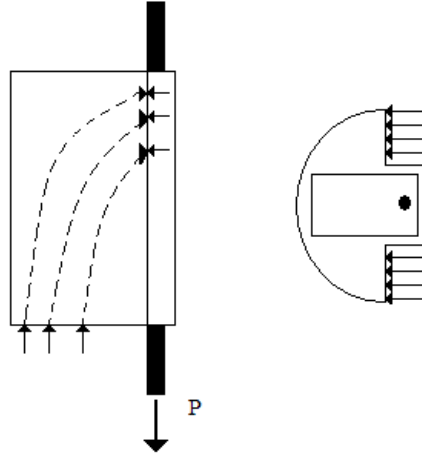
Çekip-çıkarma deneyinde beton içi gerilmelerin bir kubbe gibi çalışıp betonu çubuk üzerine bastırmalarını önlemek amacıyla F. Leonhardt tarafından teklif edilmiş olan bir deney türüdür (Şekil 3.9). Beton kütle silindirik olup deney ana hatlarıyla çekip-çıkarma deneyine benzer.



Şekil 3.9. Geliştirilmiş çekip çıkarma deneyi

3.5.4. Eksantrik Çekip-Çıkarma Deneyi

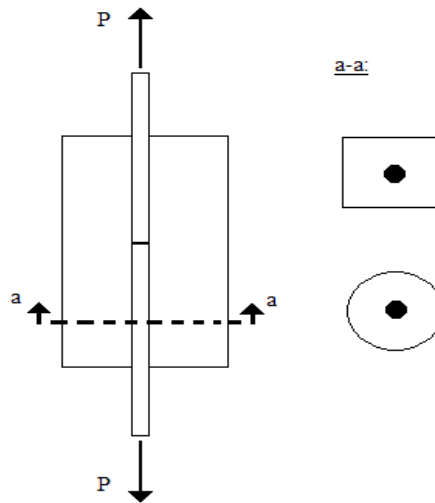
3.5.3' te anlatılan amaca yönelmiş bir başka deney de P.M. Ferguson, R.D. Turpin ve J.N. Thompson tarafından kullanılan eksantrik çekip çıkarma deneyidir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Eksantrik-çekip çıkarma deneyi

3.5.5. Uç Uca Çekme Deneyi

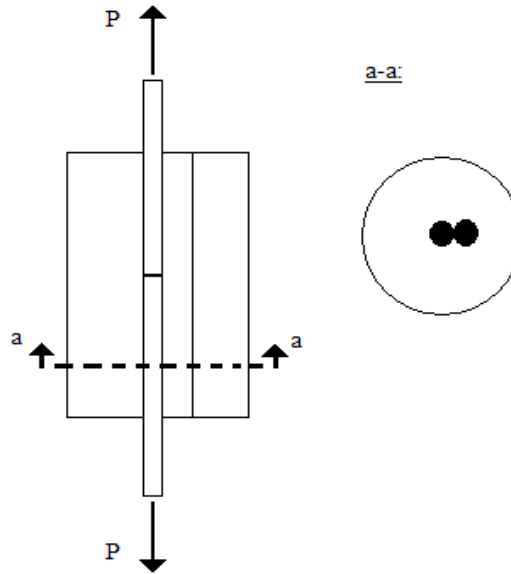
Kare prizma veya silindir şeklindeki bir beton kütlesinin en kesit merkezine yerleştirilmiş uç uca iki çelik çubuktan meydana gelen epruvet, çubukların serbest uçlarına düzgün artan bir çekme kuvveti uygulanarak denenmektedir (Şekil 3.11). Epruvette enine donatı mevcuttur. Çubuklardan birinde ilk aderans çözülmesi elde edildiğinde henüz direnç gösteren öteki uçtaki çubuk üzerinde çekip-çıkarma deneyi de yapılabilir.



Şekil 3.11. Uç uca çekme deneyi

3.5.6. Ek Çubuklu Uç Uca Çekme Deneyi

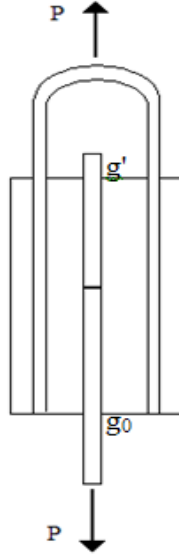
Genel olarak uç uca çekme deney türüne benzeyen bu tür J.R. Robinson tarafından uygulanmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Ek çubuklu uç uca çekme deneyi

3.5.7. Tek Deney Çubuklu Çekme Deneyi

Çalışma bakımından uç uca çekme deney türüne benzeyen bu deney g' ve g_0 gibi iki ayrı noktadan ölçme imkânı vermektedir (Şekil 3.13). Kenetlenme boyunun çekip çıkarma deneyine benzer bir şekilde sınırlandırılması mümkündür [105].



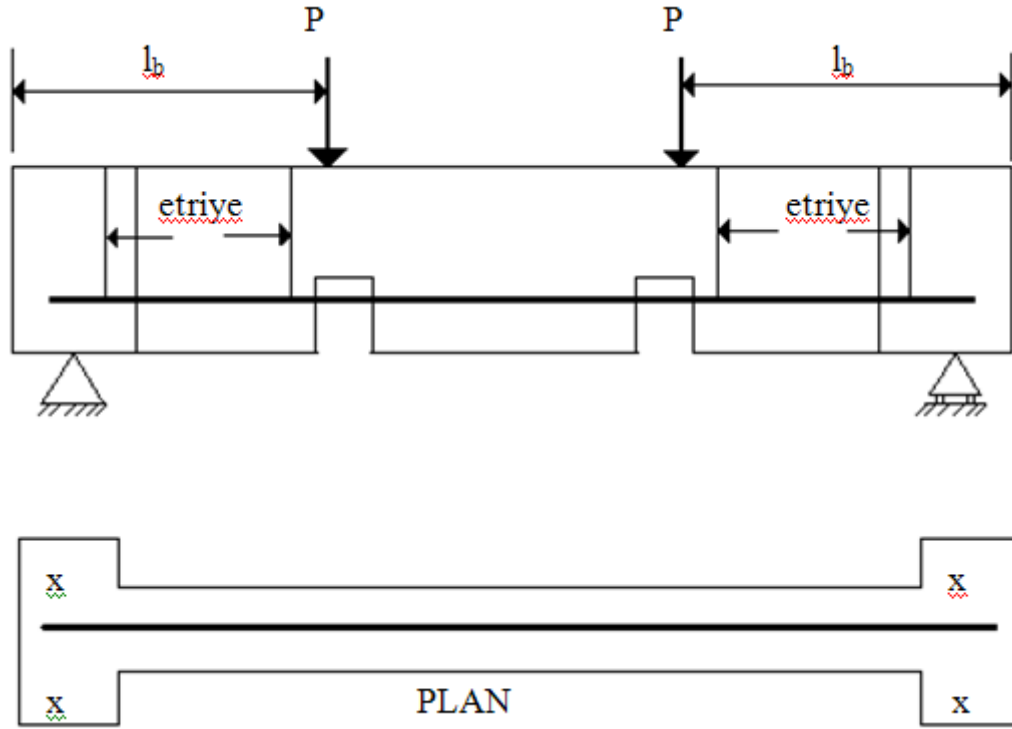
Şekil 3.13. Tek deney çubuklu çekme deneyi

3.5.8. Kiriş Deneyleri

Çekip çıkarma deneylerinin eğilmeye çalışan bir elemandaki gerçek durumu yansıtmamasından dolayı kiriş deneyleri geliştirilmiştir. Özellikle eğilme çekme çatlaklarının aderans davranışını etkilediği kabul edildiğinden beri, çekip çıkarma deneyleri, kiriş testlerinden daha az güvenilir olarak dikkate alınmıştır. Kiriş deneylerinden en yaygın olarak kullanılanları, Bureau of Standarts Deneyi, Teksas Deneyi, Standart Belçika mafsalı Kiriş Deneyi ve büyük boyutlu betonarme kirişler üzerinde yapılan Kiriş Çatlama Deneyidir.

3.5.8.1. Bureau Deneyi

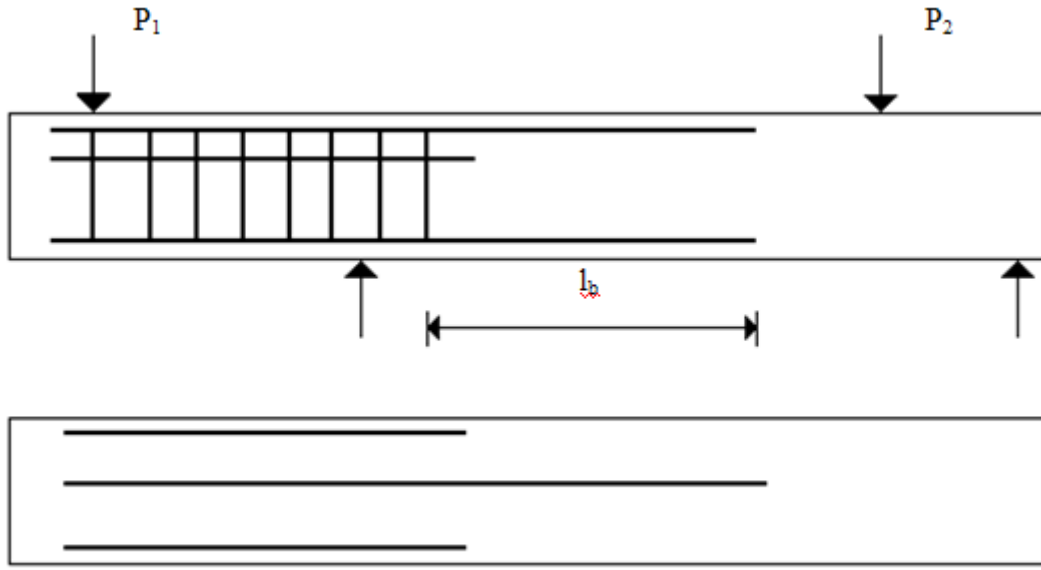
Kenetlenme boyunun saptanmasında daha gerçekçi şartları sağlayan bir deney türüdür. Şekil 3.14' te gösterilen Bureau of Standarts deney elemanında kesme kırılmasını önlemek için aşırı etriye kullanmak gerekmektedir. Bu durum ise aderansı büyük ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek açısından önemli bir sakınca doğmaktadır.



Şekil 3.14. Bureau deneyi

3.5.8.2. Teksas Deneyi

Bureau Standart deneyine benzer şekilde kenetlenme boyunun incelendiği bu deney türünün sakıncası, donatının gerçekte bağdaşmayacak genişlikte bir beton kütleyle gömülmüş olmasıdır (Şekil 3.15). Bu kiriş tipinde de başlıca önemli olan, donatıyı örten betonu sınırlayabilecek olan mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmelerinin önlenmesidir. Böylece, yarılma önlenmesi ortadan kaldırılmaktadır.

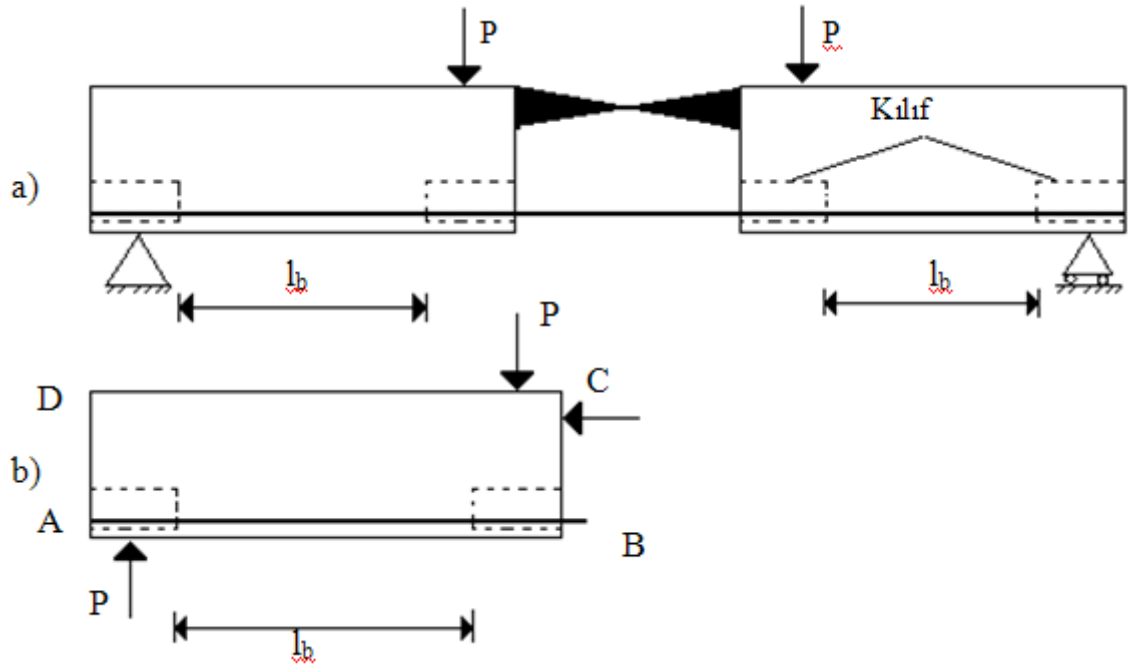


PLAN

Şekil 3.15. Teksas deneyi

3.5.8.3. Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi

Donatı çubuklarının çekme durumundaki betonla sarılı olmalarını sağlayan bu tür bir deney elemanı ile gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilir. Kiriş ortasındaki mafsallın amacı, çubuğa etkiyen kuvvetin kesin olarak belirlenmesidir (Şekil 3.16). Denenen çubuklara etkiyen kuvvet, epruvete yüklenen P kuvveti ile orantılı olup, kademeli olarak artırılmaktadır. Kademeler çubukta belirli çekme gerilmeleri oluşturmak üzere düzenlenmiştir.



Şekil 3.16. Standart mafsallı Belçika Deneyi

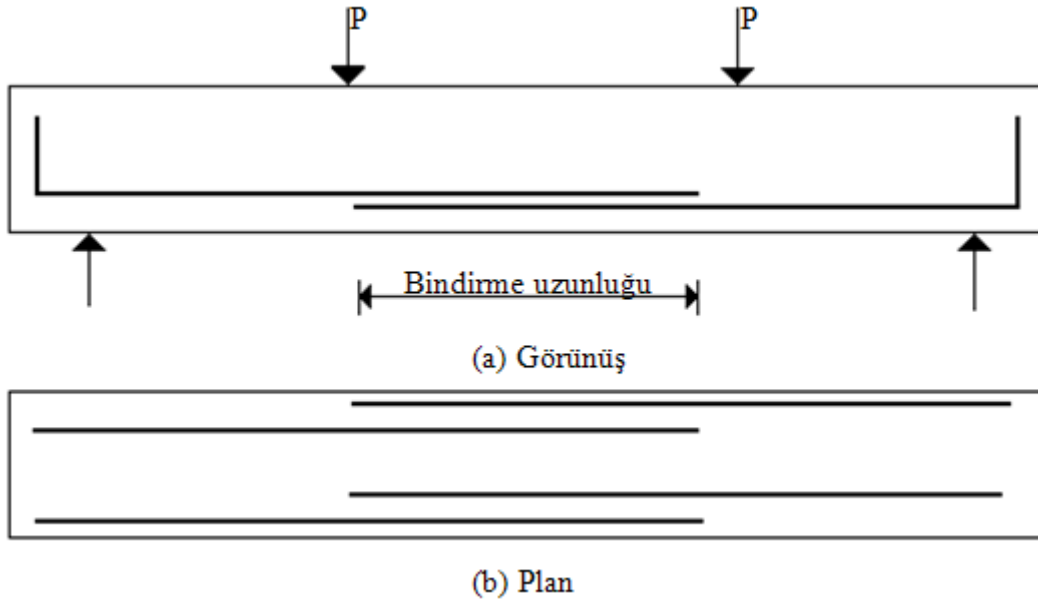
Şekil 3.16b deki serbest cisim diyagramlarından görüleceği gibi, bu deney elemanın yarısı, Şekil 3.1 ‘da gösterilen eksantirik çekip çıkarma deney numunesine benzemektedir. Ancak, O.D.T.Ü.‘ de yapılan deneyler, bu iki tür deney elemanından elde edilen sonuçların oldukça farklı olduğunu göstermiştir. Belçika deneyinde, mesnet ile yük uygulanan nokta arasındaki deplasman farkının, eksantirik çekip çıkarma deneyine oranla çok fazla olması, iki deney türü arasındaki tek fark olduğundan, gözlenen dayanım farkı bu nedene bağlanmıştır. Daha sonra özel bir deney düzeni geliştirilerek deplasmanlar verildiğinde, sonuçların birbirine yaklaştığı gözlenmiştir [96, 106].

3.5.8.4. Kiriş Çatlama Deneyi

Eğilme çekme çatlaklarının aderans davranışını etkilediği kabul edildiğinden beri, bu tür deney testleri daha çok önem kazanmıştır. Bu deney tipinde, belirli bir türdeki donatının kullanılmasıyla oluşan kiriş çatlama durumunun incelenmesi ve donatıdaki gerilmenin tespiti esastır. Genellikle dikdörtgen kesitli olarak alınan bu betonarme deney kirişi, belli bir L açıklığında iki mesnete oturtulmaktadır. Yükleme, düşey, simetrik ve belli bir aralıkta olan iki tekil yük aracılığıyla yapılmaktadır. Yükleme esnasında, açıklık ortası sehim ölçümlerinin de yapılabilmesi bu deney türüne ayrı bir önem kazandırmaktadır. Bu

deney türünde, test numunesinin büyük boyutlu olması ve dolayısıyla daha gerçekçi sonuçları vermesi önemlidir.

Şekil 3.17’ de görüldüğü gibi, çekme donatısı, sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmektedir. Böylece nihai yükte, donatı akmadan önce, yarıлма göçme modu ile numunenin göçmesi söz konusu olmaktadır. Bu durum ise, bindirmeli ekli donatıların maksimum kapasitesine ulaştığını göstermektedir. Dolayısıyla aderans dayanımı direkt olarak donatıda meydana gelen gerilmeden tayin edilebilmektedir [107].

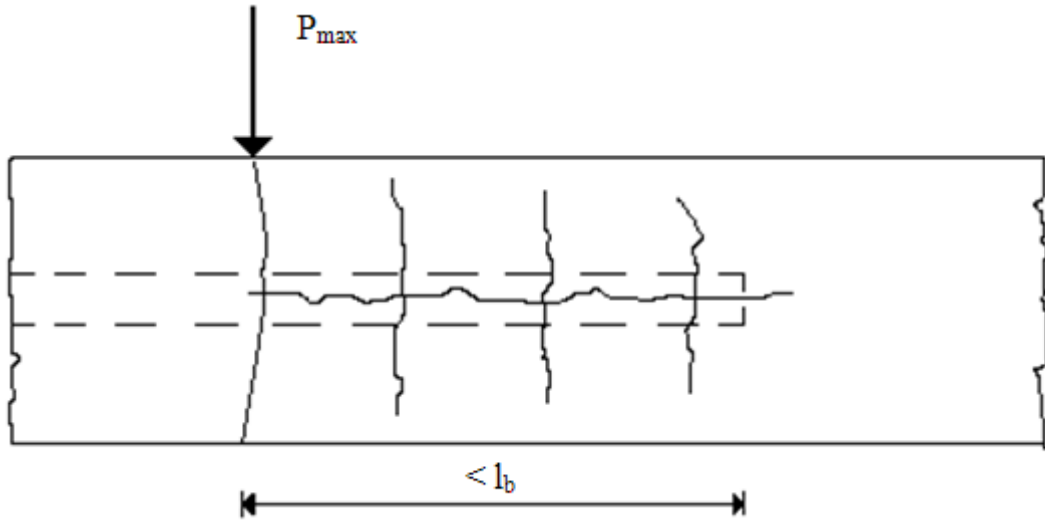


Şekil 3.17. Çekme donatısı sabit moment bölgesinde bindirmeli ekli olarak yerleştirilmiş kiriş deneyi

3.6. Aderansta Çatlama Olayı

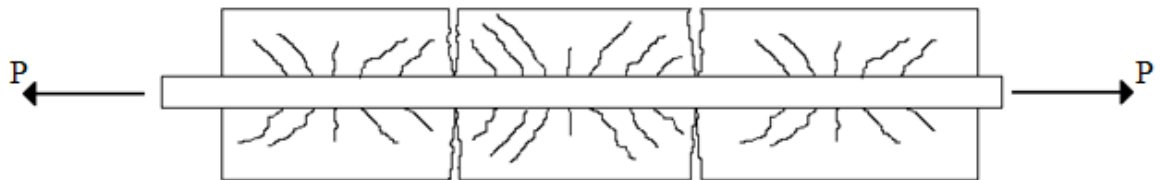
Betonun çekme altındaki kopma uzamasının değerinin çeliğe göre düşük olması, betonun donatı çubuklarının şekil değiştirmesini belirli bir sınır gerilmeden sonra izleyememesi çatlama sonucunu doğurur.

