

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EVİRİMSEL YAPI OPTİMİZASYONU YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ VE UYGULAMALARI

Ömer Faruk USLUOĞULLARI

Tez Yöneticisi:
Prof. Dr. Mehmet ÜLKER

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

ELAZIĞ
2006

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EVİRİMSEL YAPI OPTİMİZASYONU YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ VE UYGULAMALARI

Ömer Faruk USLUOĞULLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof.Dr. Mehmet ÜLKER

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır

TEŞEKKÜR

“Evrimsel Yapı Optimizasyonu Yönteminin İncelenmesi ve Uygulamaları” konulu çalışmada her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Prof.Dr. Mehmet ÜLKER’e, bölüm öğretim görevlilerimiz Sayın Doç.Dr. Ragıp İNCE’ye, Sayın Prof.Dr. Yusuf CALAYIR’a ve DSI’de görevli Sayın Dr.Sedat SAVAŞ’a çok teşekkür ederim.

Ömer Faruk USLUOĞULLARI

Elazığ, Mayıs 2006

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLolar LİSTESİ	V
SİMGELER LİSTESİ	VI
KISALTMALAR LİSTESİ	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X

1. GİRİŞ	1
2. YAPISAL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	2
2.1 Yapısal Optimizasyonun Gelişimi	2
2.2 Yapısal Optimizasyonda Dizayn Süreci	2
2.3 Dizayn Sürecinin Formülasyonu	5
2.3.1 Dizayn Değişkenleri	5
2.3.1.1- Malzeme Dizayn Değişkeni	6
2.3.1.2- Topolojik Dizayn Değişkenleri	6
2.3.1.3- Geometrik Dizayn Değişkenleri	7
2.3.1.4- Kesitsel Dizayn Değişkenleri	7
2.3.2 Dizayn Sınırlayıcıları	8
2.3.3 Amaç Fonksiyonu	12
2.4 Optimizasyonun Gereksinimine Dair Bir Örnek: Basit Mesnetli Bir Kiriş	14
3. EVRİMSEL YAPI OPTİMİZASYONU (ESO) YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ	17
3.1 ESO Yöntemine Giriş	17
3.2 Evrimsel Yapı Optimizasyonu (ESO) Yönteminin Geliştirilmesi	18
3.3 ESO Yönteminin Temel Kavramları	20
3.3.1 ESO Yönteminde Sonlu Eleman Analizi	20
3.3.2 ESO Yönteminin Algoritması	21
3.3.3 ANSYS Programının Evrimsel Yapı Optimizasyonuna Uygulanması	23

4. OPTİMİZASYON UYGULAMALARI	25
4.1 İki Çubuklu Çerçeve Örneği	25
4.1.1 ANSYS Programı ile Optimizasyon Süreci	25
4.1.2 ESO Yöntemi ile Elde Edilen Çözüm	31
4.2. Michell Tipi Yapı Örneği	39
4.2.1 İki Ucu Sabit Mesnetli Michell Yapısı	39
4.2.2 Bir Ucu Sabit Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı	47
 5- SONUÇLAR	 52
 KAYNAKLAR	 53
 EK 1	 54
EK 2	56
EK 3	59

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2-1 Sistem Dizaynı Gelişim Şeması

Şekil 2.2 Değişken kesitli kiriş

Şekil 2-3 Üç çubuklu kafes örneği

Şekil 2-4 Birden fazla amaç fonksiyona sahip üç çubuklu çerçeve örneği

Şekil 2.5 Bir ayağı basit diğer ayağı kayıcı mesnetli kiriş

Şekil 2.6 Kiriş için uygulanabilir dört adet kesit alanı.

Şekil 3.1 Ağaçların yerçekimine (a) ve karşılaştıkları engellere karşı (b) gelişim süreci

Şekil 3.2 Ağaçların maruz kaldıkları rüzgar kuvvetine göre halkalarındaki değişimleri

Şekil 4.1 ANSYS Programının Genel Görünümü

Şekil 4.2 İki çubuklu çerçeve yapı

Şekil 4.3 Optimizasyon işlemi esnasındaki Toplam hacim değişimi

Şekil 4.4 Optimizasyon işlemi esnasında maksimum gerilme değerindeki değişim

Şekil 4.5 İteratif işlemler esnasındaki H ve L değerlerinin değişimi

Şekil 4.6 İki çubuklu çerçeve yapı için dizayn alanı

Şekil 4.7. (25 x 60 adet) Sonlu Elemanlara Bölünmüş Dizayn Alanı

Şekil 4.8 Başlangıç modelinin iki çubuklu kafes yapıya dönüşen gelişim süreci.

Şekil 4.9 İki çubuklu çerçeve yapıya ait von Mises gerilmelerinin değişim süreci

Şekil 4.10 İki çubuklu çerçeve yapıya ait hacim oranlarının değişim süreci

Şekil 4.11 Evolutionary Structural Optimization kitabından [3] elde edilen optimum dizayn (b) ve bu çalışmada elde edilen optimum dizayn (a)

Şekil 4.12 Michell tipi yapı örneği.

Şekil 4.13 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapı için dizayn alanı.

Şekil 4.14 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapı için sonlu eleman modellemesi.

Şekil 4.15 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapı için ESO çözümü

Şekil 4.16 ESO kitabında elde edilen optimum dizayn

Şekil 4.17 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapıdaki von Mises gerilmelerinin gelişim süreci

Şekil 4.18 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapının hacmindeki değişim süreci

Şekil 4.19 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısının başlangıç dizayn alanı

Şekil 4.20 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı için ESO Çözümü

Şekil 4.21 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı için gerilme değişim süreci

Şekil 4.22 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı için hacim oranı değişim süreci

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı kesitlerdeki basit mesnetli bir kirişin maksimum yük taşıma kapasitesi

Tablo 4.1 *ANSYS* programının optimizasyon modülü kullanılarak elde edilen sonuçlar

Tablo 4.2 Başlangıç modeli Şekil 4.2 ve optimum dizayn Şekil 4.4(j) arasında yapılan karşılaştırma

Tablo 4.3 Başlangıç modeli Şekil 4.14 ve optimum dizayn Şekil 4.15(e) arasında yapılan karşılaştırma

Tablo 4.4 Başlangıç modeli Şekil 4.19 ve optimum dizayn Şekil 4.20(e) arasında yapılan karşılaştırma

SİMGELER LİSTESİ

- $q(x)$: Yayılı yük
 $g_j(\{X\})$: Eşitsizlik sınırlayıcıları
 $h_j(\{X\})$: Eşitlik sınırlayıcıları
 X, X_1 : Kesit alanları
 P_1, P_2 : Dış Yükler
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal Gerilmeler
 $[K]$: Rijitlik Matrisi
 $\{r\}$: Deplasmanlar
 $\{R\}$: Kuvvet
 p : İç kuvvet
 E : Elastisite modülü
 A : Kesit alanı
 l : Genişlik
 S : Sistem Rijitlik Matrisi
 Z : Amaç fonksiyon
 m : Kütle
 α_i : Dengeleme katsayısı
 M : Eğilme momenti
 $\sigma_{\max}$: Maksimum gerilme
 y : Tarafsız eksene olan uzaklık
 I : Atalet momenti
 $M_{\max}$: Maksimum moment
 L : Moment kolu
 σ_{11}^e : Eleman çekme asal gerilmeleri
 σ_{22}^e : Eleman basınç asal gerilmeleri
 RR_i : Başlangıç çıkarma oranı

ER : Evrimsel oran

σ^{vm} : von Mises gerilmeleri

σ_x : x yönündeki normal gerilmeler

σ_y : y yönündeki normal gerilmeler

τ_{xy} : Kayma gerilmeleri

σ_e^{vm} : Eleman von Mises gerilmeleri

σ_{max}^{vm} : Maksimum von Mises gerilmesi

$\sigma_{11,max}$: Eleman maksimum çekme gerilmeleri

$\sigma_{22,max}$: Eleman maksimum basınç gerilmeleri

RR_e : Mevcut iterasyondaki eleman çıkarma oranı

σ_{min}^{vm} : Minimum von Mises gerilmesi

KISALTMALAR LİSTESİ

ESO : Evolutionary Structural Optimization (Evrimsel Yapı Optimizasyonu)

FEA : Finite Element Analysis (Sonlu Eleman Analizi)

FEM : Finite Element Methods (Sonlu Elemanlar Yöntemi)

FSD : Fully Stressed Design (Tam Gerilmeli Dizayn)

GUI : Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EVİRİMSSEL YAPI OPTİMİZASYONU YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ VE UYGULAMALARI

Ömer Faruk USLUOĞULLARI

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2005 , Sayfa: 61

Bu çalışmada optimizasyon metotlarının adımları ve bu adımlardaki kavramlar (dizayn değişkenleri, sınırlayıcılar, amaç fonksiyonları, farklı optimizasyon metotları vb.) incelenmiştir. Daha sonra ise yeni bir optimizasyon tekniği olarak geliştirilen Evrimsel Yapı Optimizasyonu (ESO) yöntemi tanıtılmaktadır. Evrimsel yapı optimizasyonu diğer optimizasyon metotlarındaki gibi yapıda veya yapının yüzeyinde daha uniform gerilme seviyesi oluşturarak en verimli dizaynları elde etmeyi amaçlar.

ESO yönteminde ANSYS programından faydalanılmış ve *sonlu elemanlar yöntemi* ile analizler yapılmıştır. Bu yöntem kullanılarak bilgisayar yardımı ile sonuçlar tayin edilmekte ve sonra etkisiz malzemeyi çıkarmak için basit ESO kuralları uygulanmaktadır. Yani, ESO yöntemi ile tekrarlı olarak analizler yapılmaktadır. Her analizin sonunda yapıdan kademeli olarak etkisiz elemanlar çıkartılır ve yapı optimuma ulaşmaktadır. Ayrıca bu yöntemle bir karşılaştırma yapabilmek için ANSYS programının kendi optimizasyon algoritması da kullanılmıştır.

Sayısal uygulama olarak da, iki çubuklu çerçeve yapı ve Michell kirişleri elde edilecek şekilde sistemler hazırlanmıştır. Aynı zamanda çalışmadaki sistemler ANSYS programı kullanılarak oluşturulmuş ve yapısal analizler bu programa ilave edilen makrolar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işlemleri genellikle karmaşık matematik denklemlerden ve formüllerden oluşmaktadır. Çalışmada sunulacak örneklerden de görüleceği gibi ESO yöntemi, karmaşıklıklardan uzak, anlaşılır ve uygulanması kolay adımlar içermektedir.

Anahtar Kelimeler : ANSYS, Optimizasyon, Evrimsel Yapı Optimizasyonu, Yapısal Dizayn

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION AND EXAMPLES OF EVALUTIONARY STRUCTURAL OPTIMIZATION

Ömer Faruk USLUOĞULLARI

Firat University

Graduate School of Science and Technology

Department of Civil Engineering

2005, Page: 61

In this study steps of optimization methods and the concepts which can be come across in these steps (design variables, constraints, objective functions, several optimization methods, etc.) were studied. After then, as a new optimization method, Evolutionary Structural Optimization (ESO) will be introduced. The objective of Evolutionary Structural Optimization is same with other optimization methods namely it want to get uniform designs where all the elements on structures or at the surface of structures are at the same stress level.

In the ESO method ANSYS program was used and the analyses were carried out by *finite element methods*. Results were determined by using computer-aided programs with after using these results to remove ineffective elements simple ESO methods was used. With ESO method iterative analysis were carried out to remove elements. After all individual analysis was completed, ineffective elements removed gradually from system and result of this removal process optimum structure was acquired. To make comparison with this method the optimization module of ANSYS program was used.

Systems which will be transformed into frames with two bars and Michell beams were prepared as numerical examples. The systems used in the examples were designed by ANSYS program and structural analysis was carried out with macros added to algorithm of ANSYS program. Generally optimization processes contain complex mathematical formulations and equations. However, it can be seen in the examples that ESO method has steps which are, understandable, easily applied and aware of complexity.

Keywords: ANSYS, Optimization, Evolutionary Structural Optimization, Structural Design

1. GİRİŞ

İnsanoğlu çevresindeki doğayı gözlemleyip ondan etkilenmiş ve onu rehber edinmiştir. İç güdüsel olarak enerjiyi ekonomik kullanmış ve konforu maksimum hale getiren davranışlarda bulunmuştur. Makaralar ve kaldıraçların bulunup kullanılmaya başlanması insanların mekaniksel verimliliği maksimumlaştırma arzusunun bir kanıtıdır [1,2]. Böylelikle bir sistemi sadece geliştirmek ve kullanmak yeterli olmamıştır. Gün geçtikçe, en iyi ve en uygun sistemleri oluşturmak esas amaç haline gelmiştir. Bu da günümüzde “optimizasyon” diye adlandırılan süreci ortaya çıkarmıştır. Optimizasyon sürecinde, yapılan bir işin mevcut kısıtlamaları göz önünde bulundurularak en iyi (gördüğü işleve göre en hafif, en ucuz en verimli, en hızlı vb.) sonuç elde edilmeye çalışılır [3].