Aderans nedeniyle oluşabilecek çatlakların tanınmasında ve diğer çatlaklardan ayırt edilmesinde fayda vardır. Şekil 3.18’ de kenetlenme boyunun yetersiz olması nedeni ile kiriş alt yüzünde gözlenen çatlaklar gösterilmiştir. Şekilde donatı çubuğu kesik çizgilerle gösterilmiştir. Gösterilen bu tür çatlama, donatı çubuklarının konumuna ve beton örtüsünün kalınlığına göre, elamanın alt veya yan yüzünde gözlenir.



Şekil 3.18. Nervürlü donatının neden olduğu aderans çatlama

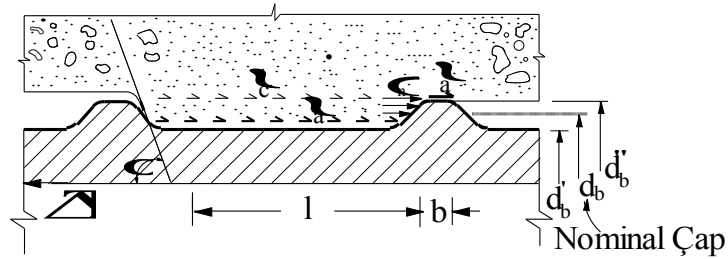
Gotto [108], yapmış olduğu deneysel çalışmada, nervürlü donatının betona uyguladığı dış kuvvetleri nedeniyle oluşan iç çatlakların resmini çekmeyi başarmıştır. Donatıya aksenal çekme uygulanarak denenen bir elemanda, gözlenen iç çatlama, Şekil 3.19’ da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, oluşan çekme çatlakları (enine çatlak), elemanı üç parçaya ayırmıştır. Çubuktaki dışların oluşturduğu çatlaklar, çekme çatlağına doğru eğilmektedir. Betondaki çatlamanın nedeni, asal çekme gerilmeleri olduğuna göre, asal basınç gerilmelerinin bu çatlaklara paralel yönde oluşacağı söylenebilir. Gotto’ nun çektiği fotoğrafların incelenmesinden, asal basınç gerilmelerinin yönü ile çubuk eksenini arasındaki açının 45° olduğu görülür. Asal basınç gerilmelerinin çubuk eksenine dik yöndeki bileşeni, iç basınç altındaki boru analogisindeki iç basınca eşittir. Gotto, iç çatlakların eğiminin beton örtüsüne göre değiştiğini, beton örtüsü fazla elemanlarda çatlak ile donatı arasındaki açının arttığı gözlemlenmiştir.



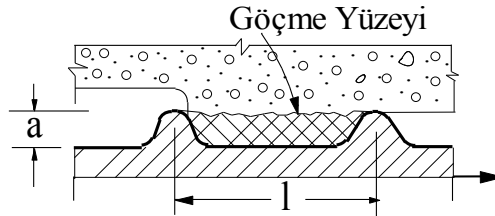
Şekil 3.19. Aderansın oluşturduğu iç çatlaklar

3.7. Aderansta Göçme Mekanizmaları

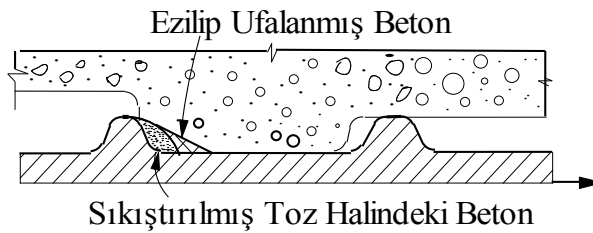
Aderansı geliştirilmiş yüksek dayanımlı donatı çubuğu kullanılması durumunda beton ile donatı arasındaki bağ ve etkileşim ile ilgili olarak oluşan gerilmeler söz konusudur. Nervürlü çubuğun komşu iki dişi arasında sağlanan aderans direnci, bölgesel seviyede, kimyasal adezyon nedeniyle çubuk yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi (v_a), iki nervür arasındaki silindirik beton yüzeyi üzerindeki kayma gerilmesi (v_c), beton basınç mukavemeti (f'_c) ve nervür yüzüne etkiyen basınç gerilmesine (σ_n) bağlıdır (Şekil 3.20a).



a) İki komşu nervür arasında oluşan gerilmeler



b) Nervürlerde kesme sıyrılması göçme modu



c) Bölgesel ezilme ile betonun yarılması sonucu oluşan göçme

Şekil 3.20. Nervürlü çubuğun iki çıkıntısı arasındaki bölgesel davranış [109]

Rehm [110], aderans probleminin birçok yönlerinin dişler arası uzaklık (l) ile diş yüksekliği (a) oranı geometrik parametresine göre ele alınabileceğini göstermiştir. Park ve

Paulay [109], Rehm' in bulguları ışığında ve l/a değerine göre aderans göçüşünü veren iki türlü mekanizmayı önermişlerdir [111].

Aderans göçüş türü üzerinde belirleyici olan l/a oranı, yaklaşık olarak 10' dan daha az olduğu zaman beton kesme kuvveti, tipik olarak sıyrılma davranışına sebep olacaktır ve çubuk Şekil 3.20b' de gösterildiği gibi sıyrılacaktır. Yani, göçme, donatının dışlar arasındaki parçalanmış beton ile birlikte sıyrılıp çıkması ile gerçekleşecektir. Bunun yanında, sıyrılma göçmesi, beton örtü kalınlığının donatı çapından çok büyük olması ($c > 3\phi$) veya yarıma kuvvetine karşı koyan etkili enine basınç olması durumunda da meydana gelmektedir. Bu çalışmada da kullanılan donatı çubuklarında olduğu gibi, l/a oranı 10' dan büyük olduğu zaman, parçalanıp ufalanan betonun, nervürün önünde daha büyük kayma değerlerinde yarıma çatlağına neden olabilecek bir kama oluşturduğu görülmektedir (Şekil 3.20c). Böylece, donatının sıyrılma davranışı, yarıma çatlakları oluşacak şekilde kendini gösterir ve yapısal açıdan tehlike arz eden sıyrılıp-çıkma davranışı önlenmiş olur. Yani, donatı çubuğunun çevresini saran betona göre relatif kayması sonucu, nervürlerin betonda oluşturduğu düşey radyal çekme kuvvet beton örtü üzerinde halka gerilmeler oluşturur. Aderans kuvvetinden kaynaklanan söz konusu çekme kuvveti, beton çekme kapasitesini aşarsa, beton kaplamanın yarılması sonucu, aderans göçmesi oluşur.

Bunun yanında, söz konusu bu kamanın üst yüzeyi boyunca sıyrılma olabileceğinden yarıma çatlağı oluşabilmesi için Şekil 3.20a' da gösterilen α açısının 40° den büyük olması koşulunun sağlanması zorunludur [109].

Donatı çubuğunun sıyrılması, nihai davranışı ve yapı elemanlarının kırılmasını etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Sıyrılma davranışı, yukarıda da değinildiği gibi, çubuk özelliklerinin (geometrisi ve çelik tipi), beton özelliklerinin, beton örtü kalınlığının ve enine donatı miktarının bir fonksiyonudur [28].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Farklı agregaların kullanılmasıyla elde edilen kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri ve aderans dayanımını incelemek amacıyla yapılan bu çalışmaya ait detaylı bilgiler bu kısımda sunulmaktadır.

Çalışmada; dere, kırmataş ve pomza olmak üzere 3 farklı agrega kullanılmıştır. Toz malzemeler ise silis dumanı ve C sınıfı uçucu küldür. Toz malzemeler tek başlarına %10, %15, %20, karışık olarak ise %10+%10 (%20) oranlarında kullanılmışlardır. Referans betonu olarak toz mineral katkısız KYB üretilmiştir. KYB' lerin taze haldeki özelliklerinin belirlenmesi için 40 dm³'lük karışımlar hazırlanmıştır. Bu çalışmada kendiliğinden yerleşebilmeyi test etmede kullanılan metodlar aşağıda sıralanmıştır. Bunlar:

- Yayılma çapı,
- T₅₀ süresi,
- V hunisi,
- L kutusu,
- Elek ayrışma direnci deneyleridir.

Sertleşmiş beton deneyleri için 7,5x7,5x30 cm kiriş, 10x10x10 cm küp, 15x15x15 cm küp ve 15x15x15 cm donatılı küp numuneler (Ø16 ve Ø20) hazırlanmıştır. Bu numunelere uygulanan deneyler;

- Basınç dayanımı,
- Eğilmede çekme dayanımı,
- Yarmada çekme dayanımı,
- Aderans dayanımı deneyleridir.

4.1. Malzemeler

4.1.1. Çimento ve Toz malzemeler

Bu çalışmada, Oyak Çimento Grubuna ait olan Elazığ Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 N tipi Portland Çimentosu kullanılmıştır. Ayrıca, kendiliğinden yerleşen betondaki ince toz malzeme (<0.125 mm) miktarına da katkı sağlamak amacıyla

Kangal Termik Santraline ait C sınıfı uçucu kül ve Sika Firmasından temin edilen, Eti Elektro Metalurji A.Ş.' ye ait silis dumanı, karışıma mineral katkı olarak katılmıştır. Kullanılan uçucu kül, silis dumanı ve Portland çimentosuna ait kimyasal bileşim ve fiziksel özellikler Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çimento, uçucu kül ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	Portland Çimentosu	Uçucu Kül	Silis Dumanı
S(SiO₂)	21,12	38,34	91
A(Al₂O₃)	5,62	16,69	0,58
F(Fe₂O₃)	3,24	5,11	0,24
C(CaO)	62,94	27,62	0,71
MgO	2,73	1,60	0,33
SO₃	2,30	4,44	1,06
Na₂O	-	-	0,38
K₂O	-	-	4,34
Cl	-	-	0,8-1,0
Kızdırma Kaybı	1,78	0,79	1,84
Yoğunluk (g/cm³)	3,1	2,3	2,2
Özgöl Yüzey Alanı (cm²/g)	3370	2665	144000

4.1.2. Agregalar

Deneylerde üç farklı agrega kullanılmıştır. Bunlar dere agregası, kırmataş ve bazik pomzadır. Dere ve kırmataş agregası Elazığ'ın Palu, pomza agregası ise Elazığ'ın Yeniköy yöresine aittir. Agregalar 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm aralıklara bölünerek kullanılmıştır. Tüm serilerin 0-4 mm' lik kısmı dere agregası, kırmataşlı serilerin 0-4 ve 4-8 mm arası dere agregasıdır. Elek aralıklarının böyle kullanılmasının sebebi hazırlanan betonların, kendiliğinden yerleşebilme özelliklerinin sağlanmasıdır. Kırmataşlı serilerde elek aralıklarının yukarıda bahsedildiği gibi seçilmediği taktirde, taze haldeki betonun kendiliğinden yerleşme özelliği sağlanamamıştır. Deneylerde kullanılan agregaya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2.Deneylerde kullanılan agregaya ait özellikler

Agrega özellikleri	Dere		Kırmataş		Pomza	
	İnce	İri	İnce	İri	İnce	İri
Kuru özgül ağırlık (kg/dm³)	2,73	2,67	2,73	2,67	2,07	1,91
Su emme (%)	2,0	2,0	2,0	2,0	17,7	8,3
Gevşek birim ağırlık (kg/dm³)	1,580	1,470	-	1,517	0,836	0,789
500 devir aşınma (%)	-	5,6	-	18	-	42

4.1.3. Kimyasal Katkı

Karışımlarda Sika firmasına ait “Visco Crete Hi-Tech 36” serisi yüksek performanslı 3. nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Bu katkı maddesinin, plastik kıvamlı betonlar için bağlayıcının % 0.4 - 1.0’i oranında, KYB için ise bağlayıcının %1.0 - 2.0’si oranında kullanılması tavsiye edilir. Yapılan deneme karışımları sonucu tüm serilerde akışkanlaştırıcı katkı maddesi %1,5 oranında kullanılmıştır. Tablo 4.3’de ise akışkanlaştırıcının özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3. Akışkanlaştırıcı katkının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Görünüm / Renk	Açık kahverengi sıvı
Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1.07 – 1.11 kg/l (20 °C’de)
pH Değeri	3 - 7
Donma Noktası	-9 ⁰ C
Suda Çözünebilir Klorür Yüzdesi	En fazla % 0.1, Klorür içermez.
Alkali Miktarı	En Fazla % 4

4.1.4. Karma Suyu

Deneyisel çalışmaların tamamında TS EN 1008’e [112] uygun, Elazığ İli Şebeke suyu kullanılmıştır. Karma suları herhangi bir depoda bekletilmeden, doğrudan içme suyu şebekesinden alınarak kullanılmıştır.

4.2. Karışım Oranları

Bu çalışmada agrega olarak dere, kırmataş ve pomza agregası, toz malzeme olarak ise %10, % 15, %20 ve %10+%10 (karışık) oranlarında silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak toplam 24 seri beton üretilmiştir. Kullanılan kırmataş, dere agregasının elek üstünde kalanının kırılmasıyla elde edilen kırmataştır. Bunun için kuru özgül ağırlıkları aynıdır. Tüm agregalar 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm olarak üç sınıfa ayrılmıştır. Kendiliğinden yerleşebilme özelliklerinin sağlanabilmesi için tüm serilerin 0-4 mm aralığındaki agrega dere agregasıdır. Tüm karışım oranları Tablo 4.4 – 4.6’ da verilmiştir.

Tablo 4.4. Dere agregalı serilerin karışım oranları

Seriler	Su/toz (ağırlıkça)	Çimento (kg/m ³)	SD* (kg/m ³)	UK** (kg/m ³)	SA*** (kg/m ³)	Dere Agregası (mm)		
						0-4 (dere)	4-8 (dere)	8-16 (dere)
Ref-D	0,42	500	-	-	7,5	813	406	406
D-S10	0,42	450	50	-	7,5	804	402	402
D-S15	0,42	425	75	-	7,5	800	400	400
D-S20	0,42	400	100	-	7,5	795	397	397
D-U10	0,39	450	-	50	7,5	826	413	413
D-U15	0,39	425	-	75	7,5	822	411	411
D-U20	0,39	400	-	100	7,5	818	409	409
D-US	0,39	400	50	50	7,5	816	408	408

Tablo 4.5. Kırmataş agregalı serilerin karışım oranları

Seriler	Su/toz (ağırlıkça)	Çimento (kg/m ³)	SD* (kg/m ³)	UK** (kg/m ³)	SA*** (kg/m ³)	Kırmataş Agregası (mm)		
						0-4 (dere)	4-8 (dere)	8-16 (k.taş)
Ref-K	0,42	500	-	-	7,5	813	406	406
K-S10	0,42	450	50	-	7,5	804	402	402
K-S15	0,42	425	75	-	7,5	800	400	400
K-S20	0,42	400	100	-	7,5	795	397	397
K-U10	0,39	450	-	50	7,5	826	413	413
K-U15	0,39	425	-	75	7,5	822	411	411
K-U20	0,39	400	-	100	7,5	818	409	409
K-US	0,39	400	50	50	7,5	816	408	408

Tablo 4.6. Pomza agregalı serilerin karışım oranları

Seriler	Su/toz (ağırlıkça)	Çimento (kg/m ³)	SD* (kg/m ³)	UK** (kg/m ³)	SA*** (kg/m ³)	Pomza Agregası (mm)		
						0-4 (dere)	4-8 (pomza)	8-16 (pomza)
Ref-P	0,42	500	-	-	7,5	986	229	229
P-S10	0,42	450	50	-	7,5	975	227	227
P-S15	0,42	425	75	-	7,5	969	225	225
P-S20	0,42	400	100	-	7,5	964	224	224
P-U10	0,39	450	-	50	7,5	1002	234	234
P-U15	0,39	425	-	75	7,5	997	232	232
P-U20	0,39	400	-	100	7,5	992	231	231
P-US	0,39	400	50	50	7,5	991	231	231

*Silis dumanı, ** Uçucu kül, *** Süper akışkanlaştırıcı

4.3. Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.3.1. Taze Beton Deneyleri

KYB' lere uygulanan taze beton deneyleri sırasıyla; yayılma çapı, T₅₀ süresi, V hunisi, L kutusu, elek ayrışma direnci deneyidir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Yayılma çapı, T₅₀ süresi, V hunisi, L kutusu, elek ayrışma direnci deneyi

4.3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada aderans deneyleri için çapları Ø16 ve Ø20 olmak üzere 2 tip donatı kullanılarak toplam 432 adet 15x15x15 cm küp numune, basınç dayanımı deneyleri için 216 adet 15x15x15 cm küp numune, yarmada çekme deneyleri için 216 adet 10x10x10 cm küp numune ve eğilmede çekme deneyleri için 216 adet 7,5x7,5x30 cm kiriş numunesi hazırlanmıştır.

Tüm karışımlar Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü laboratuvarında Şekil 4.2’de gösterilen 500 dm³ kapasiteli karıştırıcıda hazırlanmıştır. Karıştırıcıya sırasıyla agreg, çimento ve toz malzeme konulup homojen bir karışım elde etmek için 1 dakika karıştırılmıştır. Kuru karışım yapıldıktan sonra karışım suyunun % 90’ı ilave edilerek 2 dakika karıştırılıp suyun geri kalan kısmına akışkanlaştırıcı katkı eklenerek karışıma ilave edilmiş ve 2 dakika daha karıştırılarak toplam 5 dakikada karıştırma işlemi tamamlanmıştır.

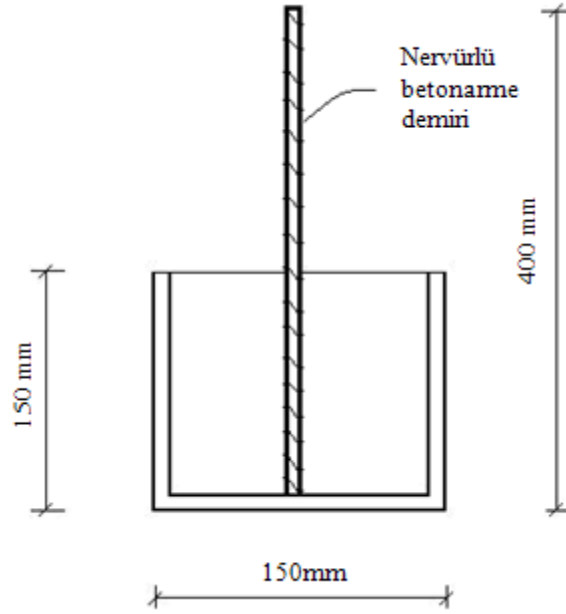


Şekil 4.2. 500 dm³ kapasiteli karıştırıcı

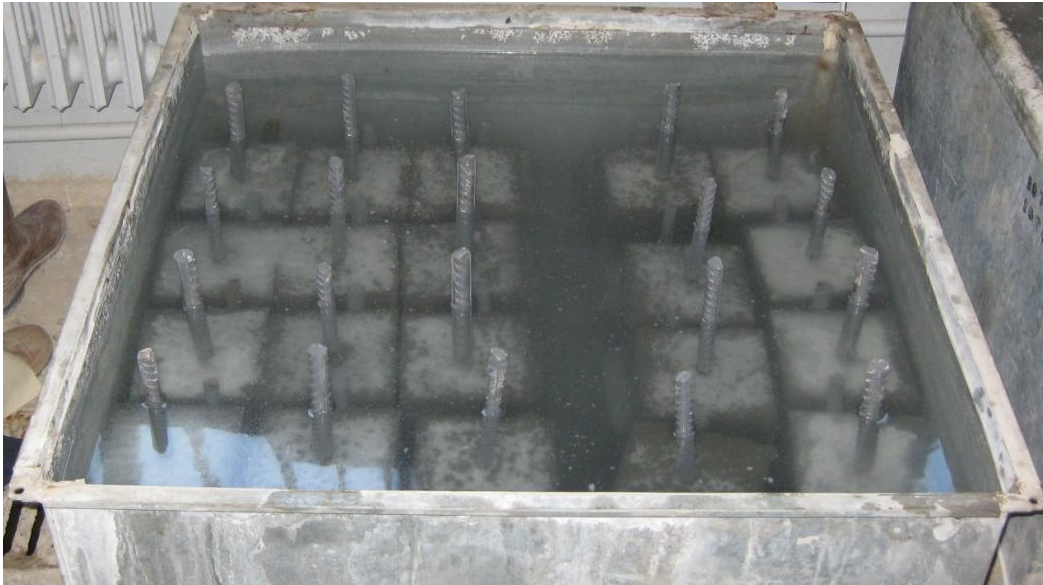
Harç kendi ağırlığınca herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan kalıba iki kademedede doldurulmuştur. Numuneler bir gün sonunda kalıplardan çıkarılarak 23±2 °C’de kirece doymun su dolu kür havuzuna bırakılmıştır. Numuneler 7, 28 ve 90 gün sonunda kür havuzundan çıkarılarak sertleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuştur.