Yapısal optimizasyon ise, bir yapının en iyi performansına ulaşmayı amaçlayan mühendislik, matematik, fen ve teknolojinin alanlarının birleşmesidir, bu yapı bir köprü, bir uzay aracı veya değişik bir çerçeve sistemli yapı olabilir. Optimum dizayn sürecinde dizayn değişkenlerinin, minimize edilecek amaç fonksiyonunun ve yapının sınırlayıcılarının dizayncı tarafından başlangıçta belirlenmesi gerekir [4]. Yapının bulunduğu yerde, istenmeyen durumlar dahil tüm çevresel etkenlerin hesaba katılması gerekir.[3]

2. YAPISAL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

2.1 Yapısal Optimizasyonun Gelişimi

Optimizasyon sürecinde çok karmaşık matematiksel işlemlerin bulunmasından ve bunların elle hesabının zorluğundan dolayı son 20 yıla kadar yapısal optimizasyon konusu çok fazla akademik seviyede kalmıştır. Günümüzde gelişen analiz yöntemleri ve bilgisayar algoritmaları sayesinde yapısal optimizasyon konusunda yeni bir odaklanma meydana gelmiştir.

Geliştirilen analiz yöntemleri sayesinde yeni yöntemler önceki dizayn kontrollerinin dışında kullanılabilmiştir. Aynı zamanda iki faktör, konuyu dar kapsamdan çıkarıp pratik mühendislikte ve fende uygulanabilir hale getirmiştir. Bu faktörler yüksek performanslı hesaplamaların az bir maliyetle uygulanabilmesi ve yüzlerce dizayn değişkenlerine ve sınır şartlarını gereksinim duyan dizayn optimizasyonlarının çözümlerindeki hızlı gelişmeler. Bu gelişmelerin mühendisler ve diğer bilim adamları için kolay, güvenilir, ucuz ve anlaşılır formda olması için yeni yöntemler geliştirilmiştir.

Yeni geliştirilen yöntemleri yapısal optimizasyon yöntemleri adı altında toplanabilir. Özellikle yeni iterasyon yöntemleriyle klasik dizayn parametrelerini arama yöntemleri etkili şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Vanderplaats 1984). Diğer kuvvetli yöntemler ise Optimumluk Kriteri (Rozvany 1989) başlığı altında toplanmıştır. Daha yeni olarak ise Bendsoe'nun öncülüğünü yaptığı Homojenleştirme Yöntemi sürekli yapılarda optimum topolojiyi oluşturmada başarıyı sağlamıştır [3].

2.2 Yapısal Optimizasyonda Dizayn Süreci

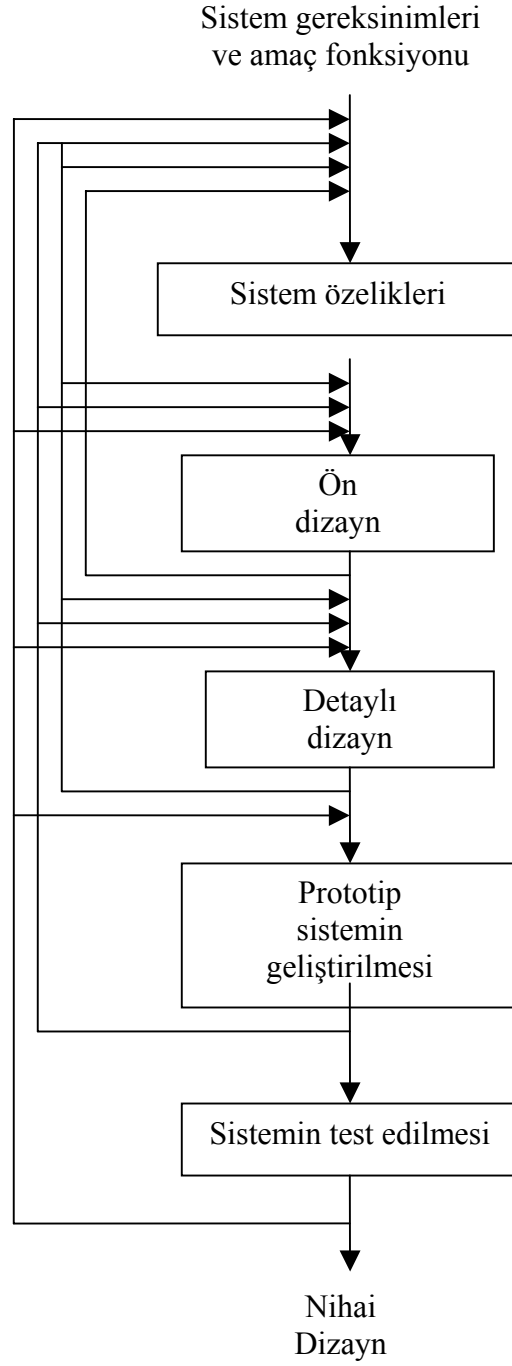
Geliştirilecek sistemlerde dizayn sürecinin çok önemli bir yeri vardır. Bu süreç çizim, hesaplama ve bunları bildirmeyle sonuçlanır. Dizayn süreci iteratif işlemlerden oluşur. Dizayn mühendisi tecrübelerini, iç güdülerini ve maharetlerini katarak bu işlemlerde aktif rol oynar. İteratif süreçte kabul edilebilir dizayn elde edilmeden önce deneme sistemlerinin analizi yapılır ve mühendis tarafından önceden belirlenen özellikler altında en iyi sistem aranır. Fakat en iyi sonuç farklı sistemlerde değişiklikler gösterir. Genelde maliyetin etkin olduğu verimli, güvenilir ve dayanıklı yapılar seçilir [4].

Dizayn sürecinde organize bir yol izlemek gerekir. Bu yolu bir şemayla özetlemek için Şekil 2.1 kullanılabilir. Süreç ilk olarak sistem gereksinimlerinin dizayncı tarafından belirlenmesiyle başlar. Bu süreçte dizayncı ve yüklenici arasındaki iletişim çok önemlidir. Bir yandan ihtiyaçların belirlenmesi ve ona göre bunların üretiminin yapılması gerekmektedir. Bundan sonraki aşama ön dizayn sürecidir. Sistem için farklı yapılar bu aşamada denenir. Kısa sürede bu sürecin yapılması gerektiğinden idealleştirilmiş modeller kullanılır. Çeşitli alt sistemler tayin edilir ve bunların ön dizaynlarının nasıl olacağı hesaplanır. Burada kullanılan veriler ile yapılan dizaynlar genel olarak nihai görünümü ve sistemin performansını etkiler. Bu ön dizayn aşamasının sonunda ileriki analizleri etkileyecek sistemler belirlenir.[4]

Üçüncü adımda ise tüm alt sistemler için detaylı dizayn kısmı yürütülür. Ön dizayn sürecindeki tüm sistemlerin çeşitli olasılıkları değerlendirilir. Bu süreçte alt sistemlerin dizayn parametreleri belirlenir. Alt sistemlerin üretilmesi için öncelikli olarak parametrelerin sayısal değerleri hesaplanır. Fakat, bu dizayn parametreleri teknolojik şartları ve sistemin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde olmalıdır. Dizayn parametreleri iki şekilde kurulabilir, birinde sistemin değerini arttıracak şekilde, diğesinde ise maliyeti düşürecek şekildedir. Bu sürecin sonunda sonuçlar çizim ve rapor formunda diğere süreçlerde kullanılmak üzere hazır hale getirilir.[4]

Şekil 2.1'deki son iki blok her zaman için gerekmeyebilir. Bu süreçler prototip sistemlerin hazırlanması ve test edilmesine dayanır. Prototiplerin hazırlanması, insan faktörünün olduğu veya yapıların önemli olduğu yerlerde gerekir. Eğer sistem belirlenen şartları sağlıyorsa bu iki adımın sonunda nihai dizayna ulaşılır. Fakat bazı durumlarda şartlar sağlanmayabilir, bu durumda her adımın gözden geçirilmesi gerekir, bu yüzden Şekil 2.1'de görülen geri dönüşüm döngüleri koyulmuştur. Sistem gereksinimleri karşılanana ve kabul edilebilir bir sistem oluşturulana kadar iteratif süreç devam eder. Sistemin karmaşıklığına ve teknolojik imkanlara göre iteratif sürecin zamanı belirlenir [4].

Dizayn süreçleri tamamıyla bilgisayar destekli olabilir ve dizayncı döngülere karışmayabilir. Bazı durumlarda bu doğru olsa da sistem dizaynı yaratıcılık isteyen bir kavramdır. Tamamen bilgisayar destekli dizaynlarda sonuçlar kusurlu çıkabilir veya istenilen dizayn alanında çıkmayabilir, bundan dolayı bu süreçlerde anahtar görevi dizayncı tarafından üstlenilmelidir. Dizayncı hislerini, tecrübelerini ve yargılarını nihai dizaynı elde etmede kullanmalıdır [4].



Şekil 2-1 Sistem Dizaynı Gelişim Şeması

2.3 Dizayn Sürecinin Formülasyonu

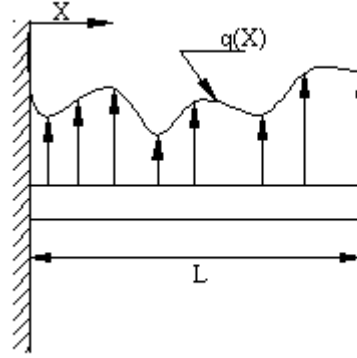
Yaygın bir anlayışa göre, günlük olaylarda bir problemi çözmede en önemli adım önce onu en iyi şekilde anlamak ve daha sonra o problemi belirli kalıplara oturtmaktır. Mühendislikte bu kalıba oturma işlemleri, genellikle problemlerin formülasyonu olarak adlandırılır. Yapısal optimizasyonun dizayn sürecinde de formülasyon çok önemli bir adımdır. Genel olarak dizayn sürecini belirtmek için üç nitelik kullanılabilir.

1. Dizayn Değişkenleri
2. Dizayn Sınırlayıcıları
3. Amaç Fonksiyonu

2.3.1 Dizayn Değişkenleri

Bir yapıyı geliştirmek veya optimize etmek istenildiğinde, değişiklikleri tanımlamak için serbestlikler gerekir. Bu da bazı parametre gruplarının izin verilen miktarda değiştirilmesi ile açıklanabilir [2]. Bu parametreler bazı nicelikler ile belirlenir, bunların bazıları dizayn süreci boyunca sabitlenmişlerdir. Bunlara *önceden atanmış parametreler* denir, ve optimizasyon sürecinde değişmezler. Önceden atanan parametreler birçok nedenden dolayı sabitlenebilir, mesela dizayncı kullanım amacı yüzünden bazı kısıtlamalara maruz kalabilir veya tecrübelerine dayanarak hangi parametrelerin daha iyi sonuç vereceğine önceden karar verebilir. Bazı parametreler de yükün durumu, mesnetlenme durumu gibi dış etkenlere göre değişebilir bunlara da *dizayn değişkenleri* denir. Bu değişkenler serbest olarak nitelendirilebilir ve bu değişkenlere tahmini olarak değer verilebilir. Bu iki değişken takımı beraber dizayn sistemini oluşturur [1].

Dizayn değişkenleri *sürekli* veya *ayrık* değerler alabilirler. Sürekli değişkenler belirli bir aralıkta değişir ve bu aralıkta her hangi bir değeri alabilir. Şekil 2.2'deki dizayn probleminde kirişin her hangi bir bölgesindeki atalet momenti sürekli değişken durumundadır. Ayrık dizayn değişkenleri ise izin verilen değerlerin arasından seçilir. Malzeme dizayn değişkeni ayrık değişken olarak sayılabilir. Bir kiriş dizaynı tasarlandığında, yapılması için beş çeşit malzeme kullanılırsa, bunların arasından birden beşe kadar malzemenin çeşidini belirleyecek bir dizayn değişkeni belirlenebilir. Bazen sürekli olarak kabul edilen değişkenler üretimini düşünerek ayrık hale gelir. Örnek olarak Şekil 2.2'deki bu kirişin dizayn maliyeti minimum alınırsa uygun kesite göre bir sınırlandırma yapmak gerekir, bu durumda atalet momenti süreklilikten çıkar ve ayrık hale gelir [2].



Şekil 2.2 Değişken kesitli kiriş

Bir yapı sistemi özelleştirilirken dikkate alınması gereken dizayn değişkenlerini kısaca aşağıdaki gruplar halinde gösterilebilir.

2.3.1.1- Malzeme Dizayn Değişkeni

Malzeme seçimi ayrı özelliklere sahip malzemeler arasından yapılabilir, burada kararı vermek için maliyetin artışına ve hesaplama zamanına bakılır. Olası malzeme miktarının az olduğu durumlarda, her malzeme için ayrı optimizasyon yapılması ve sonuçların karşılaştırılması daha etkili olur. Malzeme seçimi ile optimizasyon metodlarının yapılara uygulanması, bize optimuma ulaşma hakkında bir fikir verir, fakat genelde optimizasyon tekniklerinin malzeme seçiminde direkt uygulanması pratik değildir [1].

2.3.1.2- Topolojik Dizayn Değişkenleri

Topolojik dizayn değişkenlerini kullanmak ekonomik dizaynlara ulaşmayı kolaylaştırır. Yapının topolojisini optimum yapmak için belli durumlarda elemanların boyutları sıfıra yaklaştırılır ve buda ekonomik olmayan elemanların kaldırılmasına olanak tanır. İleriki bölümlerde tanıtılacak Evrimsel Yapı Optimizasyon (ESO) yönteminde genellikle bu değişkenler kullanılacaktır. Köprü halatı sayısı, çatı sistemi destekleyen kolon sayısı, kafes sistemdeki eleman sayısı vb. değişkenler topolojik dizayn değişkenleri içerisinde sayılır [1].