Aderans deneyi için hazırlanan numunelerde, donatı çapının aderans dayanımına etkisini görebilmek için Ø16 ve Ø20 olmak üzere 2 farklı çapta nervürlü donatı

kullanılmıştır. Kullanılan donatıların boyları 40 cm' dir (Şekil 4.3). Numunelere su kürü uygulanırken donatıların korozyona maruz kalmalarını engellemek amacıyla, donatı çubuklarının beton dışında kalan kısımları antipas özellikli boya ile 2 kat boyanarak korunmuşlardır (Şekil 4.4).



Şekil 4.3. Aderans deney Numunesi



Şekil 4.4. Aderans deney Numuneleri

4.3.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi için 15x15x15 cm ebadında küp numuneler kullanılmıştır. Her yaş için 3'er adet numune olmak üzere 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarına bakılmıştır. Basınç dayanım deneyi, TS EN 12390-3 standardı uyarınca ve 3000 kN kapasiteli otomatik kontrollü pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir [113] (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Yük kontrollü pres

—

(4.1)

= Beton deney numunesi basınç dayanımı (N/mm^2)

P = Kırılma yükü (N)

A = Kesit alanı (mm^2)

4.3.4. Aderans Dayanımı Deneyi

Aderans deneyleri 15x15x15 cm küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Bütün aderans deney numuneleri 7, 28 ve 90 gün su küründe bekletildikten sonra ASTM C 234-91a uyarınca yapılmıştır [114]. Aderans deneyi için INSTRON 8503 çekme makinesi

kullanılmıştır. Deneylerde çekme makinesinin hızı 2mm/dk olacak şekilde sabit tutulmuştur. Yapılan aderans deneyinin düzeneği Şekil 4.6' da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Aderans deney düzeneği

Deneylerde elde edilen aderans kuvvetinin yardımıyla aderans dayanımı aşağıda verilen formülle hesaplanmıştır:

$$\tau = \frac{\text{Aderanskuvveti}}{\pi \times \phi \times l} \quad (4.2)$$

Bu formülde;

τ = Aderans gerilmesi

ϕ =Donatı çapı

l = Aderans boyu (betona gömülü donatı uzunluğu) alınmıştır [103, 115-117].

4.3.5. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi için 10x10x10 cm ebadında küp numuneler kullanılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deneyini 3000 kN kapasiteli otomatik kontrollü pres kullanılarak yapılmıştır. Pres tablasının merkezine 10x10x100 mm ölçülerindeki demir çubuklar ve numune Şekil 4.7’deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Yarmada çekme deneyi

—

(4.3)

= Küp numunelerin yarmada çekme dayanımı (N/mm^2)

P = Kırılmaya neden olan basınç yükü (N)

A = Kesit alanı (mm^2)

4.3.6. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Eğilmede çekme dayanımı deneyi için 7,5x7,5x30 cm ebadında kiriş numuneler kullanılmıştır. Her yaş için 3’er adet numune olmak üzere 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarına bakılmıştır. Numunelerin eğilmede çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-5 standardındaki hususlar dikkate alınarak üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş

metodu uygulanmıştır [118]. Eğilmede çekme dayanımı deneyinin uygulanmasında Şekil 4.8'deki yük kontrollü eğilmede çekme aleti kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Eğilmede çekme deneyi

(4.4)

= Eğilme dayanımı (N/mm^2)

P = Kırılmaya neden olan basınç yükü (N)

L = Kirişin uzunluğu (mm)

b = Kiriş kesitinin eni (mm)

d = Kiriş kesitinin yüksekliği (mm)

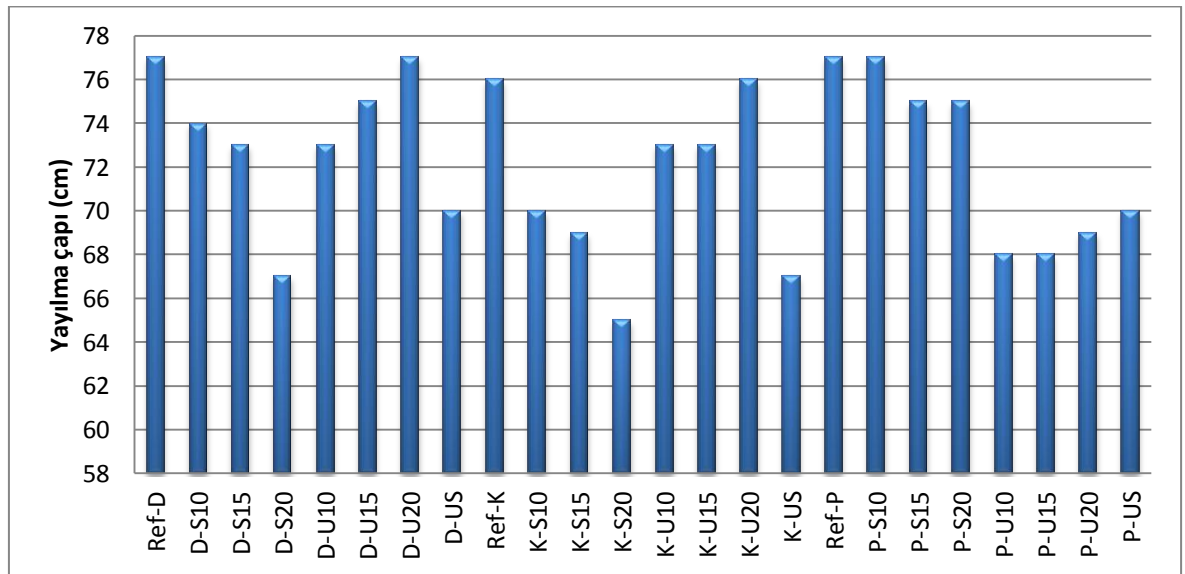
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞİRLENDİRMELER

Bu bölümde, hazırlanan 24 farklı karışım oranlı betonun taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.1. Taze Beton Özellikleri

Kendiliğinden yerleşen beton tasarımı taze beton özellikleri çok önemlidir. Genel olarak kendiliğinden yerleşen betonların taze haldeki özelliklerinin ne kadar iyi olursa, sertleşmiş beton özelliklerinin de o derece iyi olması beklenmektedir. Taze beton deneyleri ile ilgili deney sonuçları ve değerlendirmeleri bölümünde işlenebilirliğin tanımlama ölçütleri olan KYB' nin doldurma yeteneği, geçebilme yeteneği ve ayrışmaya karşı direnci incelenmiştir. Bu amaçla taze haldeki KYB' lere T_{50} , çökmede yayılma, V hunisi, L kutusu ve elek ayrışma direnci deneyleri uygulanmıştır.

KYB' nin doldurma yeteneğinin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem çökmede yayılma değeridir. İyi bir doldurma yeteneğine sahip KYB' nin çökmede yayılma çapının 55 ile 85 cm arasında kalması gereklidir. Diğer yandan Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) kendiliğinden yerleşen betonları yayılma çapına göre SF1, SF2 ve SF3 olarak sınıflandırmıştır [22]. Bu sınır değerler aşıldığında betonun konulduğu kalıbı doldurması güçleşmekte veya aşırı akışkan olduğundan agregası ve harç kısmı birbirinden ayrılmaktadır [58]. Şekil 5.1' de tüm serilerin yayılma çapları verilmiştir.



Şekil 5.1. KYB karışımlarının yayılma çapı grafiği

Toz malzeme olarak kullanılan uçucu külün miktarının artmasıyla yayılma çapı artmış, silis dumanı miktarının artması ile çap azalmıştır. Silis dumanının blaine inceliğinin daha fazla olmasından dolayı daha fazla suya ihtiyaç duyması ve su miktarının karışımlarda sabit tutulması bu sonucun alınmasında etkili olmuştur [44].

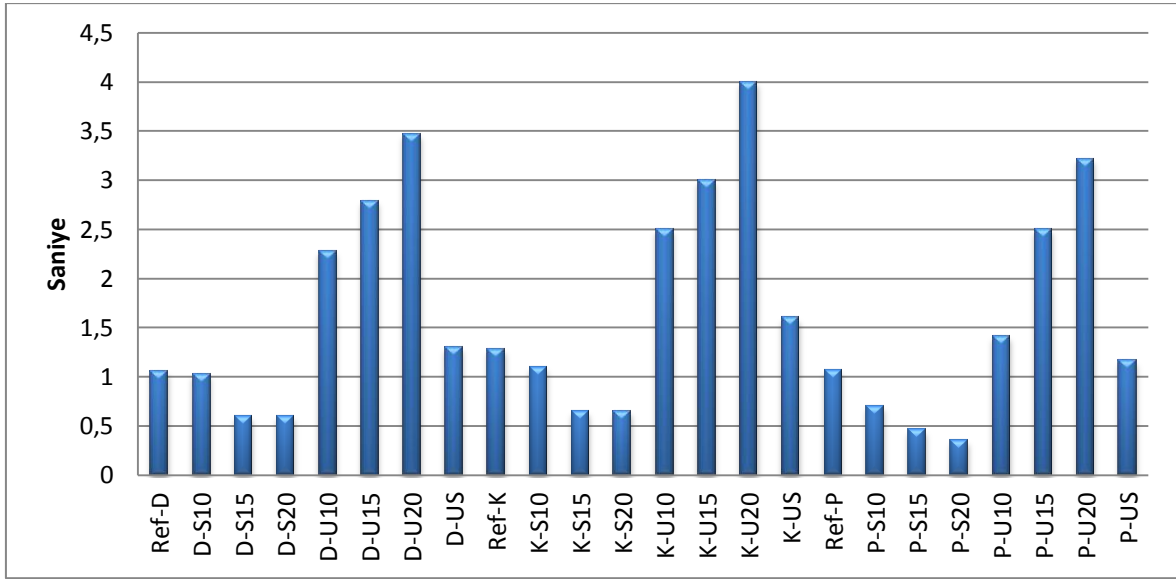
Aynı su/toz oranına sahip farklı agregalarla üretilen KYB' lerin yayılma çapları arasında değişiklikler vardır. Bunun nedeni agregaların yüzey yapılarının ve birim ağırlıklarının birbirinden farklı olmasıdır. Pomza da bulunan suya doygun haldeki gözenekler, agrega etrafında su filmi oluşturarak, agregalar arasındaki iç sürtünmeyi azaltmış, kırmataşla ve dere agregasıyla üretilen serilere göre silis dumanı katkılı pomzalı betonların daha fazla yayılma değerine ulaşmasını sağlamıştır [58]. Buna göre kırmataşla ve dere agregasıyla üretilen serilerde agregalar arası iç sürtünme daha fazla olup, agrega etrafı su filmiyle yeterince çevrilmediğinden, kimyasal katkının fazla olması da yayılma değerini çok fazla arttırmamıştır. Burada silis dumanının küresel yapısı ve pomzanın birim ağırlığının düşüklüğü, pomza agregalarının harç tarafından kolayca taşınmasını sağlamıştır. Uçucu kül katkılı pomzalı KYB' lerde yayılma çapı, uçucu kül miktarındaki artışla orantılı olarak artmasına rağmen, viskozitesinin çok artmasından dolayı, dere ve kırmataşlı serilerin yayılma değerlerine ulaşamamıştır. Dere agregası ve kırmataşlı seriler kendi aralarında karşılaştırıldığında, seriler arasında en az yayılma değeri yine kırmataşla üretilen serilerde elde edilmiştir.

Çökmede yayılma deneyinde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da taze betonda ayrışma olup olmadığının gözlemlenmesidir. Agregada veya karışım suyunda ayrışma olmaması istenir. Elde edilen 24 adet seriden, toz malzeme içermeyen referans betonlarında agrega ve su ayrışması gözlenmiştir (Şekil 5.2).

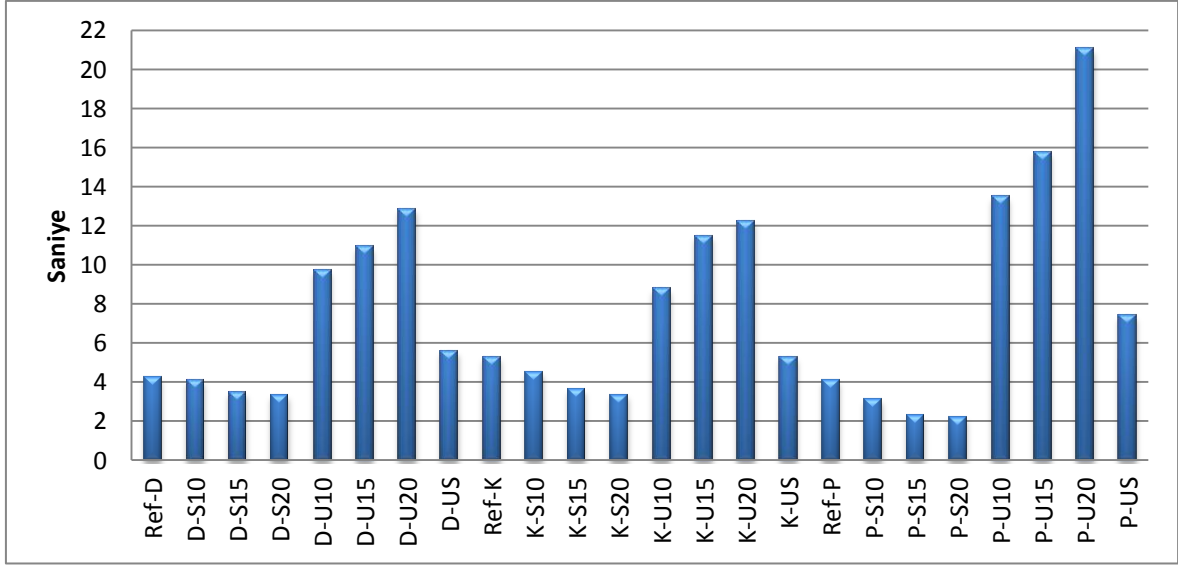


Şekil 5.2. Segregasyona uğramış ve segregasyona uğramamış taze beton

Kendiliğinden yerleşen betonların doldurma yeteneğinin belirlenmesi için uygulanan diğer test yöntemleri de çökmede yayılma işleminde betonun 50 cm' lik çapa ulaşma süresi (T_{50}) ve V kutusundan akma süresidir. Bu deneylerle genel olarak KYB' nin akış süresi ölçülerek viskozitesi hakkında fikir edinilmektedir. Şekil 5.3' de verilen T_{50} değerleri incelendiğinde, tüm seriler arasında en fazla T_{50} değeri kırmataşlı serilerde görülürken, en azı ise pomzalı serilerde görülmektedir. Şekil 5.4' deki V hunisinden akış süreleri incelendiğinde ise, en yüksek değerler uçucu kül katkılı pomzalı serilerde görülmektedir. Bu deneyde taze beton dikey olarak düşüş hareketi yaptığı için birim ağırlığı, kırmataş ve dere agregasına göre daha düşük olan pomzalı seriler, yayılmada olduğu gibi uçucu külün viskoziteye olan büyük etkisi ile de en yüksek akış sürelerine sahiptirler. Dere agregasıyla üretilen serilerin akış süreleri ise kırmataşlı serilerin değerlerinden çok az farkla daha düşüktür. Bunun sebebi deneylerde kullanılan dere ve kırmataş agregasının özgül ağırlıklarının aynı olmasıdır. Değerler arasındaki farkın sebebi dere ve kırmataş agregaları arasındaki yüzey yapılarıdır.

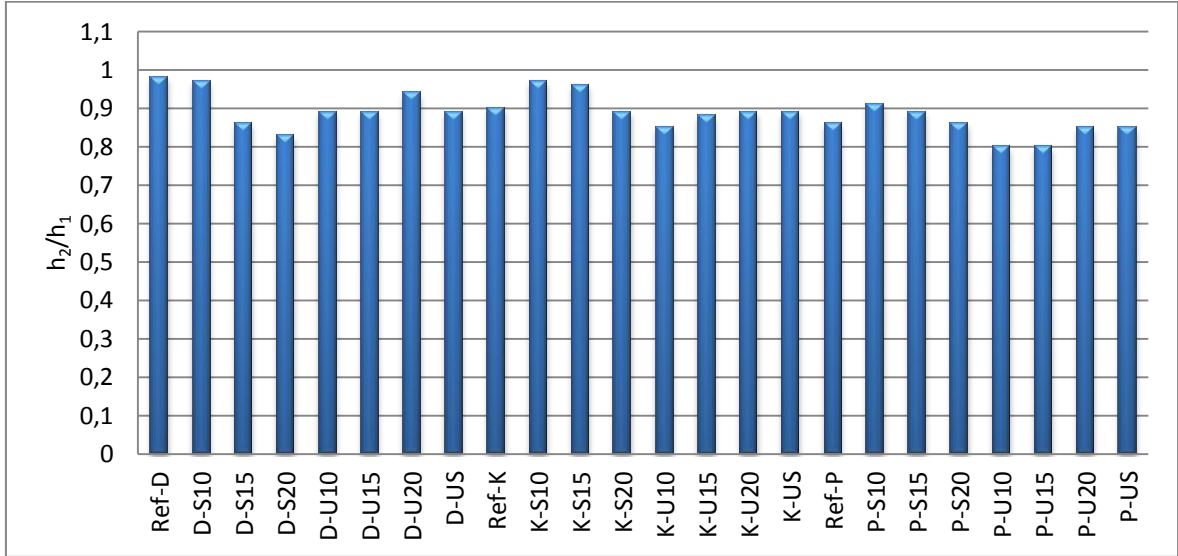


Şekil 5.3. KYB karışımlarının T_{50} grafiği



Şekil 5.4. KYB karışımlarının V hunisi akış süresi grafiği

KYB' nin geçebilme yeteneği genel olarak sınırlandırılmış (donatılı) deney yöntemleriyle belirlenmektedir. Bunlardan en çok kullanılanları L kutusu, J halkalı çökmede yayılma, Kajima kutusu ve U kutusu deneyleridir. Bu çalışmada KYB' nin geçebilme yeteneği, L kutusu deneyi ile belirlenmeye çalışılmış ve sonuçlar Şekil 5.5' de verilmiştir.

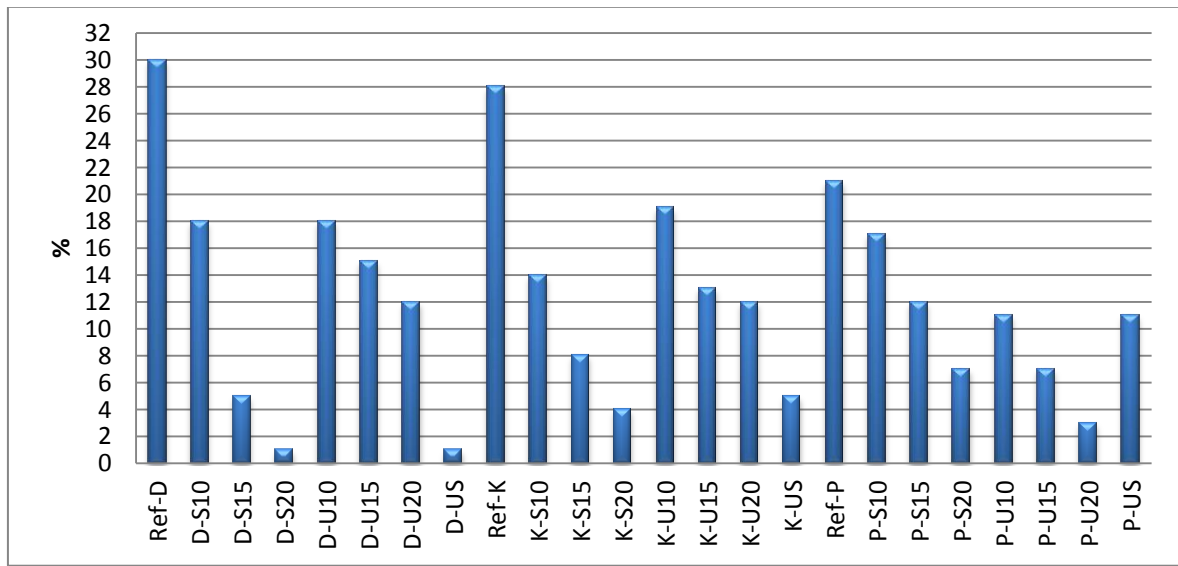


Şekil 5.5. KYB karışımlarının L kutusu h_2/h_1 oranı grafiği

Toz malzeme olarak kullanılan uçucu külün miktarının artmasıyla L kutusu h_2/h_1 oranı artmış, silis dumanı miktarının artması ile bu değerler azalmıştır. Toz tiplerinin KYB' lerin yayılma çaplarına etkisinde olduğu gibi, silis dumanının blaine inceliğinin daha

fazla olmasından dolayı daha fazla suya ihtiyaç duyması ve su miktarının karışımlarda sabit tutulması bu sonucun alınmasında etkili olduğu düşünülmektedir [44].

Şekil 5.6’ da tüm serilerin elek ayrışma direnci değerleri verilmiştir. Toz malzeme olarak kullanılan uçucu kül ve silis dumanı miktarının artması, elek ayrışma miktarını azaltmıştır. EFNARC’ a göre KYB’ lerin ayrışma sınırı %20’ dir [22]. Şekilde de görüldüğü referans betonları bu sınırın üzerinde ayrışma değerleri vererek KYB koşullarını sağlamamışlardır. Referans betonlarında toz malzeme kullanılmaması, serilerin tamamında aynı miktarda su ve akışkanlaştırıcı kullanılması bu sonucu doğurmuştur.



Şekil 5.6. KYB karışımlarının elek ayrışma direnci grafiği

5.2. Numunelerin Birim Ağırlıkları

Tablo 5.1’ de da tüm serilerin birim ağırlıkları verilmiştir. Serilerde kullanılan toz malzeme miktarının artmasıyla birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi toz malzemelerin çimento ile ağırlıkça yer değiştirmesi ve toz malzemelerin özgül ağırlıklarının çimentonunkinden daha az olmasıdır. Silis dumanının özgül ağırlığının çimento ve uçucu külün özgül ağırlığından düşük olmasından dolayı, silis dumanı katkılı seriler en düşük birim ağırlığına sahiptirler.

Tablo 5.1. KYB serilerinin birim ağırlıkları

Dere agregalı serilerin birim ağırlığı (gr/dm ³)		Kırmataş agregalı serilerin birim ağırlığı (gr/dm ³)		Pomza agregalı serilerin birim ağırlığı (gr/dm ³)	
Ref-D	2293	Ref-K	2290	Ref-P	1991
D-U 10	2268	K-U 10	2267	P-U 10	1938
D-U 15	2240	K-U 15	2249	P-U 15	1885
D-U 20	2228	K-U 20	2238	P-U 20	1848
D-US	2188	K-US	2187	P-US	1892
D-S 10	2211	K-S 10	2215	P-S 10	1911
D-S 15	2166	K-S 15	2156	P-S 15	1865
D-S 20	2156	K-S 20	2143	P-S 20	1838

Tüm seriler göz önüne alındığında pomzanın özgül ağırlığının, dere ve kırmataş agregasının özgül ağırlığından daha az olmasından dolayı, en düşük birim ağırlıklar pomzalı serilerde kaydedilmiştir. Pomza agregalı serilerin tamamının birim ağırlıkları, TS EN 206-1’de [119] verilen hafif beton birim ağırlığı için üst sınır olarak belirlenmiş olan 2000 kg/m³ değerinin altındadır. Buna göre bu çalışmadaki pomzalı beton serileri “Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton” olarak isimlendirilebilir.

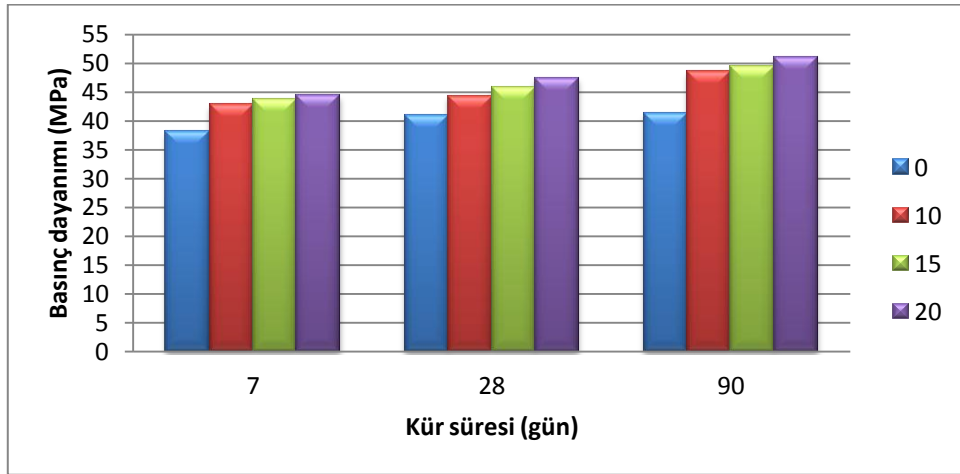
5.3. Dayanım Özellikleri

Bu çalışmada, KYB’ nin dayanım özellikleri kapsamında betonun farklı yaşlardaki basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme ve aderans dayanımı gibi dayanım özellikleri incelenmiştir. Betonların dayanımları, agrega özelliklerinin yanı sıra kullanılan toz malzeme tipi ve oranıyla da değişmektedir. Bu nedenle, hafif ve normal agregalı KYB’ lerin dayanımları hem agrega tipi hem de toz tipi ve oranına göre incelenmiştir.

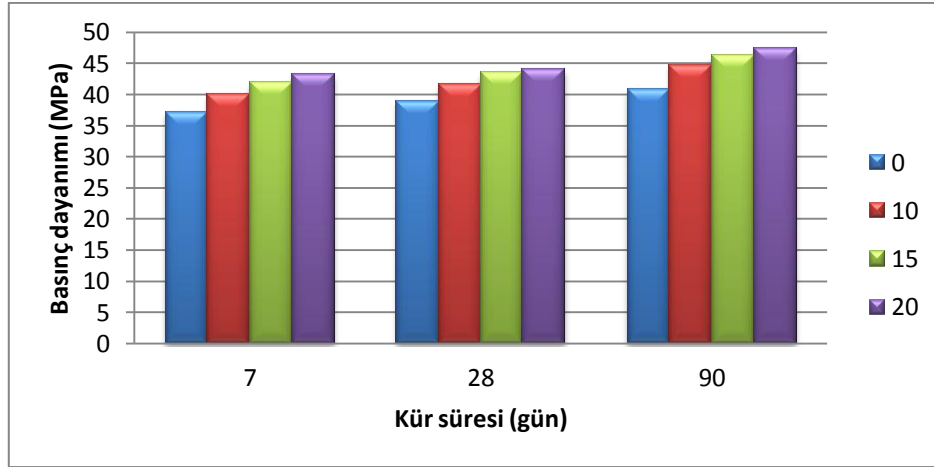
5.3.1. Basınç Dayanımları

Basınç dayanımı deneyleri 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için toplamda 216 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numune üzerinde uygulanmıştır.

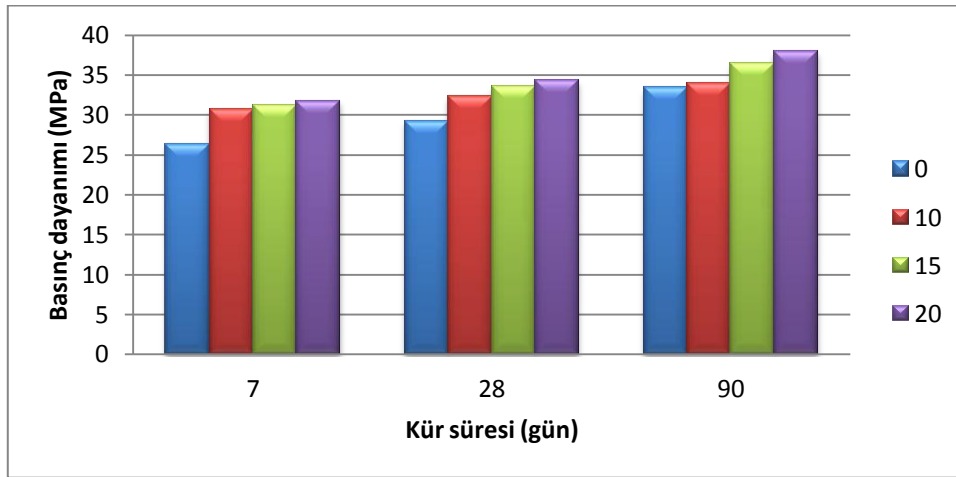
Deney sonuçları toz tipi dikkate alınarak incelenirse; Şekil 5.7–5.9’ da görüldüğü gibi, toz malzeme olarak kullanılan silis dumanı oranının artmasıyla her yaşta, silis dumanı katkıli betonların değerleri, mineral katkısız referans betonlarının değerlerini geçmiş ve en büyük basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Dayanımının büyük kısmı ilk günlerde kazanılmıştır. Burada puzolanik reaksiyon hızı yüksek olan silis dumanı çimento hidratasyonu süresince serbest kalsiyum hidroksitle reaksiyona sonucu C-S-H jellerinin oluşmasıyla kristal yapı oluşumuna katkıda bulunarak, betonun basınç dayanımı gelişiminde etkili olmaktadır [120, 121]. Ayrıca silis dumanı tane boyutu, çimento ve uçucu kül tane boyutundan çok daha küçük olduğu için agrega/çimento ara yüzeyinde puzolanik aktiviteden daha önemli filler etkisi gerçekleştirerek daha yoğun bir agrega-bağlayıcı ara yüzeyi oluşturmaktadır [103, 122, 123]. 7 günlük beton numunelerde görülen hızlı dayanım gelişiminin bir diğer nedeni ise su miktarını azaltıp çimento tanelerinin beton içerisinde homojen şekilde dağılmasını sağlayarak hidratasyonu hızlandıran süper akışkanlaştırıcı katkılarıdır. Bu kimyasal katkıları sayesinde beton karışım suyu yüksek oranda azaltılabilmektedir. Böylece beton üretimini takiben 7. günde dahi 28 günlük dayanım değerinin büyük kısmına ulaşılmış olunur [58].



Şekil 5.7. Kırmataş agregası ve silis dumanı içeren serilerin basınç dayanımları



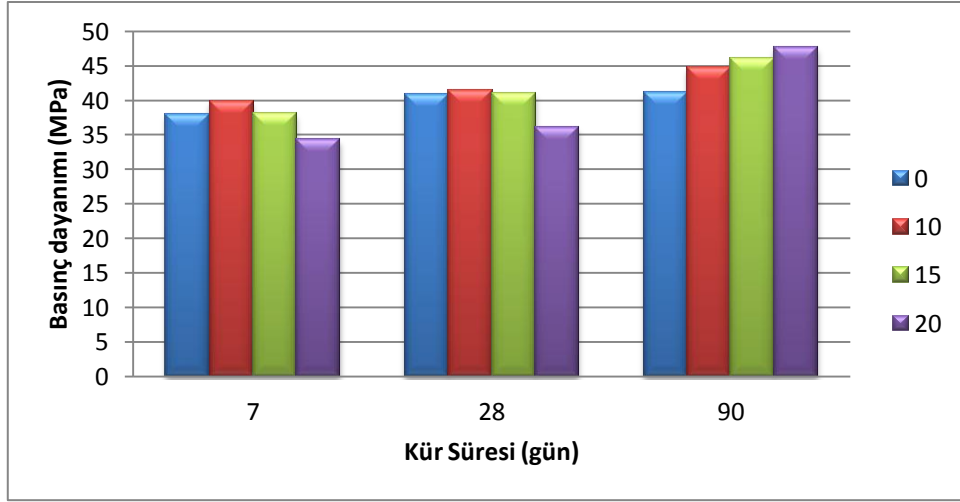
Şekil 5.8. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin basınç dayanımları



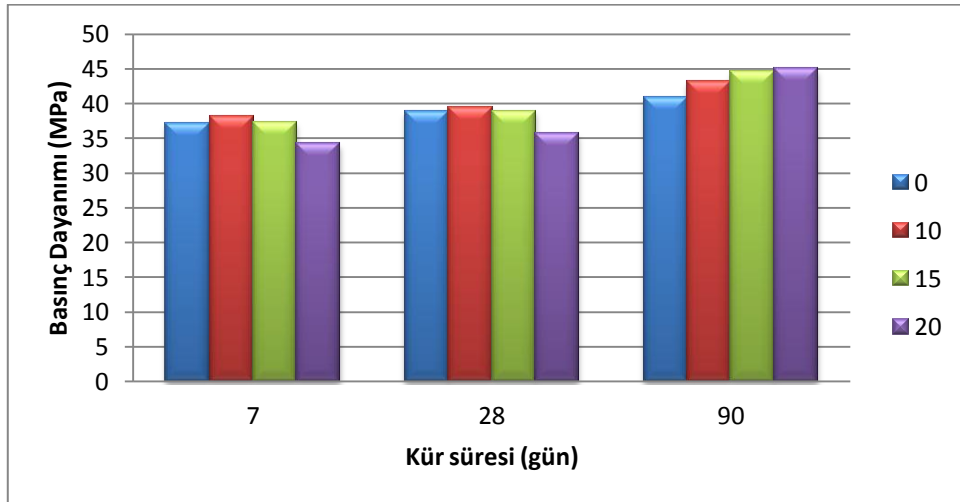
Şekil 5.9. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin basınç dayanımları

Uçucu kül katkılı serilerin sonuçları incelendiğinde ise (Şekil 5.10 – 5.12); 7 ve 28 günlük kür süreleri için, %10 uçucu kül katkılı tüm serilerin basınç dayanımları, referans betonlarının değerlerini geçerek en yüksek dayanıma ulaşmıştır. %15 uçucu kül katkılı serilerin basınç dayanımları ise referans betonlarının dayanımlarını geçmiş fakat %10 uçucu kül katkılı serilerin değerlerine az farklarla da olsa ulaşamamışlardır. %20 uçucu küllü seriler en düşük basınç dayanımı değerlerine sahiptirler. Kullanılan uçucu külün C sınıfı olması ve bundan dolayı erken yaşlarda betonda puzolanik etkisinden çok filler etkisi göstermesi, bu sonucun alınmasında etkili olmuştur. Karışımlarda uçucu kül miktarındaki artışla çimento miktarı azalmıştır. Düşük oranlardaki uçucu küller, erken yaşlarda beton bünyesindeki suları tutup ayrışmayı önlemiş ve dayanımı arttırmışlardır. Fakat kullanım oranları arttıkça, kimyasal özelliklerinden dolayı puzolanik özelliklerini erken yaşlarda gösteremeyen %20 oranında uçucu kül içeren seriler en düşük dayanımı göstermişlerdir.

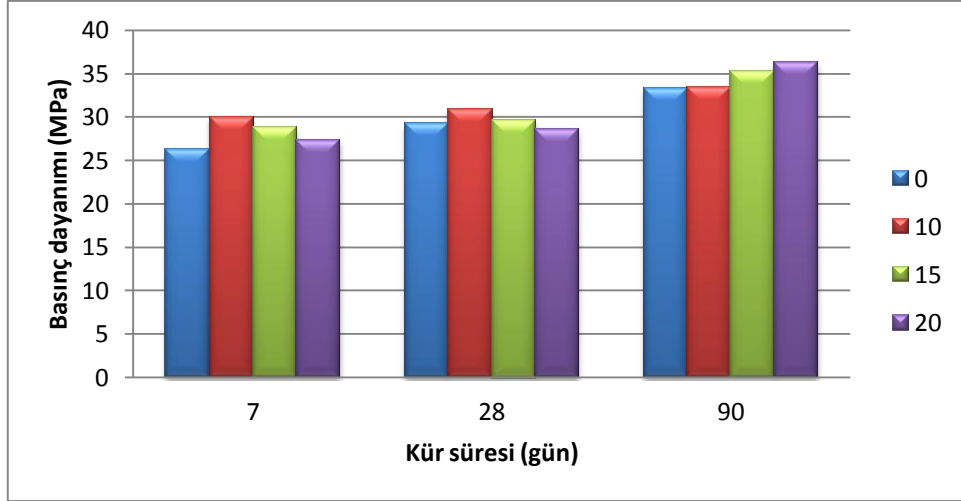
Uçucu kül katkılı serilerin 90 günlük kür süresi sonundaki basınç dayanımları incelendiğinde ise %20 uçucu küllü serilerin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Bu serileri sırasıyla %15 ve %10 uçucu küllü seriler izlemiştir. C sınıfı uçucu küller, puzolanik etkilerini ileri yaşlarda gösterdikleri için, uçucu kül miktarındaki artış, basınç dayanımı 90 günlük kür süresi sonunda arttırmıştır [124].



Şekil 5.10. Kırmetaş agregası ve uçucu kül içeren serilerin basınç dayanımları

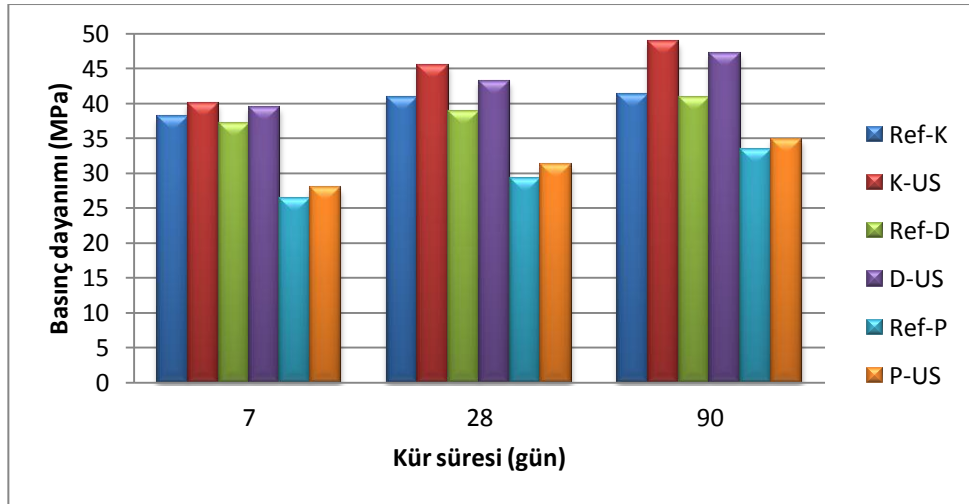


Şekil 5.11. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin basınç dayanımları



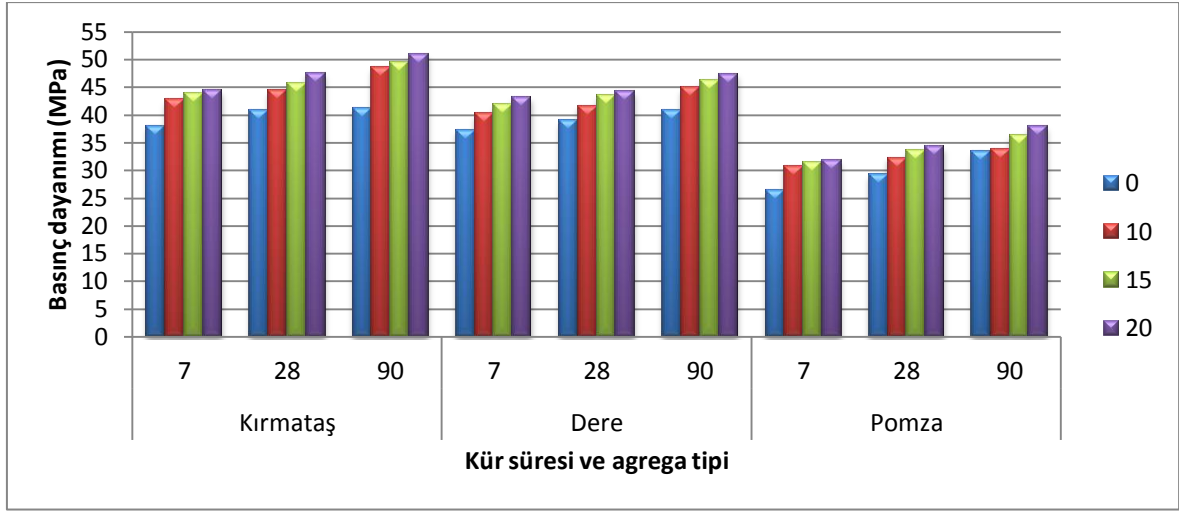
Şekil 5.12. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin basınç dayanımları

Uçucu kül ve silis dumanının beraber kullanıldığı seriler (K-US, D-US, P-US)' de basınç dayanımı değerleri, Şekil 5.13'de görüldüğü gibi tüm yaşlarda referans betonlarının değerlerini geçmiştir. İlk yaşlardaki dayanım kazanımına silis dumanının katkısı ve ileri yaşlarda da, karışımlarda bulunan uçucu küllerin ilave dayanım kazanımı, mineral katkısız üretilen referans betonlarının basınç dayanımını geçmede etkili olmuştur [44].