2.3.1.3 Geometrik Dizayn Değişkenleri

Çerçevelerdeki veya kafes yapılarıdaki düğüm noktalarının koordinatları, bir köprüdeki mesnetlerin yeri, sürekli kirişlerde açıklıkların uzunluğu, kabuk yapının yüksekliği gibi nicelikler geometrik dizayn değişkenlerine örnek teşkil ederler. Genellikle yapıların geometrisi optimizasyon sürecinden önce belirlenir, fakat bu değişkenlerin optimizasyon metodlarında kullanılması ile yapının optimum olacağı şekilde geometrisinde değişiklikler meydana gelebilir [1].

2.3.1.4 Kesitsel Dizayn Değişkenleri

En basit değişkenler kesit boyutlarıdır. Bunun dışında kesit alanı, esnek elemanların atalet momenti, plak kalınlığı gibi nicelikler bu dizayn değişkenlerinin sınıfındadır. Bazı durumlarda bir dizayn değişkeni yeterli olabilir fakat daha detaylı durumlarda kesiti yeterli şekilde tanımlayabilmek için birden fazla değişkene ihtiyaç duyulur. Mesela, eksenel burkulmalı bir eleman kullanılacaksa bunda dizayn değişkeni olarak alanı ve atalet momentini belirleyen kesit boyutları değişken olarak alınabilir. Fakat genellikle değişken olarak boyut gibi niceliklerdence kesit alanı veya atalet momenti gibi fiziksel özellikleri değişken olarak almak daha uygundur. Bu problemin formülasyonunu basitleştirir ve ayrıca çözüme ulaşmada kolaylık sağlar [1].

Pratik dizaynda kesit değişkenlerinin sınırlandırılması gereken durumlar olabilir. Dairesel plakların halkalarını düşünecek olursak, eğer alt veya üst sınır getirmezsek halkaların kalınlığı plaktan daha büyük olabilir veya aşırı derecede küçük olabilir [1,2].

Dizayn değişkenlerinde genel olarak dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar, dizayn değişkenlerinin mümkün olduğu kadar bağımsız dizayn değişkeni olarak seçilmesi ve doğru formülasyonu oluşturmak için yeterli sayıda dizayn değişkeni kullanılmasıdır. Bunlara dikkat edip yeterli ve gerekli dizayn değişkenleri seçildikten sonra dizayn sınırlayıcılarını belirleme safhasına geçilebilir.

2.3.2 Dizayn Sınırlayıcıları

Yapının belirlenmesi için bir dizi dizayn değerlerinin kullanılması gerekir. Bazı durumlarda bu dizaynlar fonksiyonel olarak, davranış özellikleri olarak veya başka açılardan optimizasyon problemlerinin çözümünde yeterli olmamaktadır. Bu durumda eğer dizayn istenen tüm gereksinimleri karşılayabiliyorsa, buna *uygulanabilir dizayn* denir. Bu dizaynı oluşturmak için gereken kısıtlamalara da *dizayn sınırlayıcıları* denir. Sınırlayıcılar ikiye ayrılabilir[1], bunlar;

1-Yapının kullanım amacına, yerine veya dış şartlara göre değişen sınırlayıcılar, bunlara *dizayn sınırlayıcıları* veya *sınır şartları* da denir. Bunlar görevlerine, üretime veya estetiğe göre çeşitli anlayışlarla düzenlenir. Yapılacak bir çatının eğimi, bir plağın minimum kalınlığı, kabuk yapının yüksekliği vb. üst veya alt limitler bu sınırlayıcıların alanına girer.

2- Fiziksel değişimleri kısıtlamak için kullanılan sınırlayıcılarıdır, *davranış sınırlayıcıları* olarak adlandırılabilir. Maksimum gerilme, deplasmanlar, burkulma dayanımına koyulan limitler gibi nicelikler davranış sınırlayıcılarına örnek teşkil eder.

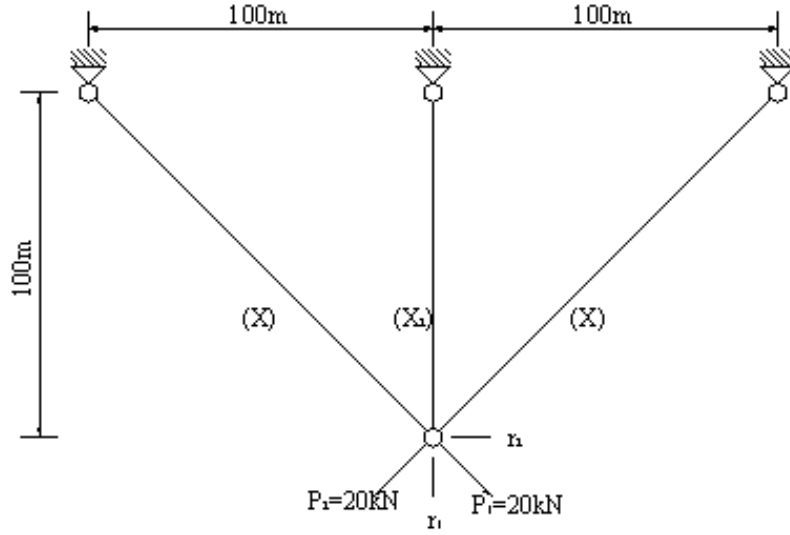
Dizayn sınırlayıcıları ve davranış sınırlayıcıları da matematiksel açıdan incelenecek olursa iki gruba ayrılabilir. Bir grubu eşitsizliklerle gösterilir,

$$g_j(\{X\}) \leq 0 \quad j=1, \dots, m \quad (2.1)$$

Burada m eşitsizlik sınırlayıcıları sayısı, X de değişken vektörü olarak adlandırılır. Bazı durumlarda ise sınırlamalar eşitlikler ile gösterilir, bunun genel formu da aşağıdaki gibidir.

$$h_j(\{X\}) = 0 \quad j=1, \dots, k \quad (2.2)$$

Bu denklemde k eşitliklerin sayısını gösterir. Eşitlikler optimizasyon sürecinde bazı değişkenlerin çıkarılmasını sağlayabilir, böylelikle değişken sayısı azalır ve problem daha az boyutlu hale gelir [1]. Üç çubuklu kafes sistem düşünüldüğünde, eğer yükün uygulandığı noktadaki düşey deplasmanın sıfır olması isteniyorsa burada bir eşitlik sınırlayıcısı oluşur [2]. Ayrıca eşitlik sınırlamaları, elde edilmek istenen kesit genişliğinin kesit derinliğine oranı gibi bazı dizayn yaklaşımlarını da içerebilir



Şekil 2-3 Üç çubuklu kafes örneği

Bu optimizasyon sürecinde dizayn sınırlayıcıları ve değişkenler basit bir örnekle açıklanacak olursa;

Şekil 2-3'deki yapı iki ayrı noktadan sırasıyla P_1 ve P_2 yüklemelerine maruz, çelik çubuklardan oluşan simetrik bir kafes sistemdir. Malzemenin özellikleri (elastisite modülü, yoğunluk, akma gerilmesi, vb), yapının topolojisi (düğüm noktaları arasındaki elemanlar), düğüm noktalarının koordinatları yapının *önceden atanmış parametrelerini* oluşturur. Dizayn değişkenleri olarak elemanların kesit alanları düşünülebilir. Genelde dizayn değişkenleri işlem karmaşıklığını ortadan kaldırmak için bağımsız olarak seçilir, böylece bu değişkenlerin değeri bulunduğu zaman yapının şekli ortaya çıkar, yapının davranışı analiz denklemleriyle değerlendirilebilir. Sınırlayıcılara örnek olarak ise mesnet tepkileri, gerilmeler, deplasmanlar gibi nicelikler gösterilebilir [1].

Bu örnekte yükler, gerilme alt ve üst sınırları ve kesit alanının alt sınırı önceden atanan parametreler olarak verilmişlerdir. Dizayn değişkeni simetri nedeniyle iki tanedir (X_1 ve X_2 kesit alanları).

1. Dizayn sınırlayıcıları kesit alanlarıyla temsil edilir

$$\begin{aligned}g_1 &\equiv -X_1 \leq 0 \\g_2 &\equiv -X_2 \leq 0\end{aligned}$$

(2.3)

2. Davranış sınırlayıcıları da bu örnekte gerilmelerden oluşmaktadır.

$$\begin{aligned}g_3 &\equiv \sigma_1 - 20 \leq 0 \\g_4 &\equiv -\sigma_1 - 15 \leq 0 \\g_5 &\equiv \sigma_2 - 20 \leq 0 \\g_6 &\equiv -\sigma_2 - 15 \leq 0 \\g_7 &\equiv \sigma_3 - 20 \leq 0 \\g_8 &\equiv -\sigma_3 - 15 \leq 0\end{aligned}$$

(2.4)

Matris-deplasman yöntemi kullanılarak gerilmeleri dizayn değişkenleri cinsinden yazarak açık gerilme sınırlayıcılarına ulaşılabilir [5]. Bunun içinde Hooke kanunu kullanılarak, kuvvetler deplasman cinsinden yazılabilir.

$$[K]\{r\} = \{R\}$$

(2.5)

$$p = \frac{EA}{l}r$$

(2.6)

$$\sigma = p / A$$

(2.7)

(2.6) ve (2.7) denklemlerini kullanarak gerilmeler deplasmanlarla açıklanabilir.

$$\sigma = Sr$$

(2.8)

S matrisi, k matrisinin her elemanın ilgili alanına bölünmesiyle bulunur.

$$\begin{aligned}\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} &= \frac{E}{100} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 \\ -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{Bmatrix} \\ \{\sigma\} & \quad [S] \quad \{r\}\end{aligned}$$

(2.9)

Deplasmanlar r_1 , r_2 deplasman analiz denklemleri (2.5) ile hesaplanır.

$$\frac{E}{100\sqrt{2}} \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_1 + \sqrt{2}X_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 20 \\ 20 \end{Bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

Bu basit örnekle açık formdaki deplasmanları dizayn değişkenleri cinsinden yazmak mümkündür.

$$\begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{Bmatrix} = \frac{20 \times 100}{E} \begin{Bmatrix} 1/X_1 \\ 1/(X_1 + \sqrt{2}X_2) \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11) denklem (2.9) içine yazılırsa gerilme dizayn değişkenleri cinsinden açıklanır.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 20 \frac{X_2 + \sqrt{2}X_1}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} \\ \sigma_2 &= 20 \frac{\sqrt{2}X_1}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} \\ \sigma_3 &= -20 \frac{X_2}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Sınırlayıcılar arasında sadece dizaynı etkileyenler alınır. σ_1 ve σ_2 daima pozitif ve σ_3 daima negatif olduğundan sadece şu gerilme sınırlayıcıları hesaba alınır.

$$\begin{aligned} \sigma_1 - 20 &\leq 0 \\ \sigma_2 - 20 &\leq 0 \\ -\sigma_3 - 15 &\leq 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) denklem (2.14) de yazılırsa gerilme sınırlayıcıların son hali şöyle olur,

$$\begin{aligned} \sigma_1 - 20 &\equiv \frac{20(X_2 + \sqrt{2}X_1)}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} - 20 \leq 0 \\ \sigma_2 - 20 &\equiv \frac{20\sqrt{2}X_1}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} - 20 \leq 0 \\ -\sigma_3 - 15 &\equiv \frac{20X_2}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} - 15 \leq 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Yukarıda basit bir çubuk sistemin optimizasyonu için kullanılabilecek standart bir formülasyon kullanılmıştır. İleriki bölümlerde, çalışmalarımızda kullanılan ESO yöntemi ile, bu tip karmaşık matematiksel işlemlere ihtiyaç duyulmayacağı gösterilmiştir.

2.3.3 Amaç Fonksiyonu

Genellikle bir yapının uygulanabilir dizaynları arasında sonsuz sayıda seçenek bulunabilir. Bu durumda yapının hangi dizaynının optimum olacağını belirlemek için, dizayn değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak kullanılan ve uygulanabilir dizayn alternatifleri içinde olan fonksiyona *amaç fonksiyonu* denir [1,6,2]. Amaç fonksiyonu, optimizasyon sürecinde en uygun değeri aranan fonksiyon olarak da bilinir. Genelde yapının maliyeti veya ağırlığı amaç fonksiyon olarak alınır ve $Z=F(\{X\})$ olarak gösterilir. Çoğunlukla minimizasyon($-F(\{X\})$) olarak farz edilir, eğer maksimum aranacaksa $\max F(\{X\}) = -\min -F(\{X\})$ olarak kullanılır [1].

Genelde amaç fonksiyonu, dizayn değişkenlerinin lineer olmayan fonksiyonudur. Şekil 2.3'deki üç çubuktan oluşan kafes sistemi tekrar incelenirse ve amaç fonksiyon olarak da malzemenin hacmini kabul edilirse şu lineer ifade elde edilebilir. Bu ifade çubuk boylarının kesit alanlarıyla çarpımı sonucu bulunur [1].