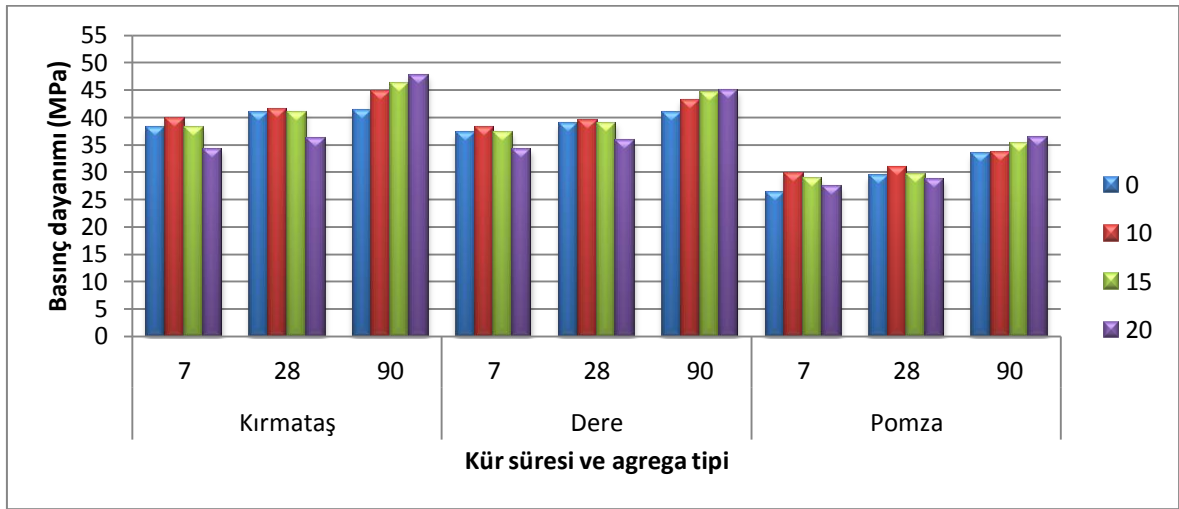


Şekil 5.13. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10 + %10)tüm serilerin basınç dayanımları

Basınç dayanımları agrega tipi göz önüne alınarak incelendiğinde, Şekil 5.13 – 5.15' de de görüldüğü gibi, tüm kür sürelerinde, kullanılan tüm toz tipi ve oranlarında en büyük basınç dayanımı değerleri kırmataşlı serilerde elde edilmiştir. Kırmataşlı serileri, dere agregalı seriler ve pomza agregalı seriler takip etmiştir.



Şekil 5.14. Silis dumanı içeren tüm serilerin basınç dayanımları



Şekil 5.15. Uçucu kül içeren tüm serilerin basınç dayanımları

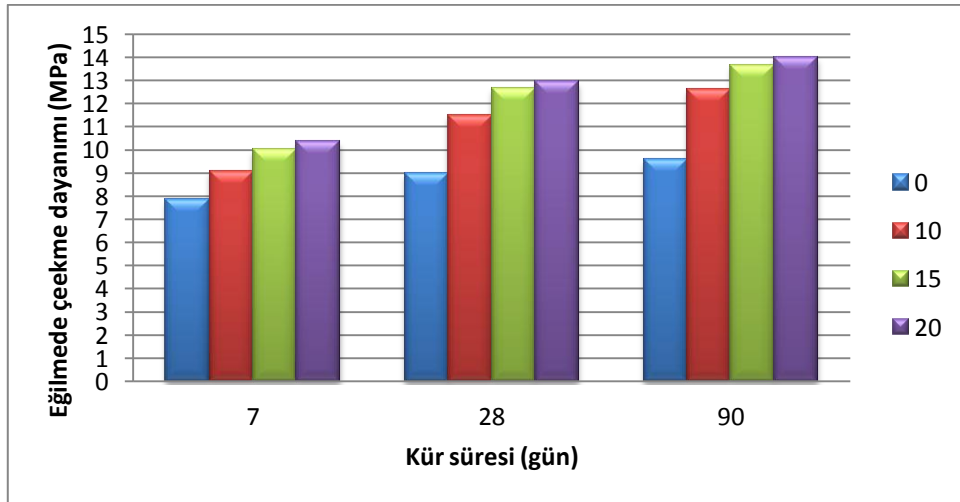
Kırmetaşlı serilerin basınç dayanımları, dere agregalı serilerin basınç dayanımlarından daha büyüktür. Fakat aralarındaki basınç dayanımı farkı azdır. Bunun sebebi kullanılan kırmetaşın, büyük kayalardan elde edilen kırmetaş olmayıp, kullanılan dere agregasının elek üstünde kalan iri tanelerinin kırılmasıyla elde edilen bir kırmetaş çeşidi olmasıdır.

Tüm serilerde ortak olan faktör harç olduğuna göre, dayanım gelişimini etkileyen en önemli etken agregaların dayanımıdır. Serilerde kullanılan agregalar içerisinde en kırılgan veya düşük dayanımlı olanı pomzadır. Dolayısıyla KYB serileri içerisinde en düşük dayanımlar da pomza ile üretilen serilerde elde edilmiştir.

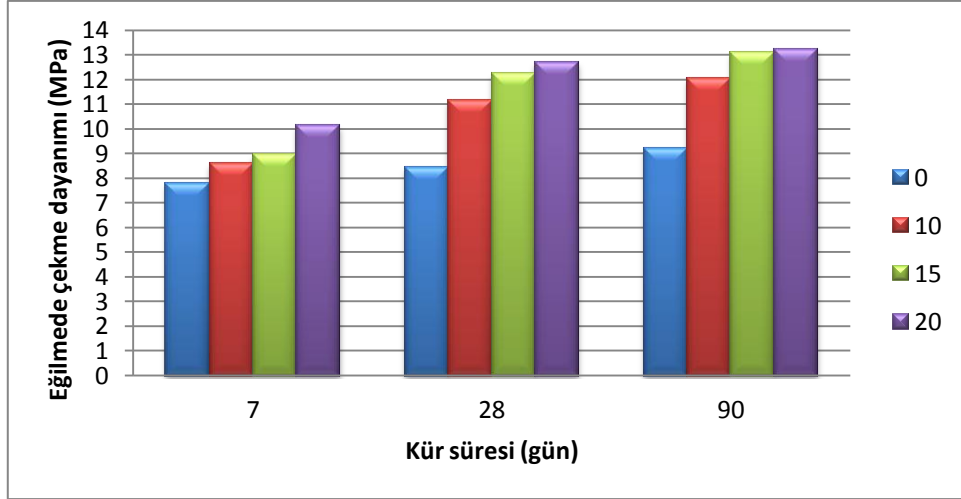
Bu çalışmada betonların basınç dayanımlarının, KYB üretiminde kullanılan iri agregaların dayanımlarıyla doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Ayrıca normal agregalı betonlarda agreganın dayanımı harçın dayanımından daha yüksek olduğundan, beton üzerine gelen yükü harçlar iletip, agregalar taşımaktadır. Ancak hafif agregalı betonlarda agregaların dayanımlarının harç dayanımından daha düşük olmasından dolayı bu durum tam tersinedir. Yani beton üzerine gelen yükü ileten agregalar, taşıyan ise harçtır. Dolayısıyla hafif agregalarla üretilen betonların dayanımları normal agregayla üretilen betonlardan daha düşük olmaktadır [58].

5.3.2. Eğilmede ve Yarmada Çekme Dayanımları

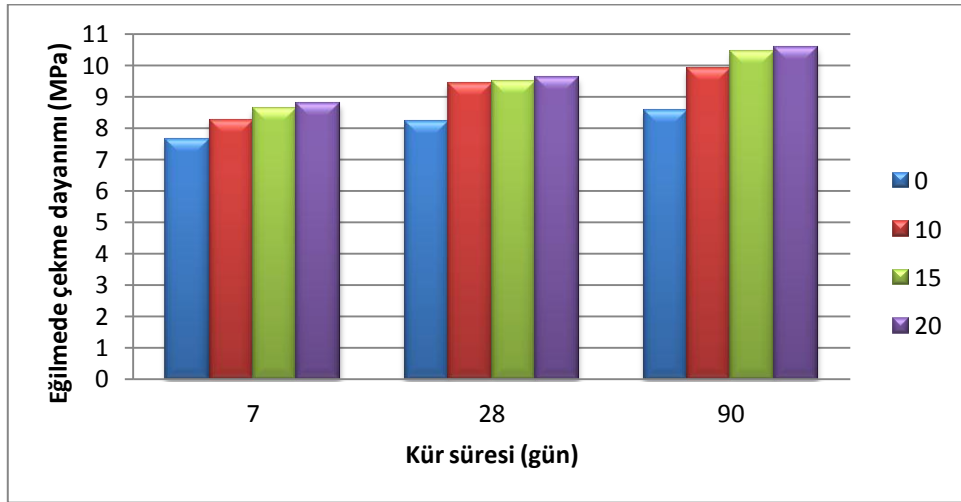
KYB' lerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan diğer yöntemler ise eğilmede çekme ve dolaylı çekme dayanımı olarak bilinen yarmada çekme dayanımı deneyleridir. Eğilmede çekme dayanımı deneylerinde 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için toplamda 216 adet 7,5x7,5x30 cm boyutlarında pirizma numune, yarmada çekme dayanımı deneyleri için 10x10x10 cm boyutlarında küp numune kullanılmıştır. Eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı deney sonuçları, basınç dayanımı deney sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği için bu kısımda beraber incelenmişlerdir. Tüm sonuçlar Şekil 5.16 – 5.33' de verilmiştir.



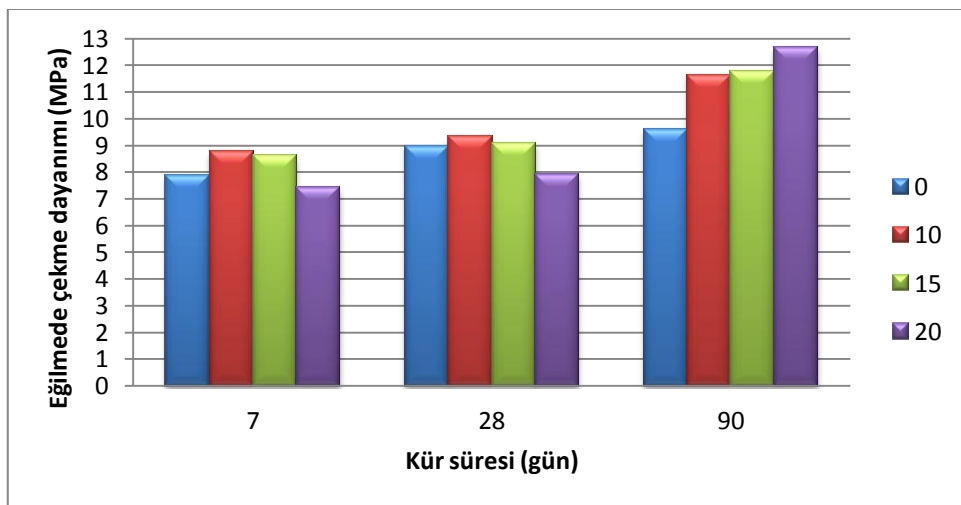
Şekil 5.16. Kırmataş agregası ve silis dumanı içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları



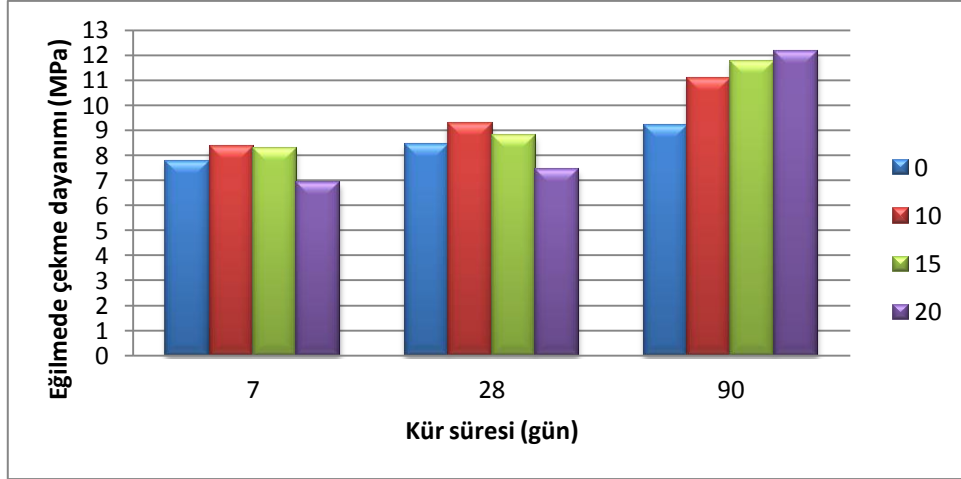
Şekil 5.17. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları



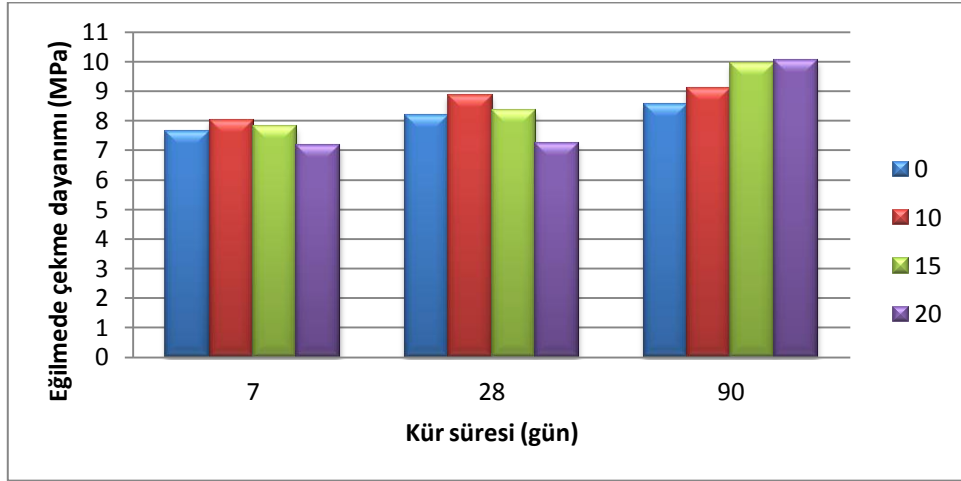
Şekil 5.18. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları



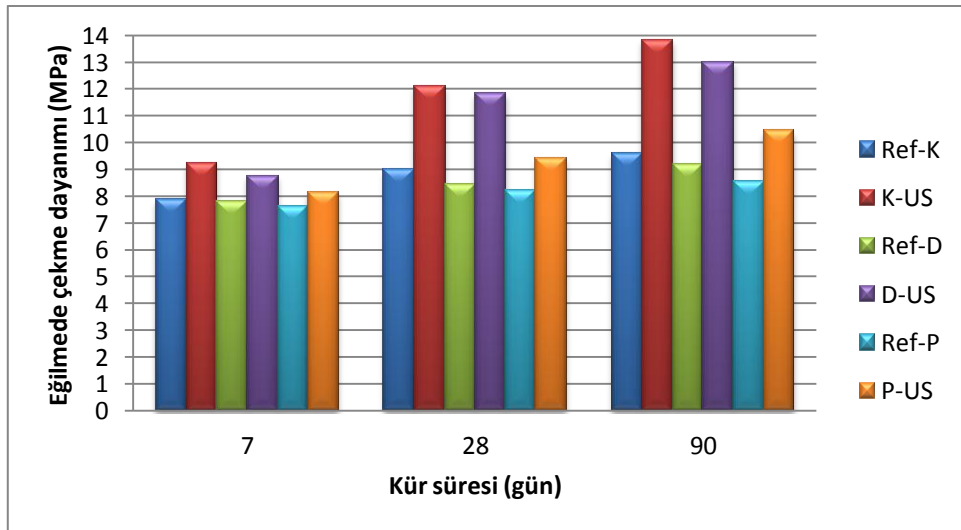
Şekil 5.19. Kırıntı agregası ve uçucu kül içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları



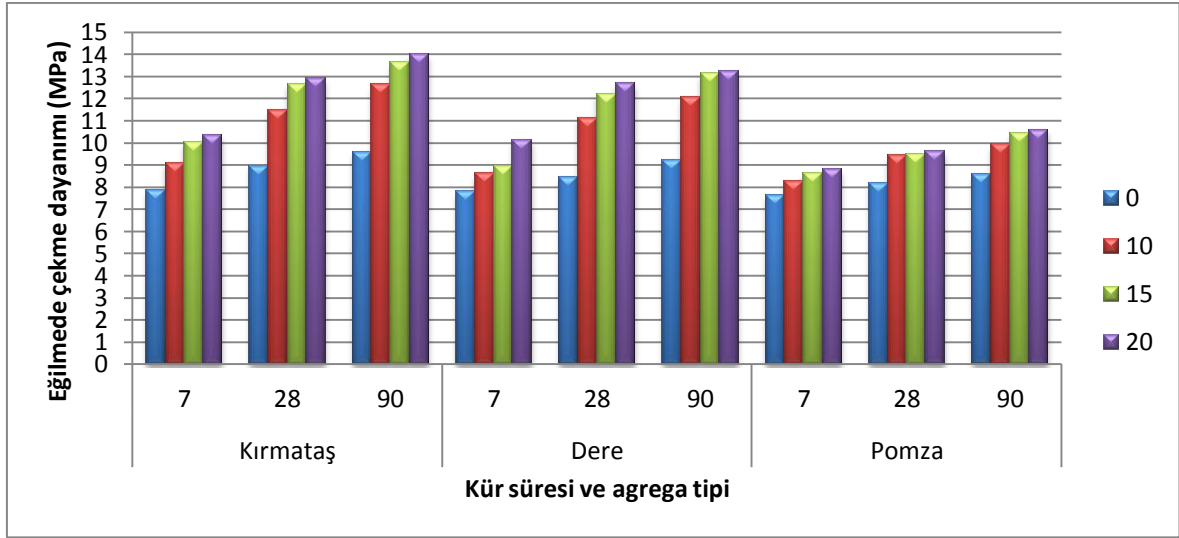
Şekil 5.20. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları



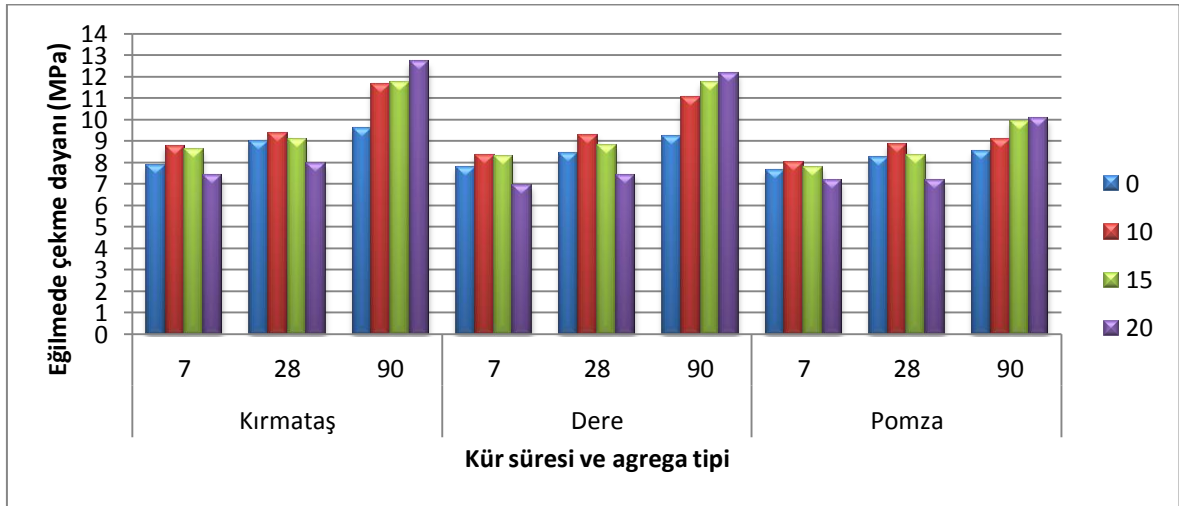
Şekil 5.21. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin eğilmede çekme dayanımları



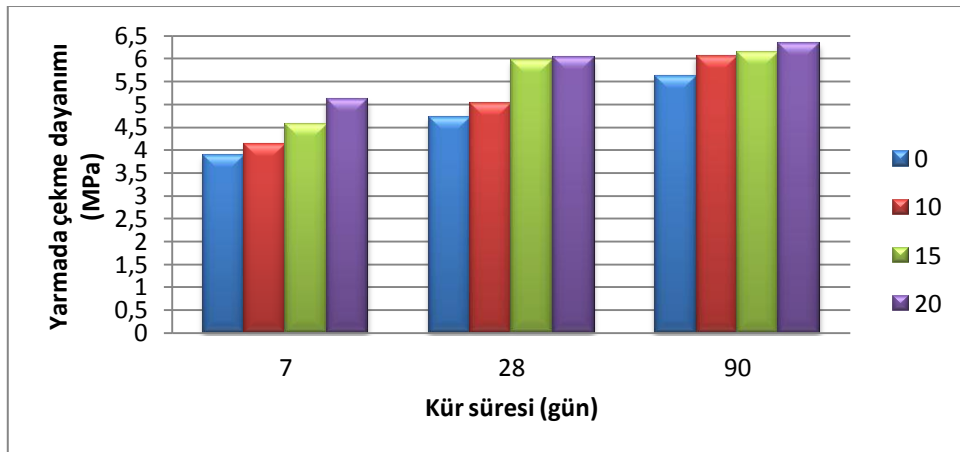
Şekil 5.22. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10+%10) tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları



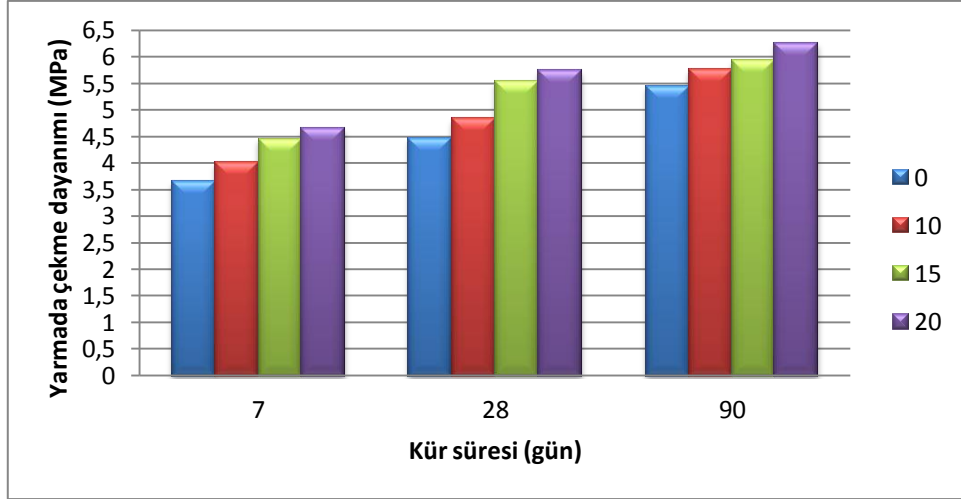
Şekil 5.23. Silis dumanı içeren tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları



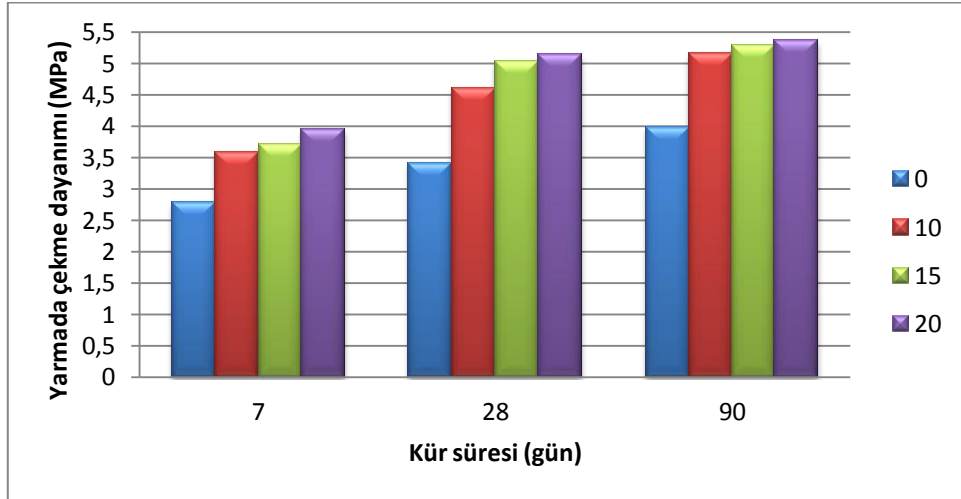
Şekil 5.24. Uçucu kül içeren tüm serilerin eğilmede çekme dayanımları



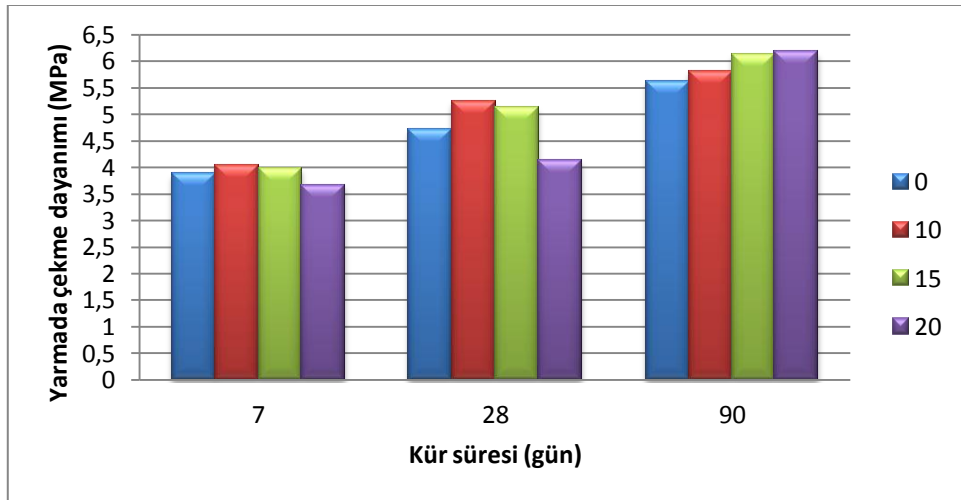
Şekil 5.25. Kırmataş agregası ve silis dumanı içeren serilerin yarmada çekme dayanımları



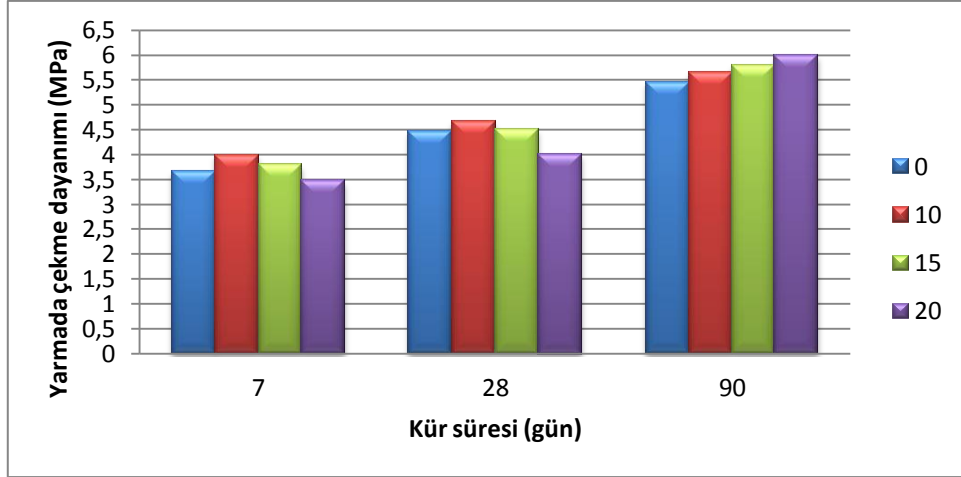
Şekil 5.26. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin yarmada çekme dayanımları



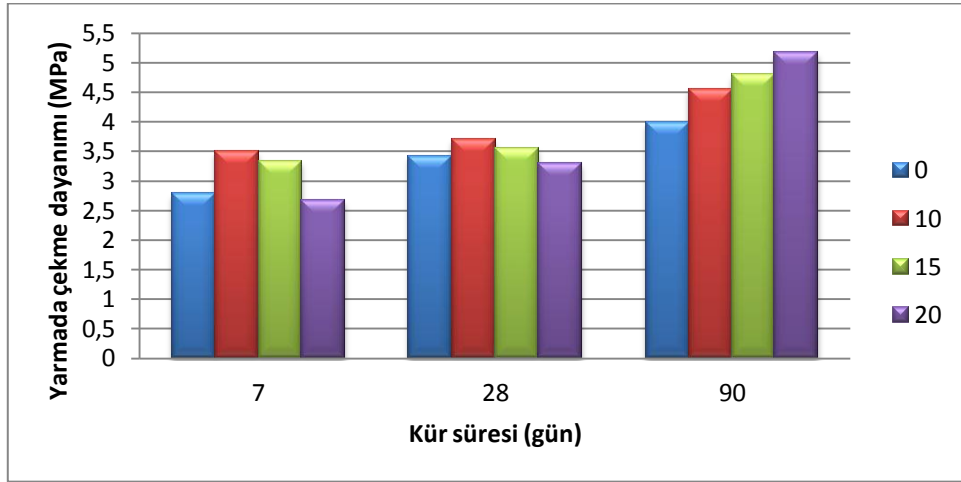
Şekil 5.27. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin yarmada çekme dayanımları



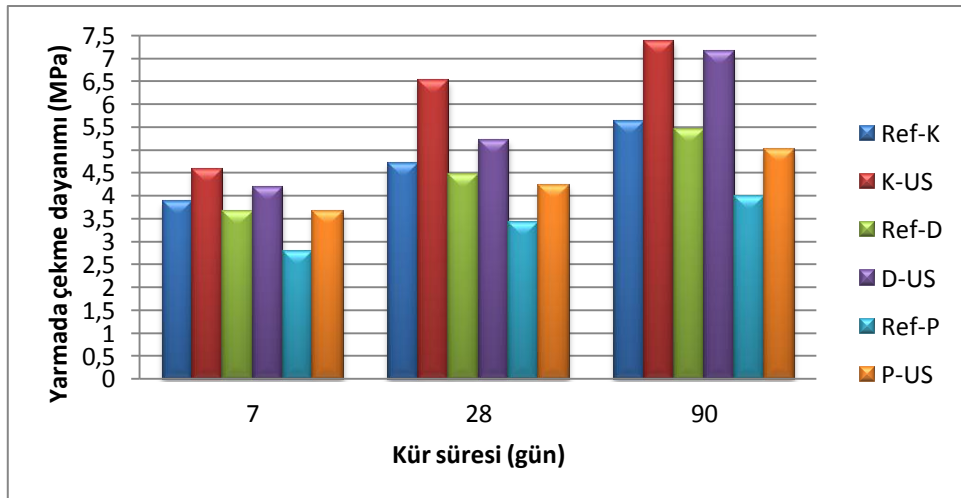
Şekil 5.28. Kırmataş agregası ve uçucu kül içeren serilerin yarmada çekme dayanımları



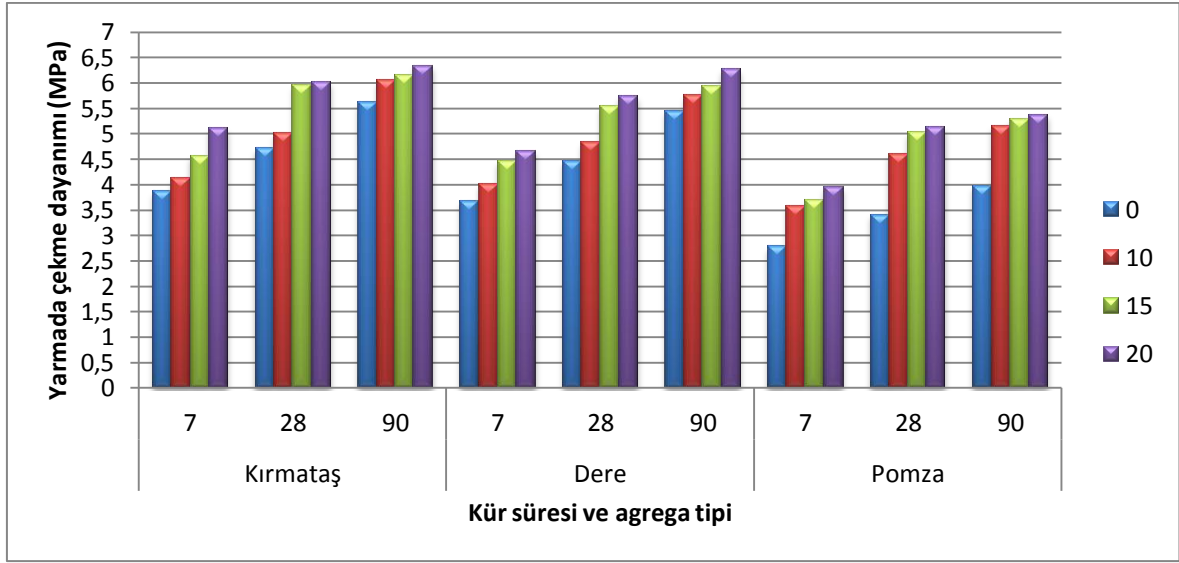
Şekil 5.29. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin yarmada çekme dayanımları



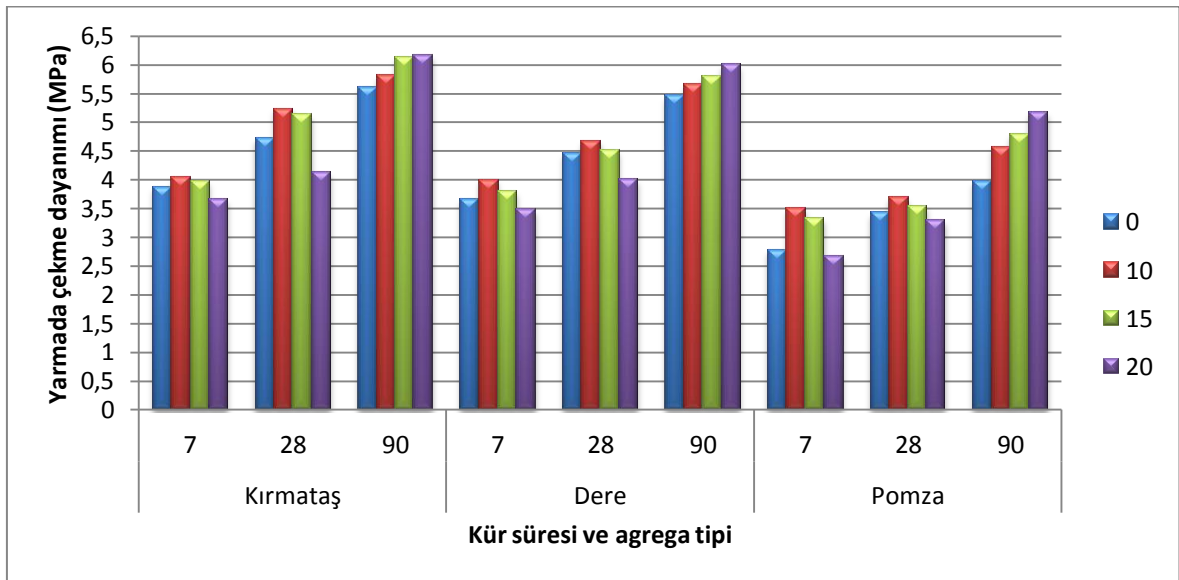
Şekil 5. 30. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin yarmada çekme dayanımları



Şekil 5.31. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10+%10) tüm serilerin yarmada çekme dayanımları



Şekil 5.32. Silis dumanı içeren tüm serilerin yarmada çekme dayanımları



Şekil 5.33. Uçucu kül içeren tüm serilerin yarmada çekme dayanımları

Sonuçlar toz tipi dikkate alınarak incelenirse; Şekil 5.16 – 5.18 ve Şekil 5.25 – 5.27’ de görüldüğü gibi, toz malzeme olarak kullanılan silis dumanı oranının artmasıyla her yaşta, silis dumanı katkılı betonların değerleri, mineral katkısız referans betonlarının değerlerini geçmiş, en büyük eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

Uçucu kül katkılı serilerin sonuçları incelendiğinde ise (Şekil 5.19 – 5.21 ve Şekil 5.28 – 5.30); 7 ve 28 günlük kür süreleri için, %10 uçucu kül katkılı tüm serilerin eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımları, referans betonlarının değerlerini geçerek en yüksek

dayanıma ulaşmıştır. %15 uçucu kül katkılı serilerin dayanımları ise referans betonlarının dayanımlarını geçmiş fakat %10 uçucu kül katkılı serilerin değerlerine az farklarla da olsa ulaşamamışlardır. %20 uçucu küllü seriler en düşük çekme dayanımı değerlerine sahiptirler ve referans betonlarının değerlerine de ulaşamamışlardır. Uçucu kül katkılı serilerin 90 günlük kür süresi sonundaki çekme dayanımları incelendiğinde ise %20 uçucu küllü serilerin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Bu serileri sırasıyla %15 ve %10 uçucu küllü seriler izlemiştir.

Uçucu kül ve silis dumanının beraber kullanıldığı seriler (K-US, D-US, P-US)' de eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı değerleri, Şekil 5.22 ve Şekil 5.31'de görüldüğü gibi tüm yaşlarda referans betonlarının değerlerini geçmiştir.

Çekme dayanımları agrega tipi göz önüne alınarak incelendiğinde, Şekil 5.22 - 5.24 ve Şekil 5.31 - 5.33' de de görüldüğü gibi, tüm kür sürelerinde, kullanılan tüm toz tipi ve oranlarında en büyük eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı değerleri kırmataşlı serilerde elde edilmiştir. Kırmataşlı serileri, dere agregalı seriler ve pomza agregalı seriler takip etmiştir.

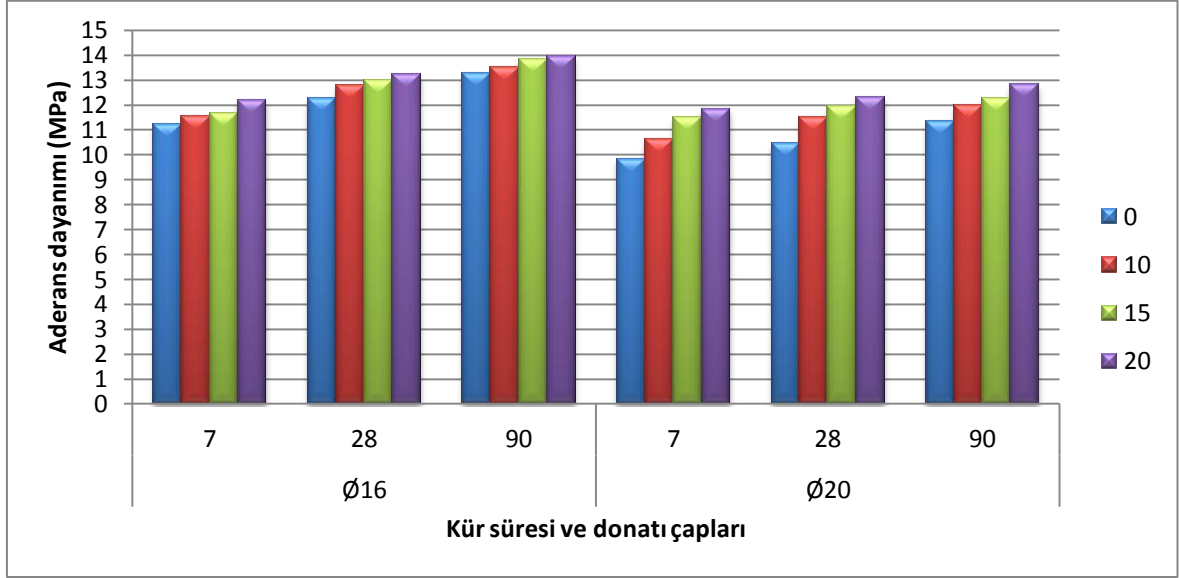
Betonda çekme gerilemelerini karşılamada en zayıf kalan bölgeler agrega-çimento hamuru ara yüzeyleridir. Kırmataş gibi agregaların kullanılmasıyla, ara yüzeyin çekme gerilemelerini karşılamasını arttırdığı görülmüştür. Hafif agregaların dayanımları kırmataş gibi normal agregalara göre çok daha düşük olup, betona yük uygulandığında kırılmalar öncelikle agregalarda görülmektedir. Dolayısıyla hafif agregayla üretilen betonlarda da, çekme gerilmeleri altında kırılmalar hem zayıf olan agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde hem de agregada oluşmaktadır. Hafif agregaların kırılkan yapıları nedeniyle de, hafif agregalarla üretilen kendiliğinden yerleşen betonların çekme dayanımları da kırmataşla üretilen serilerinkine göre oldukça düşüktür [58].

5.3.3. Aderans Dayanımları

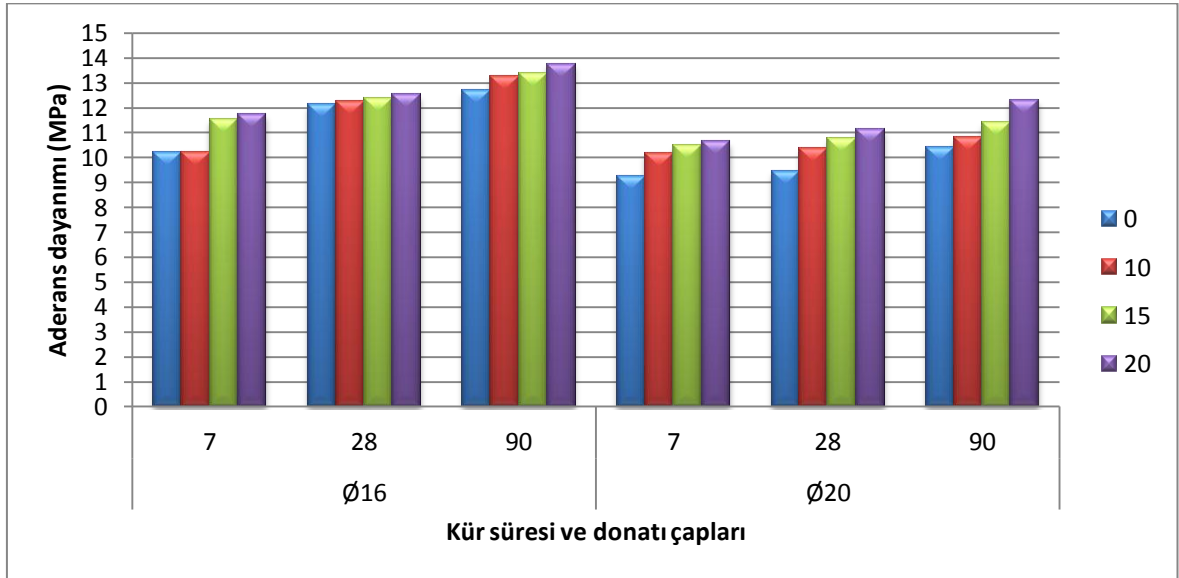
Aderans dayanımı deneyleri 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri için toplamda 432 adet 15x15x15 cm boyutlarında donatılı küp numune üzerinde uygulanmıştır. Deneylerde, donatı çapının aderans' a etkisinin araştırılması amacıyla, Ø16 ve Ø20 olmak üzere 2 farklı donatı seçilmiştir.