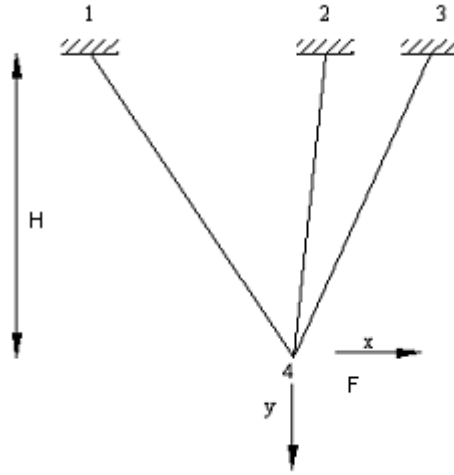
$$Z = 282.8X_1 + 100X_2 \quad (2.15)$$

Bazı durumlarda çok amaçlı fonksiyonlarla karşılaşılabilir. Şekil 2-4'de üç çubuklu sistemde çerçevenin ağırlığının ve elemanlarının gerilmesinin minimum olması istenirse kütle ve gerilmelerden oluşan dört amaç fonksiyonlu bir sistemin çözülmesi gerekir. Çok amaçlı amaç fonksiyonları karmaşıktır ve fazla kullanılmaz, fakat amaç fonksiyonu sayısını bire düşürmek için yaygın olarak kullanılan iki sezgisel yol vardır. İlk yol tüm amaçların yerini alacak bir bileşik amaç fonksiyonu üretmek. Mesela, yapının kütlesini m ile ve üç çubuktaki gerilmeleri σ_i , $i = 1, 2, 3$, olarak adlandırılırsa bileşik amaç fonksiyon f şöyle olabilir

$$F = \alpha_0 m + \alpha_1 \sigma_1 + \alpha_2 \sigma_2 + \alpha_3 \sigma_3, \quad (2.16)$$

Bu denklemde α_i dört amaç fonksiyonunun rölatif önemini yansıtan dengeleme katsayısıdır. İkinci sezgisel yol ise en önemlisini amaç fonksiyonu olarak seçerek diğerlerini elemektir, fakat bu yöntem amaç fonksiyonunun hangisinin daha önemli olduğunun kolay anlaşılabilirdiği durumlarda uygulanabilir [2].

Amaç fonksiyonu olarak ağırlık ve maliyet düşünülse de çoğunlukla ağırlık seçilir. Çünkü, maliyetin değişken sayısı çok fazladır ve gerekli bilgileri toplamak zorluk çıkartır. Genel bir maliyet fonksiyonunda malzemenin maliyeti, üretim, taşıma gibi nicelikler bulunur, ayrıca bunlara ilave olarak dizayn ve inşaat maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, tamir maliyeti, sigorta vb. gibi ek maliyetler de düşünülebilir. Bundan dolayı pratik olması amacıyla amaç fonksiyonun seçiminde, dizayn değişkenlerinin değişimine karşı hassaslık ve önemli maliyet bileşenleri dikkate alınır [1].



Şekil 2-4 Birden fazla amaç fonksiyona sahip üç çubuklu çerçeve örneği

Öncelikli olarak sınırlayıcılar ve amaç fonksiyonu $\{X\}$ dizayn değişkenlerinin vektörü olarak şöyle yazılabilir

$$g_j(\{X\}) \leq 0 \quad j=1, \dots, m \quad (2.17)$$

$$Z=F(\{X\}) \rightarrow \min \quad (2.18)$$

Denklem (2.18) $F(\{X\})$ 'in minimuma gittiğini gösterir. Buradaki dizayn değişkenleri bağımsızdır. Daha sonra sınırlayıcılar X_1 ve X_2 , dizayn sınırlayıcıları cinsinden yazılarak denklem (2.19) elde edilir. Amaç fonksiyon olarak da denklem (2.20) bulunur.

$$g_1 \equiv -X_1 \leq 0$$

$$g_2 \equiv -X_2 \leq 0$$

$$g_3 \equiv \sigma_1 - 20 \equiv \frac{20(X_2 + \sqrt{2}X_1)}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} - 20 \leq 0 \quad (2.19)$$

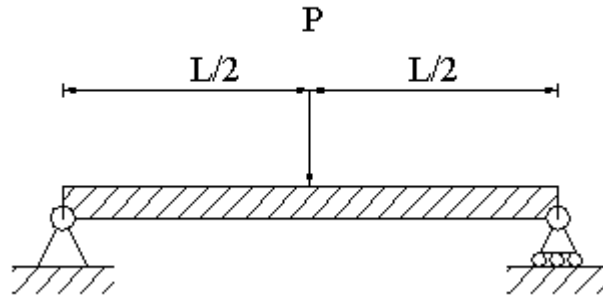
$$g_4 \equiv \sigma_2 - 20 \equiv \frac{20\sqrt{2}X_1}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} - 20 \leq 0$$

$$g_5 \equiv -\sigma_3 - 15 \equiv \frac{20X_2}{2X_1X_2 + \sqrt{2}X_1^2} - 15 \leq 0$$

$$Z = 282.8X_1 + 100X_2 \rightarrow \min \quad (2.20)$$

2.4 Optimizasyonun Gereksinimine Dair Bir Örnek: Basit Mesnetli Bir Kiriş

Yapısal dizaynın, malzeme kullanımını nasıl etkilediğini göstermek için karmaşık matematiksel ifadelerle girmeden basit bir örnek sunulmuştur. Çelik veya ahşap bir malzemenin yük taşıma kapasitesinin malzemenin kesitiyle olan ilişkisini göstermek için, basit mesnetli ortadan tekil yüklemeye sahip şekil 2.5’de görüldüğü gibi bir kiriş kullanılır. Bu basit örnek ile dizayn optimizasyonu konusunda yapılması gereken çalışmaların önemi görülmektedir [3].



Şekil 2.5 Bir ayağı basit diğer ayağı kayıcı mesnetli kiriş

Kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmak için, mühendis tarafından seçilebilecek bir çok kesit çeşidi bulunmaktadır. Bu örnek ile kesitin hesaplarda ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

Kirişte dizayn kriteri olarak, maksimum gerilme değerinin malzemenin limit gerilme değeri $\sigma_{\max}$ ’ı geçmemesi gerektiği kabul edilmiştir. Kirişteki gerilme (σ) ile eğilme momenti (M) arasındaki ilişki denklem 2.5 de görüldüğü gibidir.

$$\sigma = \frac{M y}{I}, \quad (2.21)$$

Bu ifadede, y mesafesi gerilmenin hesaplanacağı yerden, tarafsız eksene olan uzaklık (bu örnekte tarafsız eksen, düşey-eksendir) ve I kesitin atalet momentini temsil etmektedir. Her bölge için maksimum gerilme tarafsız eksenden en uzak mesafede bulunur. Alanın atalet momentinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi gösterilebilir

$$I = \int_A y^2 dA, \quad (2.22)$$

Buradan da görüldüğü gibi I atalet momentini arttıran en önemli etken alandan sonra y mesafesidir. Malzemede tarafsız eksenin, y orijinine yakın olduğu durumlardansa y nin yüksek değerlerinde I daha büyük değerler alır. Şekil 2.5'deki basit mesnetli kirişte kirişin orta açıklığındaki maksimum moment aşağıdaki ifadeyle bulunabilir.

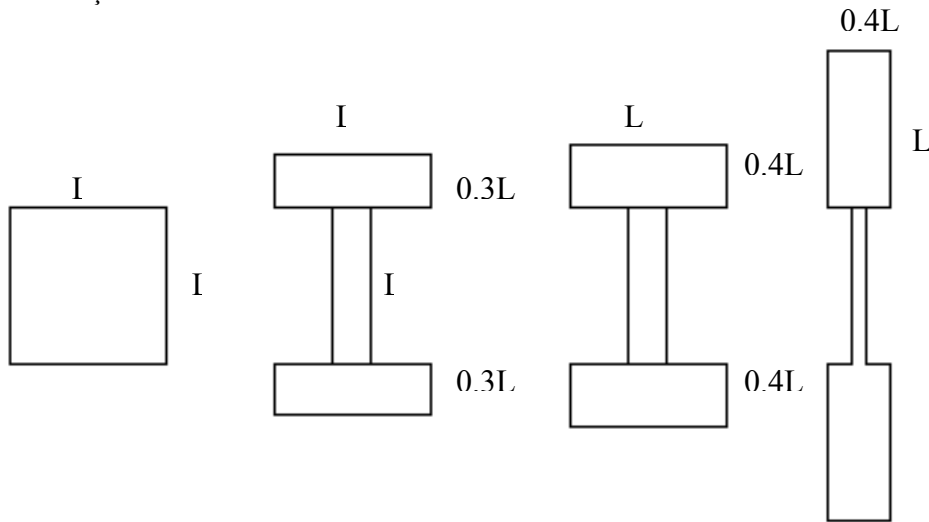
$$M_{\max} = \frac{PL}{4}, \quad (2.23)$$

P açıklık ortasında ki yük ve L kirişin genişliğini göstermektedir. Denklem (2.21) ve (2.23)'ü birleştirecek, kirişin maksimum yük kapasitesi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{\max} = \frac{4M_{\max}}{L} = \frac{4\sigma_{\max}}{L} \left(\frac{I}{y} \right). \quad (2.24)$$

Maksimum gerilme ve kiriş genişliği sabitlendikten sonra maksimum yük, I/y değerini maksimize ederek elde edilebilir. Bu değeri elde etmek için, öncelikle şeklin kesitinin belirlenmesi gerekir. Böyle bir kesiti belirlemek için sınırlayıcılar olarak kirişin hacmi ve kesit alanı alınır.

Eğer temel şeklin kenarları h ve h olan kare kesite uygun olarak seçilebilirse, aynı alana sahip diğer olası kesit şekilleri ile karşılaştırma yapmak mümkün olabilir. Böyle bir malzeme seçeneği sonsuz sayıda bulunabilir fakat kolaylık için Şekil 2.6'de görüleceği gibi sadece 4 adet kesit kullanılmıştır.



Şekil 2.6 Kiriş için uygulanabilir dört adet kesit alanı.

Denklem 2.22'yi kullanarak kolaylıkla kesitlerin atalet momentleri hesaplanabilir, burada bulunacak atalet momentinin denklem 2.24'te yerine koyulması ile her kesit için $P_{\max}$ değeri bulunur. Bulunan değerler Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Farklı kesitlerdeki basit mesnetli bir kirişin maksimum yük taşıma kapasitesi

Kesit Alanları	$P_{\max}$	$P_{\max}/P_{\max(a)}$
(a)	$0,6667 \sigma_{\max} h^3 / L$	1
(b)	$1,5852 \sigma_{\max} h^3 / L$	2,378
(c)	$1,8637 \sigma_{\max} h^3 / L$	2,795
(d)	$2,3556 \sigma_{\max} h^3 / L$	3,533

Tablo 2.1’den de görüleceği gibi kesitte yapılacak basit düzenlemelerle yük taşıma kapasitesinde 3.5 kattan fazla kazanç sağlamak mümkündür. Ters olarak da eğer yük sabitlenirse aynı yükü desteklemek için daha az malzeme kullanılabilir.

Bu basit örnekleme ile yapısal dizaynın uygulamalarında, malzeme kullanımının minimum olmasını sağlamak için yeterli sayıda analiz yürütülmesi gerektiği anlaşılmıştır. Fakat bu işlemlere üretim maliyeti dahil değildir ve tablodan görüleceği gibi kesit (d) deki üretim maliyeti ve malzeme maliyeti toplamı kesit (a) dan daha fazla olabilir.

Analizcilerin kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmak için malzemeyi tekrar düzenlemeleri optimizasyonun en önemli adımı olarak görülebilir. Bunun yanında yapısal optimizasyonun gerçek zorlukları bu adımda başar. Seçilen kesitin yükün uygulandığı noktada, dış liflerindeki gerilmenin limit değere eşit veya küçük olarak seçilmesi gerekir, (genellikle dizayn amaçları için eşit alınır). Bunun yanında malzemenin geri kalan kısmı çok düşük gerilme değerlerinde kalabilir. Bunun sebebi gerilmenin tarafsız eksenin ortasında lineer olması ve eğilme momentinin açıklık ortasından sona kadar $PL/4$ ile 0 arasında lineer olarak değişmesidir.

Hazır paket program (ANSYS) kullanılarak gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlarda kirişin sadece küçük bir kısmının maksimum gerilmenin %75’in den fazlasını taşıdığı (bu oran yaklaşık %3 tür) görülmüştür.. Diğer bir deyişle malzemenin büyük çoğunluğu (%97’si), maksimumun %75 inden az gerilmeye sahiptir.

Yukarıda karşılaşılan durumdaki verimsizliği gidermek için *tam gerilmeli dizayn* kavramı geliştirilmiştir. Tam gerilmeli dizayn safhasında yapının her bileşeni maksimum veya minimum müsaade edilen limit değere maruz bırakılır. Tüm yapısal bileşenlerin sahip olduğu gerilme yaklaşık olarak aynı duruma geldiği zaman, nihai yapı tamamıyla eşit gerilmeli hale gelir ve tam gerilmeli dizayna ulaşılmış olur [7]. Literatürde eşit gerilme durumu tam gerilmeli diye de adlandırılır. Genellikle optimizasyon algoritmaları tam gerilmeli durumu elde etmek için tekrar dizaynı amaçlayan döngülerden oluşur.

3. EVRİMSEL YAPI OPTİMİZASYONU (ESO) YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ

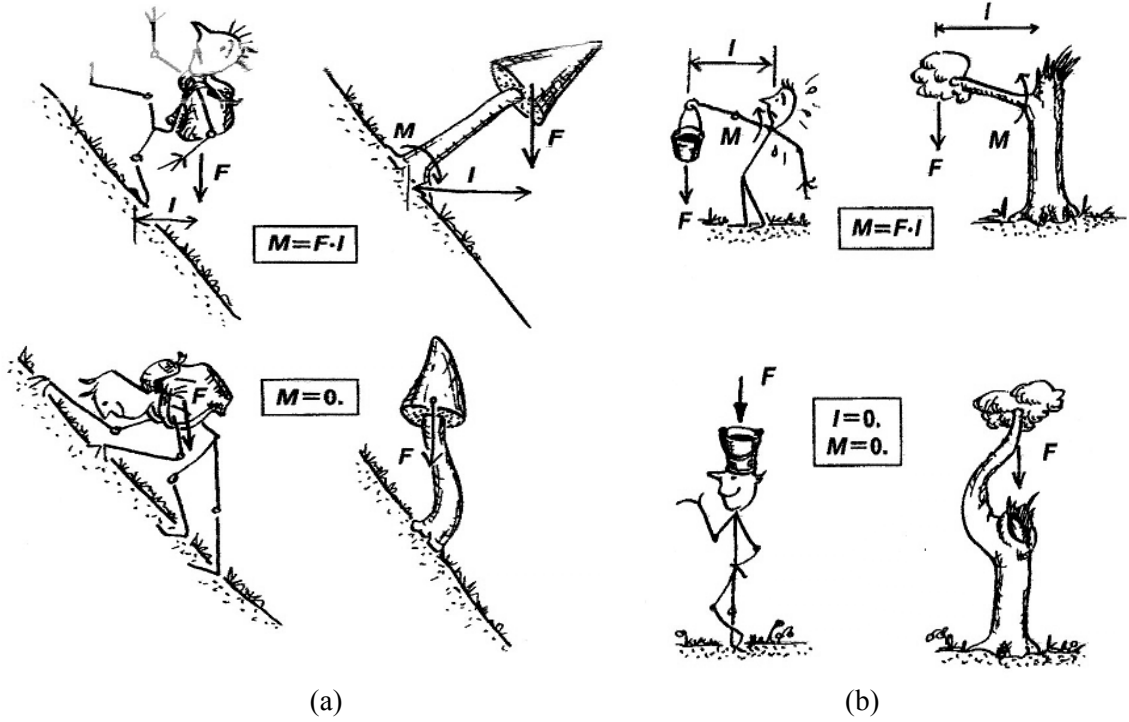
3.1 ESO Yöntemine Giriş

Son yıllarda bir çok yapısal optimizasyon metodu geliştirilmiştir. Optimizasyon metotları olarak genelde analitik ve nümerik metotlar kullanılmaktadır. Analitik metotlarda ise matematiksel teoriler ve değişken metotları kullanılır, fakat yapıların gün geçtikçe daha karmaşık sistemlerden oluşması ve hesap sürelerindeki artışların maliyete yansımalarının dolayı analitik metotlar yerini nümerik metotlara bırakmıştır. Nümerik metot ise programlama metodu olarak da adlandırılabilir ve bu metot nümerik matematik alanının bir dalıdır. Genel olarak iteratif işlemlerden oluşmaktadır [4].

Sürekli yapıların topolojik dizaynı yapısal optimizasyonun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Topolojik optimizasyonla daha ekonomik bir dizayn elde etmek mümkündür ve bunun için yeni optimizasyon metotları kullanılmıştır. Bunların başında evrimsel optimizasyon metotları gelmektedir. Son yıllarda evrimsel optimizasyon konusunda bir çok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaların temel ilkesi, dış şartlara uyum sağlanmasıdır. Bu metotlara örnek teşkil edecek bir yöntem olarak da *evrimsel yapı optimizasyonu* (ESO, evolutionary structural optimization) yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem ile nesnelerin nasıl şekilleneceği veya bir nesnenin mümkün olan en iyi yapısal performansının nasıl olacağı gibi sorulara cevap bulunmaktadır. ESO yöntemi aynı zamanda boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu problemlerinin çözümünü yapabileceği gösterilmiştir [3,8].

3.2 Evrimsel Yapı Optimizasyonu (ESO) Yönteminin Geliştirilmesi

İnsanoğlunun doğayla olan etkileşimi ve doğadan yaptığı gözlemler sonucu evrimsel yöntemlerin başlangıç süreci ortaya çıkmıştır. Şekil 3.1’de görülen ağaçlar, yerçekimine karşı gösterilecek en uygun şekilleri göstermektedir [9].

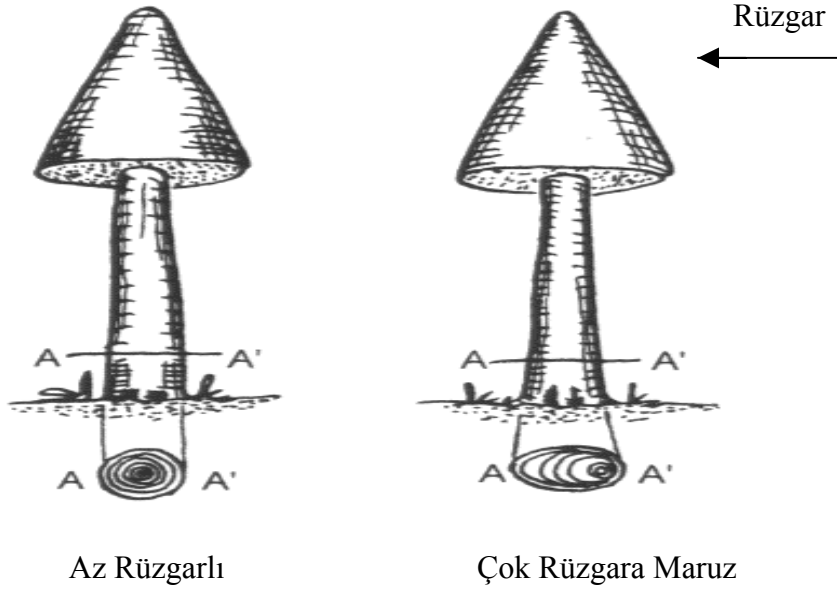


Şekil 3.1 Ağaçların yerçekimine (a) ve karşılaştıkları engellere karşı gösterdikleri (b) gelişim süreci

Şekil 3.1’deki ilk durumda ağaç, yerçekiminden kaynaklanacak eğilme momentini azaltma doğrultusunda bir gelişim göstermiştir. Benzer bir durumda her hangi biri sırtında taşıdığı çantanın yerçekimi doğrultusunda oluşacak yükünü ayaklara yöneltecek bir şekilde eğilim göstererek ortama adapte olmuştur. İkinci duruma bakıldığı zaman üst kısmını kaybeden bir ağaçtaki tek bir dal, gövdeyi bir M momentine maruz bırakmaktadır. Ağaç ise bu durumu aşabilmek için L moment kolundan kurtulmuş ve sıfır moment elde etmiştir.

Bu gözlem basit bir örnek ile doğadaki canlıların enerjiyi nasıl optimum kullandığını göstermektedir. Buna benzer bir adaptasyon süreci yine ağaçlarda görülmüştür. Ağaçların, rüzgara ve diğer yeryüzü olaylarına karşı bir tepki olarak halkalarını sadece kuvvete maruz bölgelerde sıklaştırdığı gözlemlenmiştir (Şekil3.2) [10].

Yukarıda anlatılan ilkeyi temel alarak şöyle söylenebilir ki bir yapının veya herhangi bir mekanizmanın tüm bölgelerinde aynı miktarda veya aynı cinsten malzeme kullanmak gerekmebilir. Bunun yerine sistemin fazla zorlanmaya maruz kaldığı bölgeler ona uygun şekilde dizayn edilip, az zorlanmaya maruz bölgelerdeki etkisiz eleman kullanımından kaçınılır.



Şekil 3.2 Ağaçların maruz kaldıkları rüzgar kuvvetine göre halkalarındaki değişimleri

1990'lı yıllarda Xie ve Steven tarafından geliştirilen ESO yöntemi de yukarıda anlatılan esaslara dayanmaktadır[11]. Bu yöntemin temel ilkesi dış yükler, mesnet şartları, yapının topolojisi vb. yapısal özelliğin dış şartlara uyum sağlayarak kendisini çevre koşullarına adapte etmesidir [12].

Bu adaptasyon süreci etkisiz elemanların (gerilme seviyesi düşük elemanların) kademeli bir şekilde dizayn alanından çıkartılmasıyla oluşmaktadır.

ESO yöntemi aynı zamanda, en verimli dizaynları elde etmek için, yapıda veya yapının yüzeyinde daha üniform gerilme seviyesi oluşturmayı amaçlar [3,7]. Malzemenin optimum şeklini oluşturmak için bütün elemanların yaklaşık olarak aynı gerilmeye olduğu “Tam Gerilmeli Dizayn” (FSD, Fully Stressed Design) kavramı ESO yönteminde sıkça kullanılmıştır [13]. Tam gerilmeli dizayn sağlandığı durumlarda yapının her bileşeni maksimum veya minimum müsaade edilen limit değere maruz kalır. Tüm yapısal bileşenlerin sahip olduğu gerilme yaklaşık olarak aynı duruma geldiği zaman, nihai yapı tamamıyla eşit gerilmeli hale gelir ve tam gerilmeli dizayna ulaşılmış olur [12]. Bu dizayn ile yapının tüm bölgeleri yaklaşık olarak eşit emniyet gerilmelerine sahip değerlerden oluşmakta ve malzemeden tam verim alınabilmektedir.

3.3 ESO Yönteminin Temel Kavramları

3.3.1 ESO Yönteminde Sonlu Eleman Analizi

Bu çalışmada sunulan ESO yönteminde hesaplama motoru olarak *sonlu elemanlar analiz* yöntemi (Finite Element Analysis FEA) kullanılmıştır. Her FEA'nın sonunda bilgisayar FEA sonuçlarını tayin eder ve sonra etkisiz malzemeyi çıkarmak için basit ESO kurallarının uygular. Yani, ESO işlemi FEA'yı tekrar tekrar çalıştırmaktan daha karışık değildir, bunun ile her FEA'nın sonunda sadece fazladan bir işlem olarak malzeme çıkartma işlemi gerçekleştirilir.

FEA bir hesaplama tekniğidir ve bu teknik yapıyı modeller veya sürekli bir yapıyı küçük bölümlerden (elemanlar) oluşan bir topluluğa dönüştürür. Yeni oluşan her eleman basit bir geometriye sahiptir (örneğin üçgensel veya dörtgensel) ve böylelikle analiz daha kolay hale gelir. FEA işlemi bir çok eş zamanlı cebirsel denklemler üretir, bunlar bir bilgisayar ile çözülebilir. FEA gerilme analizi metotlarını merkez almıştır. Bugünlerde bunun uygulamaları ısı transferi, sıvıların akışkanlığı, elektrik ve manyetik alanları içeren bir çok mühendislik alanlarında uygulanmaktadır. Önceden zorlanılan karmaşık problemlerin klasik analiz metotları ile çözümünde artık rutin olarak FEA kullanılarak çözülebilir. Çoğu mühendislik dizayn ofisleri ve imalat şirketleri bugünlerde FEA bilgisayar yazılımları bulundurmaktadır veya FEA servisi sağlayan danışmanlık şirketleri ile bağlantıları vardır.

Topoloji optimizasyonunda amaç önceden belirlenen sınırlayıcıları sağlayıp, verilen malzemeleri uygun şekilde dağıtarak, genellikle en hafif ve en rijit yapıyı elde etmektir. Topoloji optimizasyonu diğer geleneksel şekil optimizasyonları gibi başlangıçta verilen şekli geliştirmek yerine, en uygun şekli arama üzerine kuruludur. Nihai optimum yapının şekli başlangıç şeklinden çok farklı olabilir [7].

ESO yöntemi aynı zamanda topoloji optimizasyonunun bir uygulamasıdır ve bu yöntemi kısaca tanımlamak gerekirse, verimsiz malzemenin yapıdan kademeli olarak çıkartılarak, geride kalan şeklin yapının daha ekonomik doğrultuda kullanılmasını içeren süreci temel almaktadır [3]. ESO yöntemi diğer optimizasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında, kavramsal olarak basit ve uygulanması kolay bir yöntem olduğu görülür. Bunun sebebi karmaşık matematiksel işlemler ve denklemler bulunmamasıdır. Sistemik olarak etkisiz elemanların çıkartılarak sistemin tam gerilmeli hale gelmesinden oluşur.

Herhangi bir nesnenin mevcut şeklini kullanarak yeni dizaynlar türetmek çok hızlı ve güvenilir olabilir, fakat en etkili veya en iyi dizaynı bulmak için kullanılan yöntem bu değildir. Dizayn sınırlarının uygun bir şekilde tanımlanamadığı durumlarda, optimum dizaynın bulunmasında büyük zorluklarla karşılaşılır. Farklı çevre koşullarında, farklı yapısal formlara sahip sistemlerde ise ESO yöntemi kolalıkla uygulanabilir.