Deney sonuçları toz tipi dikkate alınarak incelenirse; toz malzeme olarak kullanılan silis dumanı oranının artmasıyla her yaşta, silis dumanı katkılı betonların değerleri, mineral

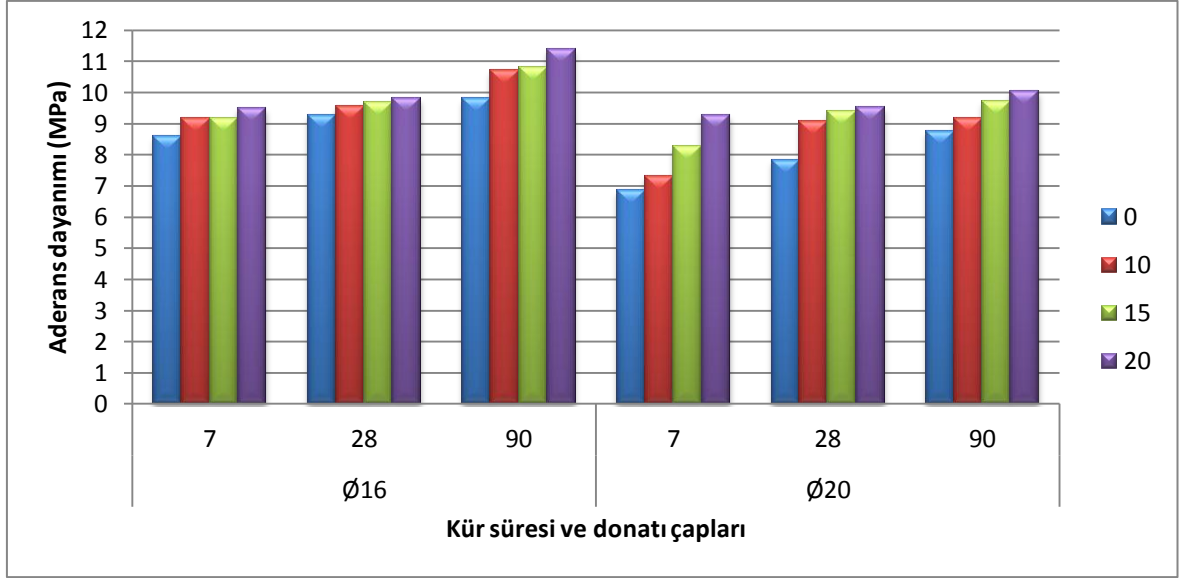
katkısız referans betonlarının değerlerini geçmiş, en büyük aderans dayanımı değerleri elde edilmiştir. Tüm kür süreleri ve agrega tipleri için en büyük aderans dayanımları %20 silis dumanı katkılı serilerde elde edilmiştir. Bu serileri %15 ve %10 silis dumanı katkılı seriler izlemiştir (Şekil 5.34 – 5.36).



Şekil 5.34. Kırmetaş agregası ve silis dumanı içeren serilerin aderans dayanımları



Şekil 5.35. Dere agregası ve silis dumanı içeren serilerin aderans dayanımları

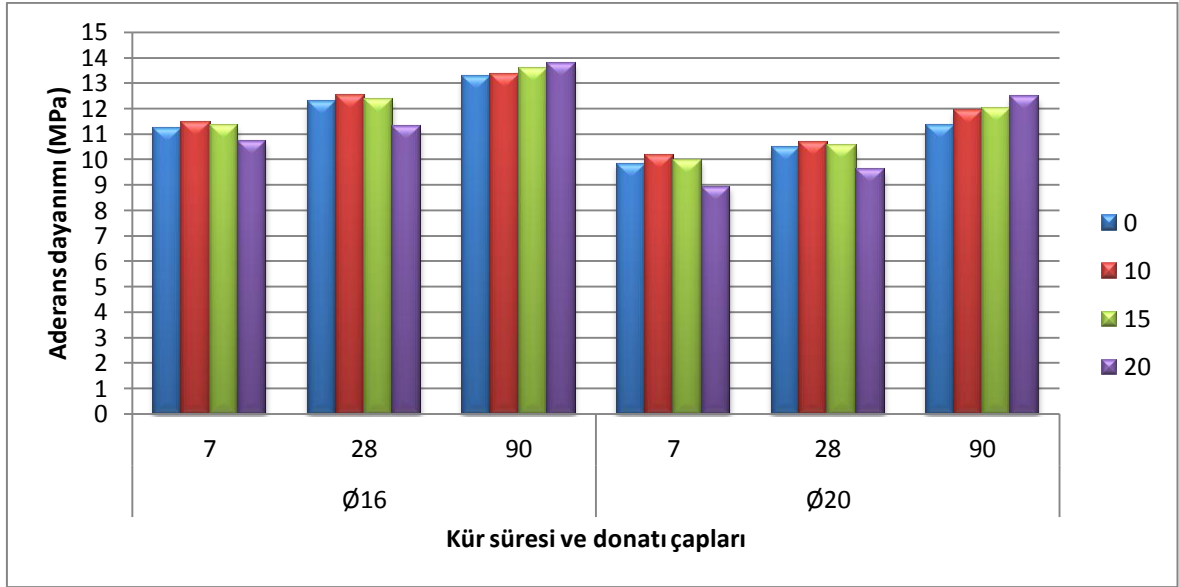


Şekil 5.36. Pomza agregası ve silis dumanı içeren serilerin aderans dayanımları

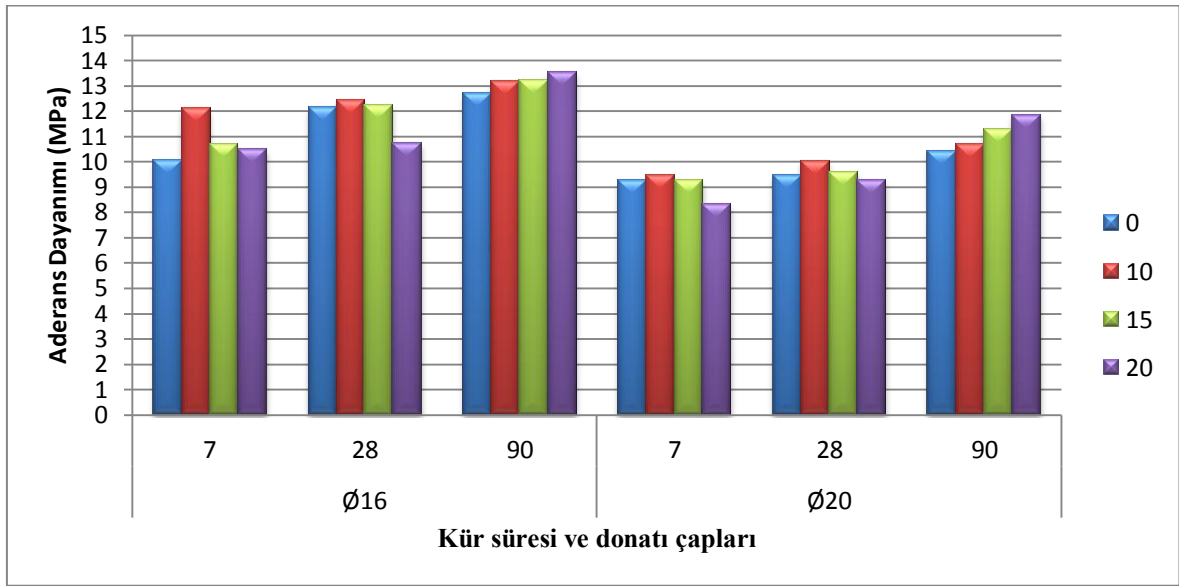
Uçucu kül katkılı serilerin sonuçları incelendiğinde ise (Şekil 5.37 – 5.39); 7 ve 28 günlük kür süreleri için, %10 uçucu kül katkılı tüm serilerin aderans dayanımları, referans betonlarının değerlerini geçerek en yüksek dayanıma ulaşmıştır. %15 uçucu kül katkılı serilerin dayanımları ise referans betonlarının dayanımlarını geçmiş fakat %10 uçucu kül katkılı serilerin değerlerine az farklarla da olsa ulaşamamışlardır. %20 uçucu küllü seriler en düşük aderans dayanımı değerlerine sahiptirler ve referans betonlarının değerlerine de ulaşamamışlardır. Uçucu kül katkılı serilerin 90 günlük kür süresi sonundaki aderans dayanımları incelendiğinde ise %20 uçucu küllü serilerin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Bu serileri sırasıyla %15 ve %10 uçucu küllü seriler izlemiştir.

Uçucu kül ve silis dumanının beraber kullanıldığı seriler (K-US, D-US, P-US)' de aderans dayanımı değerleri, Şekil 5.40' da görüldüğü gibi tüm yaşlarda referans betonlarının değerlerini geçmiştir.

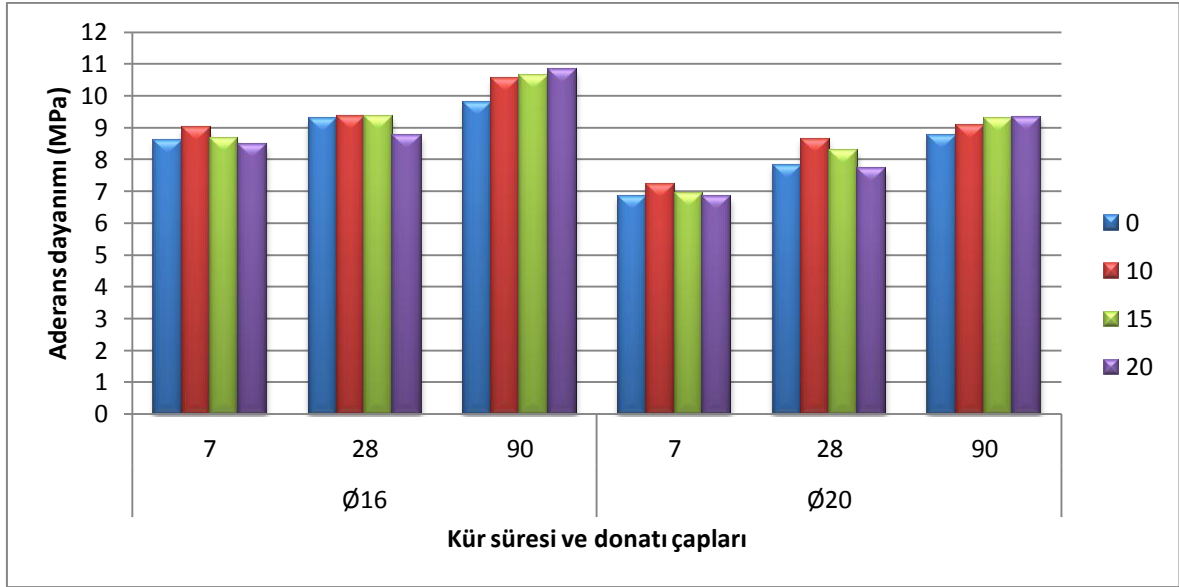
Aderans dayanımları agregası tipi göz önüne alınarak incelendiğinde, tüm kür sürelerinde, kullanılan tüm toz tipi ve oranlarında en büyük dayanım değerleri kırmataşlı serilerde elde edilmiştir. Nedeni de, agregaların dayanımlarının yüksek olması ve köşeli yapıları sayesinde aderanslarının yüksek olmasıdır. Kırmataşlı serileri, dere agregalı seriler ve pomza agregalı seriler takip etmiştir.



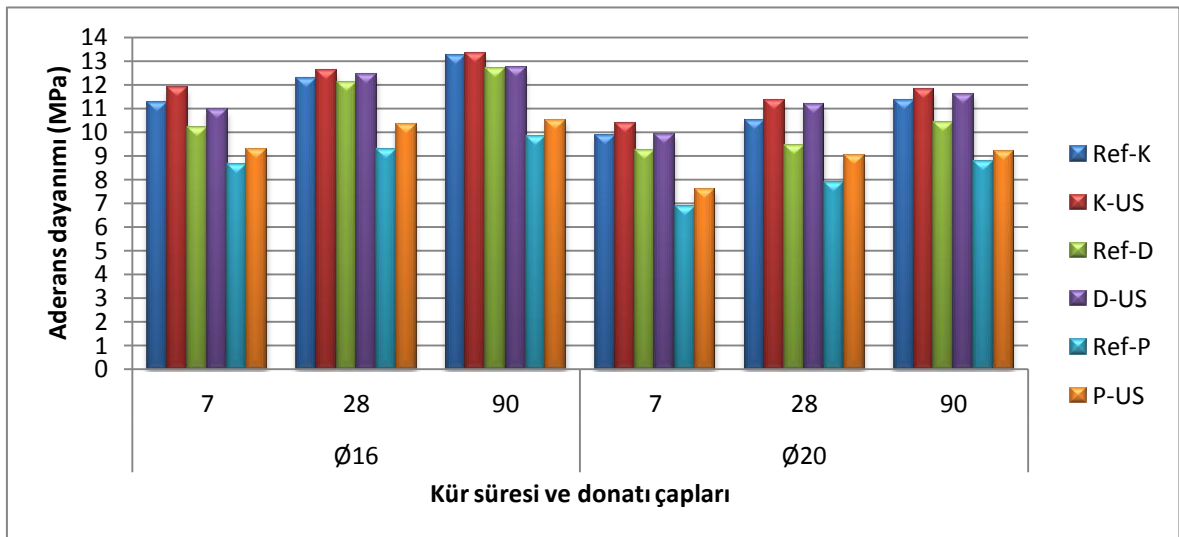
Şekil 5.37. Kırmtaş agregası ve uçucu kül içeren serilerin aderans dayanımları



Şekil 5.38. Dere agregası ve uçucu kül içeren serilerin aderans dayanımları



Şekil 5.39. Pomza agregası ve uçucu kül içeren serilerin aderans dayanımları



Şekil 5.40. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren (%10 + %10)tüm serilerin aderans dayanımları

Deneyle yapılrken beton içine gömülmüş olan donatının akmadan sistemin göçtüğü gözlenmiştir. 7 gün kür edilen numunelerin aderans deneyinde, donatılar sıyrılarak betondan ayrılmışlardır. Fakat 28 ve 90 gün kür edilen numunelerde donatıların betonu yardığı gözlemlenmiştir.

Deneylede Ø16 ve Ø20 olmak üzere iki farklı donatı çapı kullanılmıştır. Tüm şekillerde görüldüğü gibi, kullanılan donatı çapının boyutu arttıkça aderans dayanımı azalmıştır. Çünkü donatı çapının artmasıyla, donatıyı çevreleyen beton örtüsünün kalınlığı ve buna bağılı olarak kenetlenme azalmıştır [103].

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; dere, kırmataş ve pomza olmak üzere 3 farklı agrega ve 2 farklı toz malzeme kullanılarak toplam 24 seri beton üretilmiştir. Toz malzemeler silis dumanı ve C sınıfı uçucu küldür. Toz malzemeler tek başlarına %10, %15, %20, karışık olarak ise %10+%10 (%20) oranlarında kullanılmışlardır. Referans betonu olarak toz mineral katkısız beton üretilmiştir. Sertleşmiş beton deneyleri için 216 adet 7,5x7,5x30 cm kiriş, 216 adet 10x10x10 cm küp, 216 15x15x15 cm küp ve 432 adet 15x15x15 cm donatılı küp numune (Ø16 ve Ø20) hazırlanarak toplamda 1080 numune üzerinde deney yapılmıştır.

- Toz malzeme olarak kullanılan uçucu külün miktarının artmasıyla yayılma çapı artmış, silis dumanı miktarının artması ile çap azalmıştır. Aynı su/toz oranına sahip farklı agregalarla üretilen KYB' lerin yayılma çapları arasında değişiklikler vardır. Pomza agregalı taze betonlar kırmataşla ve dere agregasıyla üretilenlere göre daha fazla yayılma değerine sahiptirler. Uçucu kül katkılı pomzalı KYB' lerde yayılma çapı, uçucu kül miktarındaki artışla orantılı olarak artmasına rağmen, viskozitesinin çok artmasından dolayı, dere ve kırmataşlı serilerin yayılma değerlerine ulaşamamıştır. Dere agregası ve kırmataşlı seriler kendi aralarında karşılaştırıldığında, seriler arasında en az yayılma değeri yine kırmataşla üretilen serilerde elde edilmiştir.
- Tüm seriler arasında en fazla T_{50} değeri kırmataşlı serilerde görülürken, en azı ise pomzalı serilerde görülmüştür. V hunisinden akış sürelerinde en yüksek değerler uçucu kül katkılı pomzalı serilerde görülmektedir. Dere agregasıyla üretilen serilerin akış süreleri ise kırmataşlı serilerin değerlerinden çok az farkla daha düşüktür.
- Toz malzeme olarak kullanılan uçucu külün miktarının artmasıyla L kutusu h_2/h_1 oranı artmış, silis dumanı miktarının artması ile bu değerler azalmıştır.
- Toz malzeme olarak kullanılan uçucu kül ve silis dumanı miktarının artması, elek ayrışma miktarını azaltmıştır. Referans betonları ayrışmada sınır olan değerleri aşarak KYB koşullarını sağlamamışlardır.

- Bu çalışmadaki pomzalı beton serileri “Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton” olarak isimlendirilebilir.
- Beton üretimini takiben 7. günde dahi 28 günlük dayanım değerinin büyük kısmına ulaşılmıştır.
- Tüm dayanımlar için sonuçlar toz tipi dikkate alınarak incelenirse; toz malzeme olarak kullanılan silis dumanı oranının artmasıyla her yaşta, silis dumanı katkılı betonların değerleri, mineral katkısız referans betonlarının değerlerini geçmiş, en büyük dayanım değerleri elde edilmiştir.
- Uçucu kül katkılı serilerin sonuçları incelendiğinde ise 7 ve 28 günlük kür süreleri için, %10 uçucu kül katkılı tüm dayanımları, referans betonlarının değerlerini geçerek en yüksek dayanıma ulaşmıştır. %15 uçucu kül katkılı serilerin dayanımları ise referans betonlarının dayanımlarını geçmiştir fakat %10 uçucu kül katkılı serilerin değerlerine az farklarla da olsa ulaşamamışlardır. %20 uçucu küllü seriler en düşük dayanım değerlerine sahiptirler ve referans betonlarının değerlerine de ulaşamamışlardır. Uçucu kül katkılı serilerin 90 günlük kür süresi sonundaki dayanımları incelendiğinde ise %20 uçucu küllü serilerin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Bu serileri sırasıyla %15 ve %10 uçucu küllü seriler izlemiştir.
- Uçucu kül ve silis dumanının beraber kullanıldığı seriler (K-US, D-US, P-US)’ de dayanım değerleri tüm yaşlarda referans betonlarının değerlerini geçmiştir.
- Betonların basınç dayanımlarının, KYB üretiminde kullanılan iri agregaların dayanımlarıyla doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Tüm kür sürelerinde kullanılan tüm toz tipi ve oranlarında en büyük dayanım değerleri kırmataşlı serilerde elde edilmiştir. Kırmataşlı serileri, dere agregalı seriler ve pomza agregalı seriler takip etmiştir. Normal agregalı KYB’ de agreganın dayanımı hafif agregalara göre yüksek olduğundan betonun da dayanımı yüksek değerlere ulaşmıştır. Ancak pomzalı KYB’ lerde agregaların dayanımları normal agregalara göre daha düşük ve daha kırılgandır. Dolayısıyla hafif agregalarla üretilen betonların dayanımları normal agregayla üretilen betonlardan daha düşük olmaktadır.
- Aderans deneylerinde kullanılan donatılarda akma olmamıştır. Erken yaşlarda donatılar sıyrılarak betondan ayrılmışlardır. Fakat 28 ve 90 gün kür edilen numunelerde donatıların betonu yardığı gözlemlenmiştir.
- Deneylerde kullanılan donatı çapının boyutu arttıkça aderans dayanımı azalmıştır.