3.3.2 ESO Yönteminin Algoritması

Genel olarak mühendislik dizaynlarında, amaç fonksiyon olarak minimum ağırlık veya hacim kullanılır. Sınırlayıcılarda ise farklılıklar görülebilir. Yapının kullanım amacına, çevre koşullarına ve ekonomik şartlara göre sınırlayıcı olarak, *rijitlik*, *gerilme*, *kalınlık*, *frekans* vb. gibi nicelikler kullanılabilir. Dizayn değişkenleri de kullanılacak algoritmalara veya malzemeye göre değişiklikler gösterir, fakat çoğunlukla eleman sayısı, eleman kalınlığı, eleman hacmi gibi değişkenler kullanılır [3].

Geleneksel ESO metodunda, çıkarma kriteri (sınırlayıcı) olarak von Mises gerilmeleri veya asal gerilmeler kullanılabilir. Sistemde çekme ve basınç elemanlarının her ikisinin de mevcut olduğu ve yaklaşık olarak eşit dağıldığı durumlarda asal gerilmeler yerine von Mises gerilmelerinin çıkarma kriteri olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür. Bundan dolayı bu çalışmada ki optimizasyon sürecinde sınırlayıcı olarak von Mises gerilmeleri kullanılmıştır [3].

Asal gerilmelerin çıkarma kriteri olarak kullanıldığı durumlarda, öncelikli olarak her elemanın asal gerilmeleri σ_{11}^e ve σ_{22}^e bulunur. Yapıda, basınç veya çekme gerilmelerinin hakim olduğu bölgelere göre çıkarma kriteri uygulanır. Basınç gerilmesinin hakim olduğu bölgelerde, çekme gerilmesine maruz elemanlar ($\sigma_{22} \leq 0.0$ ve $|\sigma_{22}| \gg |\sigma_{11}|$) çıkartılır. Ters olarak da çekme gerilmesinin etkili olduğu bölgelerde, basınç gerilmeli elemanlar çıkartılır ($\sigma_{11} \geq 0.0$ ve $|\sigma_{11}| \gg |\sigma_{22}|$) [3]. Bu eleman çıkarmayı temel alan algoritma, kullanacağımız ESO yönteminin çekirdeğini oluşturacaktır.

Yukarıda anlatılan algoritma matematiksel olarak ifade edilebilir. Çekme veya basınç gerilmesinin hakim olduğu böyle bir durum, Denklem (3.1) ve (3.2) de gösterilmiştir.

$$|\sigma_{11}^e| \leq RR_i \times |\sigma_{11,\max}|, \sigma_{22}^e \leq 0.0 \text{ olduğu durum} \quad (3.1)$$

Basınç gerilmesinin hakim olduğu ve çekme gerilmeli elemanların çıkartılacağı kriter olarak denklem (3.2) kullanılır.

$$|\sigma_{22}^e| \leq RR_i \times |\sigma_{22,\max}|, \sigma_{11}^e \geq 0.0 \text{ olduğu durum} \quad (3.2)$$

bu denklemlerde $|\sigma_{11,\max}|$ ve $|\sigma_{22,\max}|$ elemanların mutlak maksimum gerilmelerini, RR_i (rejection ratio) ise her döngüde eleman çıkarılmasını sağlayacak çıkarma oranını temsil etmektedir.

Genellikle bu oran başlangıçta düşük değerli olarak seçilir, böylelikle döngülerde çıkartılacak eleman sayıları aniden yükselmez, kademeli olarak artış gösterir. Her döngünün sonunda ise *evrimsel oran* ER (evolutionary ratio) devreye girer, ve çıkarma oranı RR_i 'ye ER sabit sayısı eklenir.

$$RR_{i+1} = RR_i + ER, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.3)$$

Bu arttırılmış çıkarma oranı ile yeni sonlu eleman analizleri döngüleri oluşturulur ve mevcut döngülerde eleman çıkarma işlemi devam ettirilir.

Bu çalışmada çekme ve basınç elemanları eşit şekilde dağılmış olduğundan, çıkarma kriteri olarak asal gerilmeler yerine von Mises gerilmeleri σ^{vm} kullanılmıştır. Düzlem gerilme elemanlarında von Mises gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\sigma^{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (3.4)$$

denklemden σ_x ve σ_y sırasıyla x ve y yönündeki normal gerilmeleri, τ_{xy} ise kayma gerilmesini belirtir [3].

Çıkartma kriteri olarak asal gerilmelerin kullanıldığı algoritmanın benzeri, von Mises gerilmelerinde de kullanılmaktadır. Her döngüde elemanların σ_e^{vm} ve σ_{max}^{vm} değerleri hesaplanır ve data kütüklerine kaydedilirler. Daha sonra aralarındaki oran bulunur ve aşağıdaki şartı sağlayan elemanlar sistemden çıkartılır,

$$\frac{\sigma_e^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}} < RR_i \quad , \quad (3.5)$$

Optimizasyon sürecinde sistemi oluşturmak ve eleman çıkarma işlemini yürütmek için *ANSYS* programı ve yine *ANSYS* de hazırlanan makrolar kullanılmıştır.

3.3.3 ANSYS Programının Evrimsel Yapı Optimizasyonuna Uygulanması

3.3.2 bölümünde anlatılan işlemlerin ve algoritmaların adımları aşağıdaki süreç izlenerek *ANSYS* programı ile gerçekleştirilebilir.

/PREP7 komutu modelimizin hazırlık aşamasını başlatır, ardından kullanılan malzemenin özellikleri programdaki data kütüğüne kaydedilir, yani veri girişi yapılır. Bu veri girişinde *ET* komutu ile eleman çeşidi belirlenir, *MP* komutları ile de Poisson Oranı ve Elastisite Modülü gibi nicelikler girilir.

Daha sonra dizayn alanının detayları girilir (yükseklik, genişlik ve kalınlık) sistem ne kadar elemana bölünecekse hesaplanır ve bölünmüş elemanlardan oluşan ağ sistemi elde edilir. Bunun için de *N* komutu kullanılarak düğüm noktaları tespit edilir ve *EN* komutu ile de elemanlar oluşturulur. Elde edilen elemanların düğüm noktalarına mevcut yüklemeler ve mesnet şartları uygulanır. Mesnetler *D* komutu ile düğüm noktaları numaralarına göre girilir, yüklemeler ise *F* komutu ile yön belirtilerek tayin edilir.

Elemanlar belirlenip çevre koşulları da sisteme girildikten sonra iterasyonlardan oluşacak süreç başlatılır. Bu süreç için iki adet makro hazırlanmıştır. Bu makrolar **CREATE* komutu ile başlatılır.

Birinci makroda elemanların gerilme analizleri verilen yükler ve çevre koşulları altında */SOLU* ve *SOLVE* komutları arasında gerçekleştirilir. Burada iteratif süreç **DO* komutları ile kullanılan eleman sayısı kadar iterasyon ile yürütülür. Her analizin sonunda elemanların von Mises gerilmesi σ_e^{vm} ve mevcut iterasyondaki eleman maksimum von Mises gerilmesi σ_{max}^{vm} *ETABLE* komutu ile ileride tekrar çağrılacak şekilde bir data kütüğüne kaydedilir. Bu makroda son olarak iki gerilmenin oranları $\frac{\sigma_e^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}}$ programa hesaplatılır ve ayrı bir data kütüğüne RR_e olarak kaydedilir.

Bu adımda birinci makronun yardımıyla önceden RR_i olarak programa tanıtılan çıkartma oranı ve **GET* komutu ile çağrılan eleman gerilmeleri kullanılır. *ESORT* ile sıralanan gerilmeler arasından maksimum gerilme tayin edilir ve eleman gerilmeleri maksimum gerilmeye oranlanarak RR_e değerleri elde edilir. RR_e değerleri ile RR_i 'nin başlangıç değeri karşılaştırılır. $RR_e < RR_i$ olan elemanlar sistemden çıkartılır.

Eleman çıkarma işlemi farklı şekillerde gerçekleştirilmektedir. Eleman sistemden tamamıyla kaldırılabilir. Fakat bu çalışmada eleman çıkarma işlemi, elemanın Elastisite Modülünün çok küçük (yaklaşık 10^{-6} katı kadar) bir değerle değiştirilmesiyle meydana gelir [10]. Bu eleman çıkartma sürecinde ikinci makro devreye girer, bu makro da *MPCHG* komutu kullanılarak düşük gerilme değerine sahip elemanın Elastisite Modülü önceden belirlenen başka bir Elastisite Modülü ile değiştirilir [14]. Daha sonra tekrardan bir */PREP7* komutu kullanılarak makroların kullanıldığı iteratif süreç başlatılır. Başlangıçta belirlediğimiz nihai RR_i değerini elde edene kadar bu süreç bir döngü şeklinde devam eder. Bu çalışmada kullanılan RR_i değerleri deneme yanılma ile yapı hacminin değişimi duruncaya kadar elde edilen değerlerdir. Bu değerlerin yerine emniyet gerilmeleri de kullanılarak sonuçlar elde edilebilir. Her iterasyon sonunda RR_i değerine ER eklenerek süreç RR_i 'nin nihai sonucu elde edilene kadar devam ettirilir.

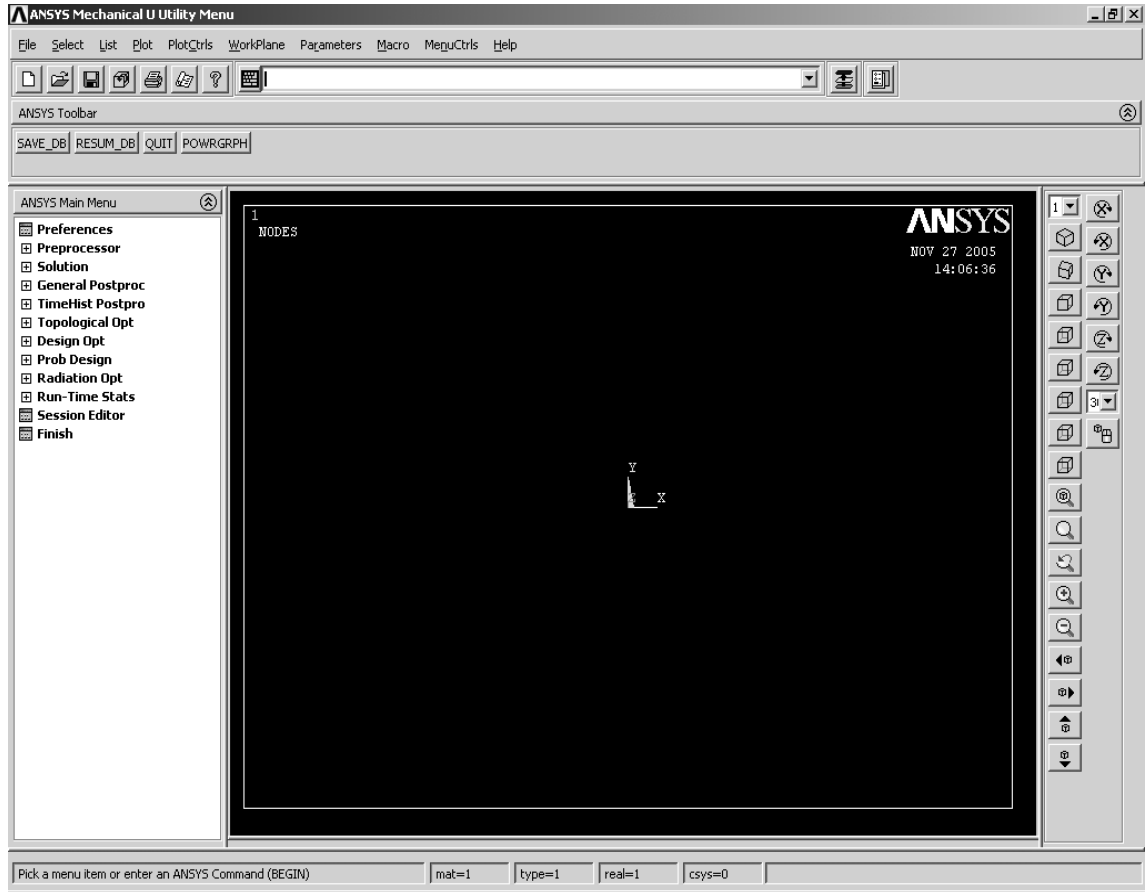
Yukarıda anlatılan ESO yönteminin çözümü için *ANSYS* programının algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmaların İki Çubuklu Çerçeve Örneğine (Bölüm 4.1) ve Michell Tipi Yapılara (Bölüm 4.2) uygulanmasında kullanılan akış diyagramları ise EK 2 ve EK 3'de bulunmaktadır.

4. OPTİMİZASYON UYGULAMALARI

4.1 İki Çubuklu Çerçeve Örneği

4.1.1 ANSYS Programı ile Optimizasyon Süreci

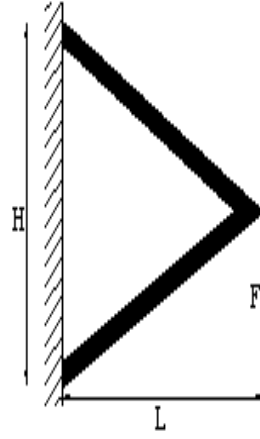
ANSYS programı iki ayrı şekilde yürütülür; birinci yöntem takım dosyaları (batch) olarak adlandırılan dosyaların hazırlanmasıyla gerçekleştirilir. Bu dosyalar Fortran diline benzeyen algoritmalar içermektedir ve metin editörleri kullanılarak komutların girilmesiyle oluşturulur. İkinci yöntem olarak ise Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (GUI: Graphical User Interface) ile işlemler görsel bir şekilde, yani menüler ve komut pencereleri (Şekil 4.1) kullanılarak gerçekleştirilir. Sisteme istenildiği zaman istenilen yere müdahale edilebilmek için batch dosyaları kullanmak işlemleri kolaylaştırmaktadır.



Şekil 4.1 ANSYS Programının Genel Görünümü

Bu çalışmada kullanılan örnekler Xie ve Steven [3] tarafından yapılan çalışmalardaki örneklerden seçilmiştir [3]. Böylelikle kullanılan algoritmanın doğruluğu, kolaylıkla literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış olacaktır.

İlk uygulama olarak, yapısal optimizasyon problemlerinde sıkça kullanılan Şekil 4.2’de görülen iki çubuklu çerçeve örneği kullanılmıştır. Yapı genişliği L , yüksekliği H olan, sol tarafından sabitlenmiş ankastre bir kiriş olarak dizayn edilmiştir. Elemanların kesit alanları sabit tutulmuştur, bunun yanında H ve L değişken olarak kullanılmıştır. Bu değişkenler belli sınırlar dahilinde değiştirilmiştir.



Şekil 4.2 İki çubuklu çerçeve yapı

Malzeme özellikleri olarak Elastisite Modülü (E) 2.1×10^5 Mpa seçilerek sisteme 20000N'luk bir kuvvet uygulanmıştır ve *ANSYS* batch komutları kullanılarak optimizasyon süreci gerçekleştirilmiştir.

ANSYS programı ile dizayn optimizasyonunda öncelikle

1) */PREP7* ön işlemci komutu ile hazırlık süreci başlatılır.

H = 2400mm, L = 1000mm ve A(kesit alanı) = 100mm² olarak girilir. Eleman cinsi LINK1 olarak adlandırılan çubuk elemanlardan seçilir. Düğüm noktalarının yerleri tespit edildikten sonra elemanlar oluşturulur. Mesnet şartları ve yükler girilerek modelin hazırlanma süreci tamamlanır.

2) */SOLU* komutu çözüm aşamasını başlatır.

3) */POST1* işlem sonrası veri tabanına sonuçları depolama işlemini yürütmektedir. Bu süreçte optimizasyon işleminde kullanılacak sınırlayıcılar belirlenir. Öncelikle eleman eksenel gerilmeleri tayin edilir. Daha sonra en küçük değer minimum gerilme sınırlayıcısı, en büyük değer ise maksimum gerilme sınırlayıcısı olarak atanır. Bu değerler optimizasyon sürecinde kullanılmak üzere *LGWRITE* komutu ile dosyaya kaydedilir.

4) */OPT* komutu ile optimizasyon modülüne geçilir. Öncelikle */OPVAR* komutu ile dizayn değişkenleri, sınırlayıcılar ve amaç fonksiyon girilir. Dizayn değişkeni olarak H ve L, sınırlayıcılar olarak ELSMAX (maksimum eleman eksenel gerilmesi) ve ELSMIN (minimum eleman eksenel gerilmesi), amaç fonksiyon olarak ise VTOT (toplam hacim) optimizasyon sürecine ilave edilir.

Optimizasyon yöntemi olarak ise *ANSYS* programı üç farklı yöntem kullanabilmektedir. Bunlar;

- Birinci Mertebe Metodu
- Alt Problem Yaklaşım Metodu
- Kullanıcının tanımladığı metotlar [15].

Bu örnekte birinci mertebe metodu (First-order Method) kullanılmıştır. Yöntem seçildikten sonra *OPFRST* komutu ile iterasyon sayısı belirlenir. Tüm bu bilgiler *LGWRITE* komutu ile önceden açılan dosyaya *OPSAVE* komutu ile kaydedilir. Sonuçların listelenmesi için */OPLIST* komutu da kullanılarak optimizasyon süreci sonlandırılır.

Yukarıda özetlenen işlemlerin algoritmalarının akış diyagramı EK-1’de görülmektedir.

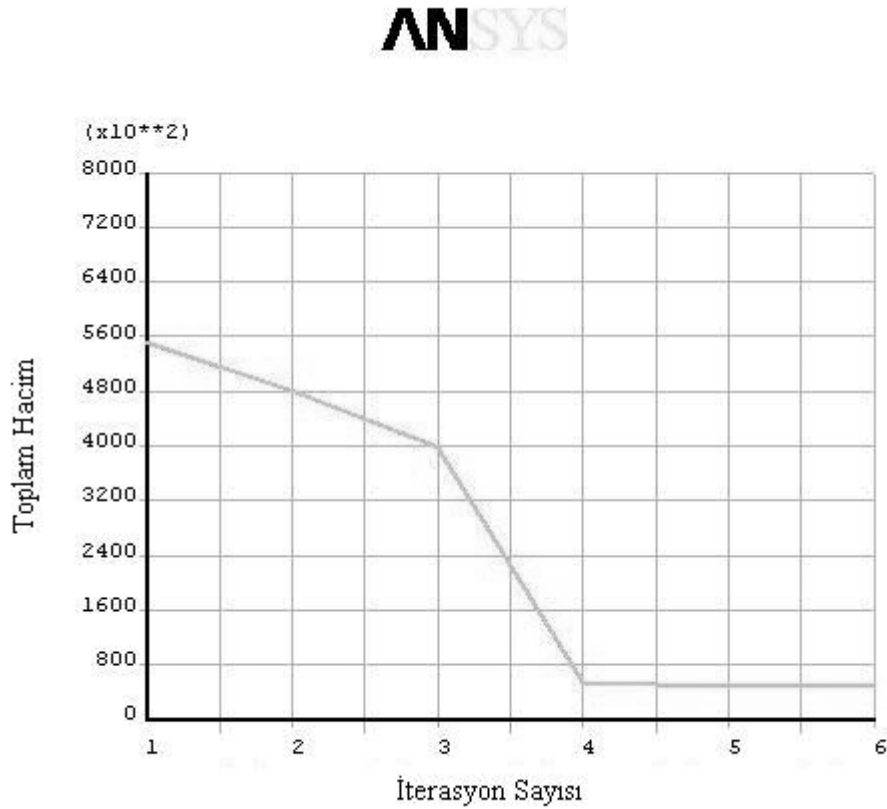
Sonuç değerleri incelenecek olursa, öncelikle optimizasyon sonucundaki iterasyon boyu H ve L değerlerindeki değişim süreci ve toplam hacim değeri incelenir. Bunun için *ANSYS* de elde edilen dizayn grupları incelenir. Tablo 4.1 de bu dizayn grupları ve aralarında ki en uygun grup gösterilmiştir.

Tablo 4.1 *ANSYS* programının optimizasyon modülü kullanılarak elde edilen sonuçlar

	SET 1	SET 2	SET 3	SET 4
	(INFEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
ELSMIN (SV)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ELSMAX (SV)	130.17	141.89	100.51	134.77
H (DV) >	2400.0	1986.9	1986.9	221.35
L (DV)	1000.0	1000.0	100.00	100.00
VTOT (OBJ)	552410	480610	398390	51967.
	SET 5	*SET 6*		
	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)		
ELSMIN (SV)	0.0000	0.0000		
ELSMAX (SV)	136.70	141.20		
H (DV)	214.59	200.63		
L (DV)	100.00	100.00		
VTOT (OBJ)	50793.	48391.		

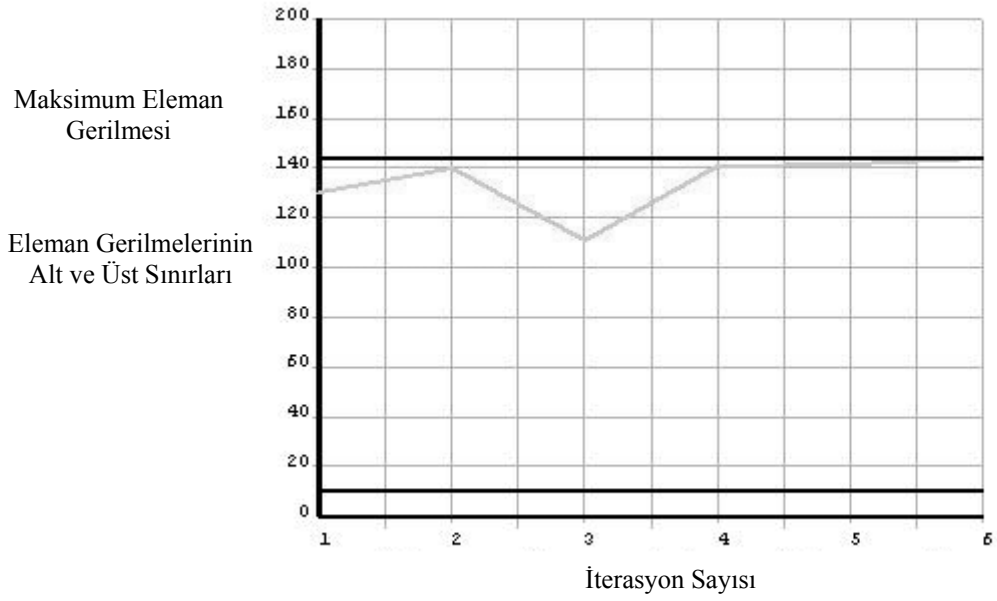
Tablo 4.1 incelendiği zaman “Infeasible” ve “feasible” olarak adlandırılan dizayn gruplar görülmektedir. Bunlar sırasıyla uygulanamayan ve uygulanabilir dizayn gruplarını oluşturmaktadır. Sınırlar zorlandığı veya geçildiği zaman uygulanamayan dizaynlar meydana gelmektedir. Fakat birinci-mertebe yöntemi kullanılarak yeni değerler sınırlara uyacak şekilde elde edilir.

Toplam hacim değerinin her iterasyon sonundaki değışimi Şekil 4.3’de görölmektedir. Bu grafikten de göröleceğı üzere altı iterasyonda optimum sonuca ulaşılmıştır. Şeklin az elemandan oluşması ve de sınırlayıcı olarak sadece eksenel gerimler, dizayn değışkenleri olarak da H ve L boyutları seçilmesi sonucu iterasyon sayısı düşük olacak şekilde bir sistem elde edilmiştir. Başlangıç değğerlerinin deneme yanılma yoluyla büyük olarak seçildiğı zaman, hacimde de çok önemli bir azalma meydana gelmiştir. Bundan sonraki optimizasyonlar da daha düşük başlangıç değğerleri kullanılabileceğı buradan anlaşılmıştır.



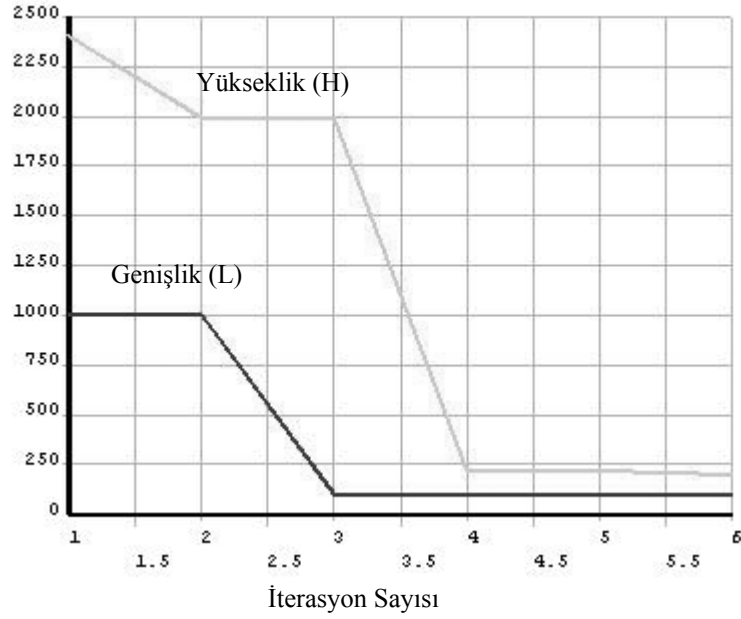
Şekil 4.3 Optimizasyon işlemi esnasındaki Toplam hacim değışimi

Optimizasyon esnasında, hacimdeki bu azalmaya karşı eleman maksimum gerilemelerinde büyük bir artış meydana gelmemiştir. Şekil 4.4 ve Tablo 4.1’de göröleceğı üzere gerilmede %10’luk bir artış meydana gelmesine rağmen hacimde %90’a yakın bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.4 Optimizasyon işlemi esnasında maksimum gerilme değerindeki değişim

H ve L arasındaki bağıntının, analitik yollardan yapılan hesaplamaları ile optimum yüksekliğinin $H = 2L$ olduğu bulunmuştur [3]. Uygulamadaki en uygun dizayn grubu Tablo 4.1’de görülen *SET 6* olarak elde edilen gruptur. Belirli sınırlayıcılar altında elde edilen optimum sonuçta $H=200.63$ ve $L=100.00$ (Tablo 4.1) olarak elde edilmiştir. Böylelikle *ANSYS* programıyla yapılan optimizasyon sonucu ile analitik yollardan yapılan sonucun karşılaştırılması yapılabilmektedir (Şekil 4.5).