- KYB’ de taze beton özellikleri açısından karışım oranları hassastır. Karışıma giren malzemelerin optimim oranları bulunulmaya çalışılmalıdır. Deneme karışımları olabildiğince fazla miktarda yapılmalıdır. Az miktardaki karışımların taze beton deneyleri yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.
- Deneme karışımlarının belirlendiği şartlarla (mevsim, laboratuvar şartları vb.), asıl deney numunelerinin dökümünün yapıldığı şartların aynı olmasına özen gösterilmelidir.
- KYB’ de kimyasal katkı vazgeçilmez bir unsurdur. Kullanım kılavuzlarında aynı özelliklere sahip akışkanlaştırıcılar, farklı özellikler gösterebilmektedir. En uygun akışkanlaştırıcı seçimi için birçok deneme yapılmalıdır.
- Bu çalışmada da görüldüğü gibi bazik pomza kullanımıyla kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmek mümkündür. Bu beton, hafiflik ve kendiliğinden yerleşebilme özelliğinden dolayı, deprem bölgelerindeki yapılar ve ayrıca prefabrikasyon için tercih edilebilir.
- Kullanılan mineral katkılar atık malzeme durumundadır. Bu malzemelerin değerlendirilmesi hem daha dayanıklı betonlar elde edilmesini sağlayacak hem de doğaya ekolojik açıdan büyük katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]. Gambarova, G. P. and Giuriani, E., 1985. Discussion of “Fracture mechanics of bond reinforced concrete” by Ingreffea, A. R., Gerstle, W. H., Gergeley, P. and Saouma V., ASCE Journal of Structural Engineering, 1161-1163.
- [2]. Arda, T. S., 1968. Betonarmede aderans konusunda bir derleme. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 1s.
- [3]. Ersoy, U., 1985. Betonarme. Evrim Yayınevi.
- [4]. Tepfers, R., 1979. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. Magazine of Concrete Research, 1979, No.106, p 3–12.
- [5]. Yeih, W., Chang J.J. and Tsai C.L., 2004. Enhancement of the bond strength of epoxy coated steel by the addition of fly ash, Cement and Concrete Composites, No. 26, 315–321.
- [6]. Masao, K., Tomohide W. and Nariaki T., 2000. Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash, Cement and Concrete Research, No. 30, 253–258.
- [7]. Fabbrocino, G., Verderame, G. M. and Manfredi, G., 2005. Experimental behavior of anchored smooth rebars in old type reinforced concrete buildings, Engineering Structures, No. 27, 1575–1585.
- [8]. Fang C., Karin L., Chen L. and Zhu C., 2004. Corrosion influence on bond in reinforcement concrete, Cement and Concrete Research, No. 34, 2159–2167.
- [9]. Esfahani, M. R. and Rangan, B. V., 1998. Local bond strength of reinforcing bars in normal strength and high-strength concrete, ACI Journal 98, p. 96-106.
- [10]. Dehn, F., Holschemacher, K., Lange, M. and Saidowsky L., Bond behavior of lightweight aggregate concrete (lwac) under cyclic loading, http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer05/105_13.pdf
- [11]. Fu, X. and Chung D.D.L., 1998. Combined use of silica fume and methylcellulose as admixtures in concrete for increasing the bond strength between concrete and steel rebar, Cement and Concrete Research, No. 4, 487–492.
- [12]. Baradan, S., 1997. Çimento tipinin donatı-beton aderansına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- [13]. Çınar, B., 2000. Karapınar volkanik agregasından imal edilen hafif betonların aderans davranışı üzerinde deneysel bir inceleme Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
- [14]. Ünal, Y., 1998. Aderansın betonun agrega tane çapı ve dayanımına bağlı olarak değişimi üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
- [15]. Katz A. and Berman N., 2000. Modeling the effect of high temperature on the bond of frp reinforcing bars to concrete, Cement & Concrete Composites, No. 22, 433–443.

- [16]. Turk, K. and Yildirim, M. S., 2003. Bond strength of reinforcement in splices in beams, *Structural Engineering and Mechanics*, 16(4), p. 469-478.
- [17]. Turk, K., Caliskan, S. and Yildirim, M. S., 2005. Influence of loading condition and reinforcement size on the concrete / reinforcement bond strength, *Structural Engineering and Mechanics*, 19(3), p. 337-346.
- [18]. Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M. and Okamura, H., 1989. Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, The second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2), Proceedings book, Chiang Mai, Thailand, p. 445-456.
- [19]. Okamura, H. and Ouchi, M., 2003. Self-Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, No. 1, 5-15.
- [20]. Leemann, A., Munch B., Gasser P., Holzer L., 2006. "Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete" *Cement and Concrete Research* 36, 1425-1433.
- [21]. Shindoh, T., Yokota, K. and Yokoi, K., 1996. Effect of mix constituents on rheological properties of super workable concrete, In: Bartos P.J.M., Marrs D.L., Cleland D.J. (Eds.), *Proceedings of the International RILEM Conference Production Methods and Workability of Concrete*, Paisley, Scotland, June 3–5, 1996, E & FN Spon, London, p. 263–270.
- [22]. EFNARC, May 2005. European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use, Association House, UK, (www.efnarc.org).
- [23]. [23] Yıldız, S., Balaydın, İ. ve Ulucan, Z. Ç., 2007. Pirinç kabuğu külünün beton dayanımına etkisinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 85-91.
- [24]. Su, N., Hsu, K-C., Chai, H-W., 2001. A Simple Mix Design Method for Self Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 1799–1807.
- [25]. Wenzhong, Z., Peter J.M. Bartos, 2003. "Permeation properties of selfcompacting concrete", www.sciencedirect.com, *Cement and Concrete Research* pp 33, 921-926
- [26]. ŞAHMARAN, M., Yaman, İ.Ö., Tokyay M., 2004. "Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton", *Beton 2004 Kongre Bildiri*, İstanbul.
- [27]. FELEKOĞLU, B., Baradan, B., 2004. "Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri", *Beton 2004 Kongre Bildiri*, İstanbul.
- [28]. Karataş, M., 2007. Mineral katkı Dozajının ve Türünün Kendiliğinden Sıkışan Betondaki Donatı Aderansına Etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [29]. Sonebi, M. ve diğ., 2000. Properties of Hardened Concrete, *Brite EuRam*, No. BRPRCT96–0366.

- [30]. Topçu, İ.B., 2006. Beton Teknolojisi, Uğur Ofset, Eskişehir.
- [31]. Gündüz, L. ve diğ., 2006. Genleşmiş kilin hafif agrega olarak kullanılabilirliği, Kıl Bilimi ve Teknolojisi Dergisi, 1(2) 43 – 49.
- [32]. Şimşek, O., 2004. Beton Çeşitleri, Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 23-26.
- [33]. Rilem, 1978. Functional Classification of Lightweight Concretes, Recommendation LC 1, Second Ed.
- [34]. Sezgin, M., 1999. Diatomitin Hafif Yapı Eldesinde Değerlendirilebilirliği, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. A.B.D., Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- [35]. İhtiyaroğlu, E., 1984. Tabii Hafif Agregalarla İmal Edilen Hafif Beton Blokların Duvar Elemanı Olarak Özelliklerinin Tayini Üzerinde Araştırmalar, İmar ve İskan Bakanlığı yayınları, No: 5-76, s.61, Ankara.
- [36]. Demirboğa, R. Örüng, İ. ve Gül, R., 2001. Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes, Cement and Concrete Research, 31, 1627–1632.
- [37]. Sancak, E., 1999. Hafif Agregalı Beton Blokların Mekanik Özellikleri Üzerine Çelik Lif Kullanımının Etkisi, S.D.Ü., Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- [38]. Bozkurt, N., 2009. Fiber Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [39]. Dehn, F., Holschemacher, K., Weibe, D., 2000. Self-Compacting Concrete (SCC) Time Development of the Material Properties and the Bond Behaviour, LACER No. 5, 115–124.
- [40]. Bouzoubaa, N., Lachemi, M., 2001, Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results, Cement and Concrete Research, 31, 413-420.
- [41]. Poon, C.S., Ho, D.W.S., 2004. A Feasibility Study on the Utilization of r-FA in SCC, Cement and Concrete Research, 34, 2337–2339.
- [42]. Corinaldesi, V., Moriconi, G., 2004. Durable Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 34, 249–254.
- [43]. www.rilem.org, The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, from the name in French).
- [44]. Gönen, T., 2009. Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [45]. Rols S., Ambrosie J., and Pera J., 1999. Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, Cem. Concr. Res., Vol: 29, pp. 261–266.
- [46]. Ambrosie J. and Pera J., 2002. Design of Self-Levelling Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 93–98.

- [47]. Khayat K.H. Bickley J. and Lessard M., 2000. Performance of Self-Consolidating Concrete for Casting Basement and Foundation Walls, *ACI Materials Journal*, May- June, pp. 374–380.
- [48]. Özgüler, A. T., 2007. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekaniksel Özelliklerine Agrega Tipinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [49]. Felekoğlu, B., Türkel, S. ve Baradan, B., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Beton, İMO İzmir Şubesi, 117, 20-24.
- [50]. Billberg, P., 2005. Mechanisms behind reduced form pressure when casting with SCC, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 589-598.
- [51]. Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R. & Torresan, I., 2002. Zero Energy System: An Innovative Approach for Rationalized Precast Concrete Production. *BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry*, İstanbul (Turkey), 8p.
- [52]. Wu, S., 2005. Application of Self-compacting Concrete in Frame-shear wall structure and road construction, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 705-712.
- [53]. 22. Lu, L., 2005 Construction Technology of Self-compacting Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 617-625.
- [54]. Yalçinkaya, Ç., 2009. Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonun Mekanik, Durabilite ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [55]. Şahmaran, M., Christianto, H.A., Yaman, İ.O., 2006. “The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars”, *Cement & Concrete Composites* 28, 432-440.
- [56]. Topçu, İ.B., Ünal, O., Uygunoğlu, T., 2007.b. “Kendiliğinden yerleşen betonda mineral katkıların taze beton özelliklerine etkilerinin araştırılması”, 2. Yapıda Kimyasal Katkılar Sempozyumu (Beton ve Harçlarda), 12-13 Nisan, Ankara, ss. 181-193.
- [57]. Ho, D.W.S. Sheinn, A.M.M. Ng, C.C. and Tam, C.T., 2002. The Use of Quarry Dusr For SCC Applications, *Cement and Concrete Research*, 32, pp. 505–50.
- [58]. Uygunoğlu, T., 2008. Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [59]. Felekoğlu, B., 2003. Kendiliğinden yerleşen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bil. Ens., İnşaat Müh. A.B.D., YL Tezi, ss. 50-60.

- [60]. Yahia, A. Tanimura M. and Shimoyama Y., 2002. Evaluation of Deformability of Different Types of Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 303–310.
- [61]. Xie, Y., Li, Y., and Long, G., 2005. Influence of Aggregate on Properties of Self-Consolidating Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete (May 26-28, 2005), Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie (The editors), China, 161-171.
- [62]. EFNARC, 2002. “Specification and guidelines for self-compacting concrete”, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, February, ss.1-40.
- [63]. Topçu İ.B., Uygunoğlu T., 2008. “Kendiliğinden yerleşen betonda pomza hafif agregası kullanımının araştırılması”, Beton Prefabrikasyon, Yıl 22, Sayı 85, Ocak, ss. 5-14.
- [64]. Demirtaş, M., 2001. ”Yüksek akışkanlığa sahip betonlarda (kendiliğinden yerleşen betonlar) bileşimin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi”, Y.Lis. Tezi, İ.T.U. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [65]. Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, U.A., Özkul, M.H., 2004. “Kendiliğinden yerleşen beton ve katkı-çimento uyumu”, Beton 2004 Kongresi, 10-12 Haziran, İstanbul, ss. 213-224.
- [66]. Özkul, M.H., 2002. “Beton teknolojisinde bir devrim: kendiliğinden yerleşen-sıkışan beton”, Türkiye Hazır Beton Birliği, Hazır Beton Dergisi, Temmuz Ağustos, ss. 64-71.
- [67]. Zhu, W. and Gibbs, J.C., 2005. Use of Different Limestone and Chalk Powders in Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 35, pp. 1457–1462.
- [68]. Sari, M., Prat, E., Labastire, J.-F., 1999. High strength self-compacting concrete -Original solutions associating organic and inorganic admixtures, Cem. Concr. Res., Vol: 29, p. 813-818.
- [69]. Erdoğan, Y. T., Mayıs 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve iletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 741 s.
- [70]. Fang, W. Jianxiong, C. and Changhui, Y., 1999. Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives, Proceedings of the First International RILEM Symposium, pp. 569–578.
- [71]. ASTM C618, 1998. Standart Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, Annual book of ASTM standarts, No. 4.
- [72]. TS EN 197-1, 2002. Çimento –bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE, Ankara.
- [73]. RILEM Committee 73-SCB, 1988. Final report on siliceous by products for use in concrete, materials and structures, C.21, No. 121.
- [74]. Punkki J. Golaszewski J. and Gjorv O.E., 1996. Workability Loss of High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, September-October, pp. 427–431.

- [75]. Kadri E.H. Aggoun S. Duval R. and Petruk M.P., 2000. Influence of C3A on physicochemical and mechanical properties of high performance concretes, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume II, Istanbul, Turkey, pp. 31-39.
- [76]. Meng, Y. Sui, K. Sun, Q. and Lu, Y., 2005. Effect on Properties And Of Concrete With Mix Materials of Gangue, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete China, 565-578.
- [77]. Hollingsworth, D., 2002. Design and Use of Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 429–432.
- [78]. Yoshioka, K., Tazawa, E.-I., Kawai, K., Enohata, T., 2000. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals, Cem. Concr. Res., Vol: 32, p. 1507–1513.
- [79]. Tandırlı, E., Akalın, Ö., Arca, E., 2000. The effect of melamine based superplasticizers on the properties of concrete, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I, Istanbul, Turkey, p. 453–462.
- [80]. Bartos, P.J.M., 2005. Testing-SCC: Towards new European Standards for Fresh SCC, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 25-44.
- [81]. Person, B., 2001. A comparison between mechanical properties of self compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and concrete research, 31, pp 193-198.
- [82]. Kocataşkın, F., 1995. Permability of Concrete, Bülten of Technical Üniversity of İstanbul, 8, ss. 50-56.
- [83]. Walraven, J., 2003. Kendiliğinden yerleşen betonların yapısal uygulamaları, Proceedings of 3rd RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete, France, pp 15-22.
- [84]. Dowson, A.J., 2002. The application, self compacting concrete in precast products, BIBM / Istanbul (Turkey), 8p.
- [85]. Felekoğlu, B. Yardımcı, M.Y. ve Baradan, B., 2005. Kendiliğinden yerleşen betonların donma çözülme direnci, V. Ulusal Beton kongresi, İMO, İstanbul.
- [86]. Sarıdemir, H., 2006. Mineral ve süper akışkanlaştırıcı katkılarının kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilme ve basınç dayanımına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [87]. Alyamaç, K.E., 2008. Kendiliğinden yerleşen betonun lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [88]. Person, B., 2003. Internal frost resistance and salt frost scaling of self compacting concrete, Cement and concrete research, 33, pp, 373-379.

- [89]. Orhan, E., 2012, Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Katkı Oranları Değişiminin Betonun Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [90]. Hamad, B. S., Harajili, M. H. and Jumaa, G., 2001. Effect of fiber reinforcement on bond strength of tension lap splices in high-strength concrete. ACI Structural Journal 2001, p. 638–647.
- [91]. Riessauw, F., 1957. Essais comparatifs d'adherence entre acier tor verrous 40 et acier a. 37 lisse. Symposium on bond crack formation in reinforced concrete-Vol. III, subject I Tekniska Högskolans Rotaprinttryckeri- RILEM- Stockholm.
- [92]. Türk, K. 2002. Bileşik eğilmeye maruz betonarme elemanlarda donatı aderansının beton özelliklerine bağlı olarak incelenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 96 s.
- [93]. Arda, T. S. 1968.b. Enine donatının aderansa etkisi, Doktora tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 97 s.
- [94]. Bayram, M. 1994. Betonarmede Aderans ve Kenetlenme, Bitirme Projesi, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, İzmir.
- [95]. Cairns, J. And Jones, K., 1996. An evaluation of the bond-splitting action of ribbed bars. ACI Materials Journal, p. 10–19.
- [96]. Ersoy, U., 1985. Betonarme (Temel ilkeler ve taşıma gücü hesabı), ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü yayını, yayın no:3, Ankara, 634 s.
- [97]. TS 500, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, T.S.E., Ankara.
- [98]. Ersoy, U. ve Atımtay E., 1975. Betonarme (Temel ilkeler ve hesap yöntemleri), ODTÜ yayını, Yayın No: 1, Ankara, 623 s.
- [99]. Kolek, J., 1963. An effect on bond, Structural Concrete, Vol.1, No: 9- Research Commity of Cast Stone and Cast Concrete Products Industry, London.
- [100]. Özden, K., 1985. Betonarme Malzemesi ve Kesit Hesapları. Evrim Yayın Evi, İstanbul, 567s.
- [101]. Dehn, F., Holschemacher, K., Lange, M. and Saidowsky L., Bond behavior of lightweight aggregate concrete (lwac) under cyclic loading, http://www.uni-leipzig.de/~massivb/institut/lacer/lacer05/105_13.pdf
- [102]. Ersoy, U. ve Özcebe, G., 2001. Betonarme. Evrim Yayın Evi, 756–766s.
- [103]. Tanyıldızı, H., 200., Beton Tipi ve Donatı Boyutlarının Beton Ve Çelik Yüzeyler Arası Dayanıma Etkisinin Kür Şartları Altında İncelenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [104]. Ersoy, U., 1987. Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü. Evrim Basım Yayım Dağıtım, İstanbul, 555–569s.

- [105]. Fu, X. and Chung, D.D.L., 1998. Decrease of the bond strength between steel rebar and concrete with increasing curing age, *Cement and Concrete Research*, No. 2 , 167–169.
- [106]. Gorst, N.J.S. and Clark, L.A., 2003. Effects of thaumasite on bond strength of reinforcement in concrete, *Cement & Concrete Composites*, No. 25, 1089–1094.
- [107]. Kunieda, M., Kurihara N., Uchida Y. and Rokugo K., 2000. Application of tension softening diagrams to evaluation of bond properties at concrete interfaces, *Engineering Fracture Mechanics*, No. 65, 299–315
- [108]. Gotto, Y., 1971. Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, *Journal of ACI*. No. 68.
- [109]. Park, R. and Paulay, T., 1975. *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, New York.
- [110]. Rehm, G., 1961. Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 138 – Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin*.
- [111]. Karakoç, C., 1985. Aderansız mekanik etkileşim olayı, *Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 83 s.
- [112]. TS EN 1008, 2003. Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dâhil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- [113]. TS EN 12390–3, 2003. Beton-sertleşmiş Beton Deneyleri. TSE, Ankara.
- [114]. ASTM C 234-91a, 2000. Standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforcing steel, *Annual book of ASTM standards*.
- [115]. Moetaz, M. and Hawary, E., 1999. Evaluation of bond strength of epoxy-coated bars in concrete exposed to marine environment, *Construction and Building Materials*, No.13, 357–362.
- [116]. Gorst, N.J.S. and Clark, L.A., 2003. Effects of thaumasite on bond strength of reinforcement in concrete, *Cement & Concrete Composites*, No. 25, 1089–1094.
- [117]. Amnon, K. and Berman, N., 2000. Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete, *Cement & Concrete Composites*, No. 22, 433–443.
- [118]. TS EN 12390-5, 2003. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinde Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
- [119]. TS EN 206-1, 2002. Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- [120]. Almussalam, A.A., Beshr, H., Maslehuddin, M. and Al-Moudi, O.S.B., 2004. Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, No. 26, 891–900.

- [121]. Khatri, R.P. and Sirivivathananon V., 1995. Effect of different supplementary cementations materials on mechanical properties of high performance concrete, Cement Concrete Research, No. 25, 209–220.
- [122]. Tasdemir, C., 2003. Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete, Cement and Concrete Research, No. 33, 1637–1642.
- [123]. Türk, K., Karataş, M., Ulucan, Z.U., 2008. Farklı oranlarda silis dumanı ikameli kendiliğinden sıkışan betonun mühendislik özellikleri, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 20 (1), ss. 165-174.
- [124]. Türker, P., Erdoğan, B., Kantaş, F., Yeğınobalı, A., 2004. Türkiye’ deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet COŞKUN, 1980 yılında Elazığ' da doğmuştur. İlk orta ve lise eğitimini Elazığ' da tamamlamıştır. 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Ressamlığı Öğretmenliği Bölümünde başladığı lisans eğitimini 2002 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimini 2005 yılında bitirmiştir. Yüksek lisansı devam ederken 2004 yılı aralık ayında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak başladığı görevine halen devam etmektedir. Evli ve 1 çocuk babasıdır.