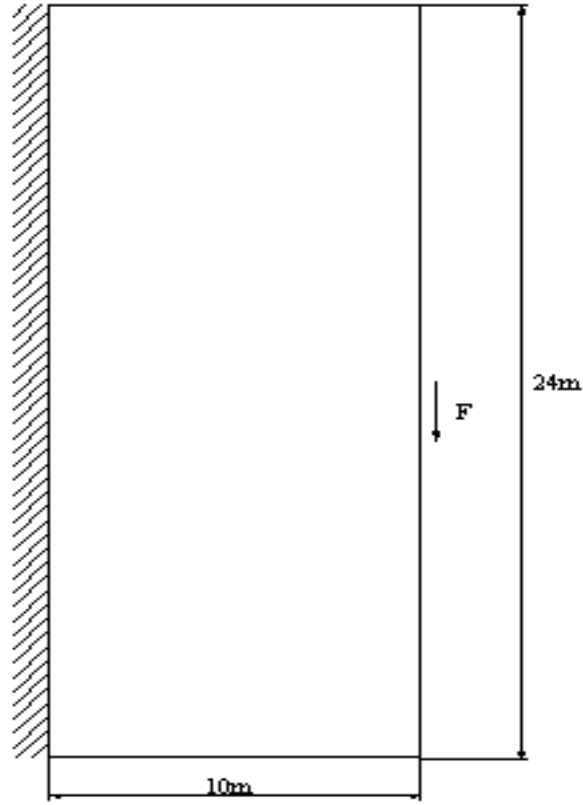
Şekil 4.5 İteratif işlemler esnasındaki H ve L değerlerinin değişimi

4.1.2 ESO Yöntemi ile Elde Edilen Çözüm

Üzerinde çalışılan uygulamalar Xie ve Steven [3] tarafından yapılan çalışmalardaki örneklerden seçilmiştir [3]. Böylelikle kullanılan algoritmanın doğruluğu, kolaylıkla literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış olacaktır.

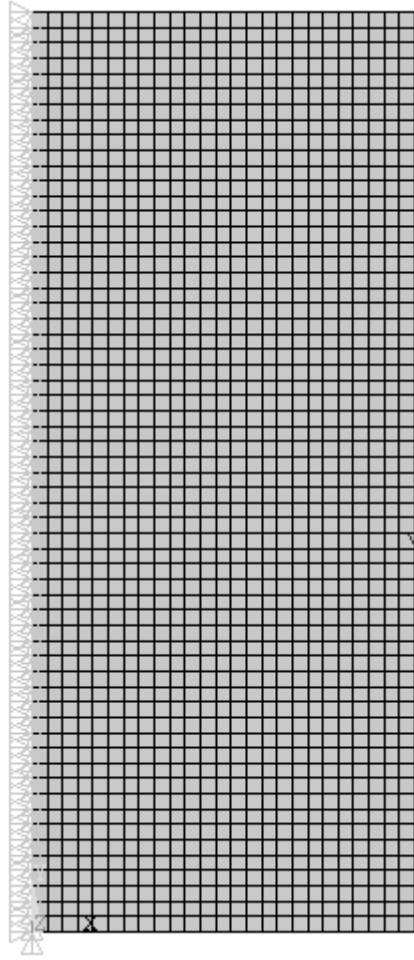
ESO uygulaması olarak, yapısal optimizasyon problemlerinde sıkça kullanılan Şekil 4.2’de görülen iki çubuklu çerçeve örneği kullanılacaktır. Yapı genişliği L, yüksekliği H olan, sol tarafından sabitlenmiş ankastre bir kiriştir. Analitik yollardan yapılan hesaplamalar ile optimum yüksekliğin $H = 2L$ olduğu bulunmuştur [3].

Evrimsel yapı optimizasyonu yöntemi kullanarak böyle bir yapıyı elde etmek için, Şekil 4.6’da görülen model kullanılmıştır. Modelin tahmin edilen nihai dizaynı kapsayacak büyüklükte olmasını göz önünde bulundurarak, başlangıç modeli $2L \times L$ boyutlarından daha büyük dikdörtgensel bir şekilde seçilmiştir.



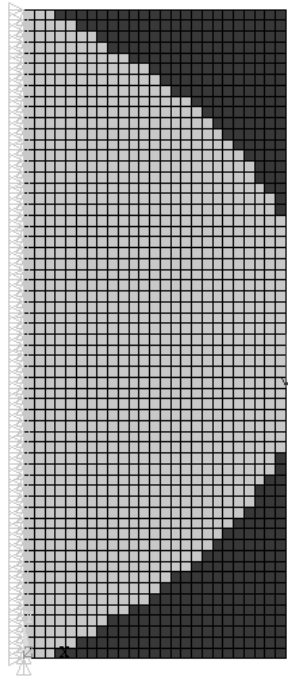
Şekil 4.6 İki çubuklu çerçeve yapı için dizayn alanı

Şekil 4.6'daki dizayn alanı 25 x 60 eşit boyutlarda (0.4m x 0.4m) dört düğüm noktalı düzlem gerilme elemanlarına bölünmüştür (Şekil 4.7). Plâğın kalınlığı 1mm olarak seçilmiştir. Young Modülü $E = 100 \text{ GPa}$ ve Poisson oranı $\nu = 0.3$ olarak kabul edilmiştir. Sağ köşenin merkezindeki elemanların birleşim noktasına 400kN'luk bir kuvvet uygulanmıştır.

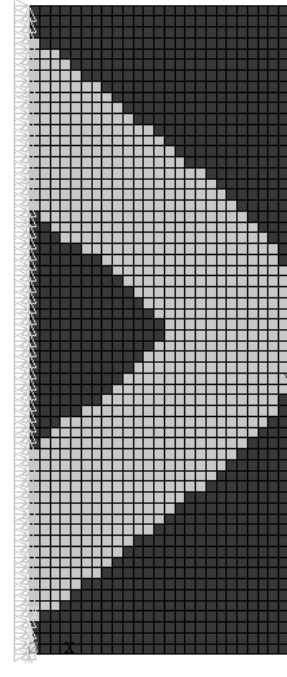


Şekil 4.7. (25 x 60 adet) Sonlu Elemanlara Bölünmüş Dizayn Alanı

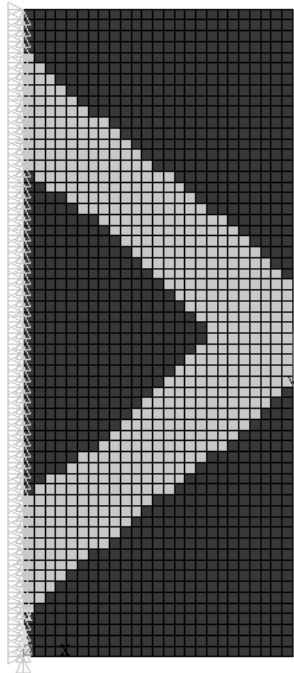
Optimizasyon sürecinde, iterasyon sayısı ve başlangıç çıkarma oranını sabit tutulmuştur. Bunun yanında evrimsel oran ER ise nihai çıkarma oranına göre değişim göstermiştir. Şekil 4.8 (a-j) de elde edilen optimum yapılarda 50 iterasyon yapılmış ve başlangıç çıkarma oranı olarak $RR_0 = \%0.1$ alınmıştır. ER ise $\%0.06$ (Şekil 4.8(a)) dan başlayıp $\%0.6$ 'ya (Şekil 4.8(j)) kadar arttırılmıştır. Bu şekillerde açık renkler kalan elemanları koyu renkler ise çıkartılan elemanları göstermektedir. Her şekil nihai RR çıkarma oranının sonunda elde edilen kararlı duruma göre belirlenmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi çıkarma oranı arttırıldığı zaman modelden çıkartılan verimsiz malzeme miktarı artmaktadır. Başlangıçta düz bir dizayn alanından, gelişim sonucunda iki-çubuklu kafes sistem elde edilmiştir. Nihai sonuçta Şekil 4.8(j) de görüldüğü gibi $H=2L$ elde edilmiştir.



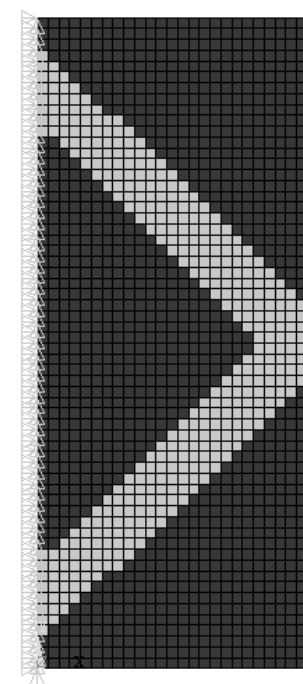
(a) $RR = \%3$



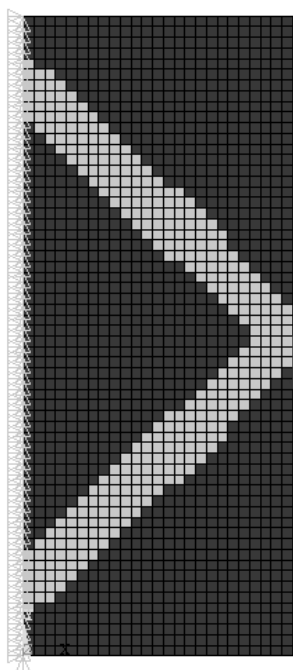
(b) $RR = \%6$



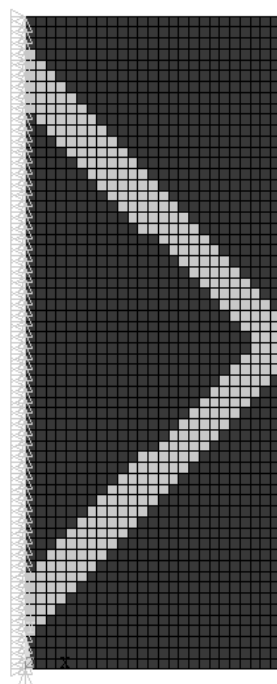
(c) $RR = \%9$



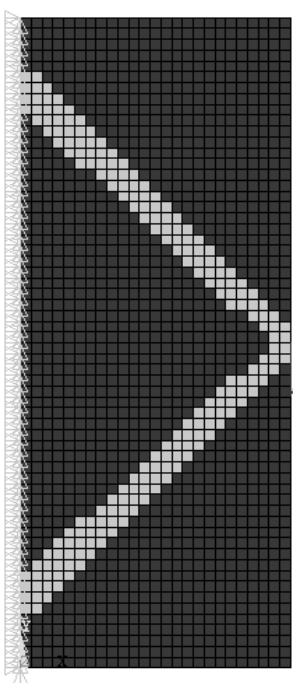
(d) $RR = \%12$



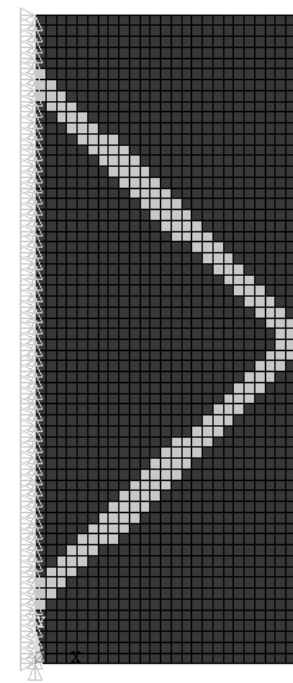
(e) RR = %15



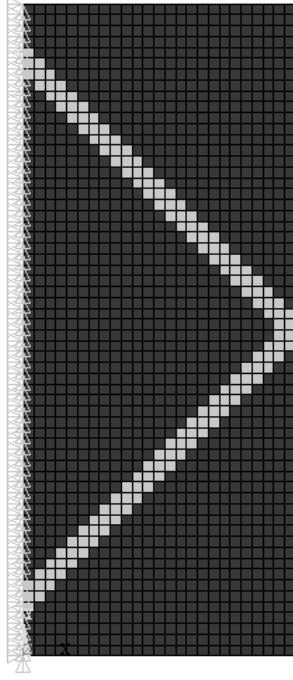
(f) RR = %18



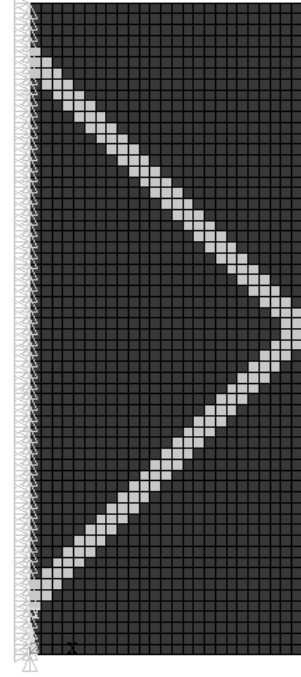
(g) RR = %21



(h) RR = %24



(i) $RR = \%27$

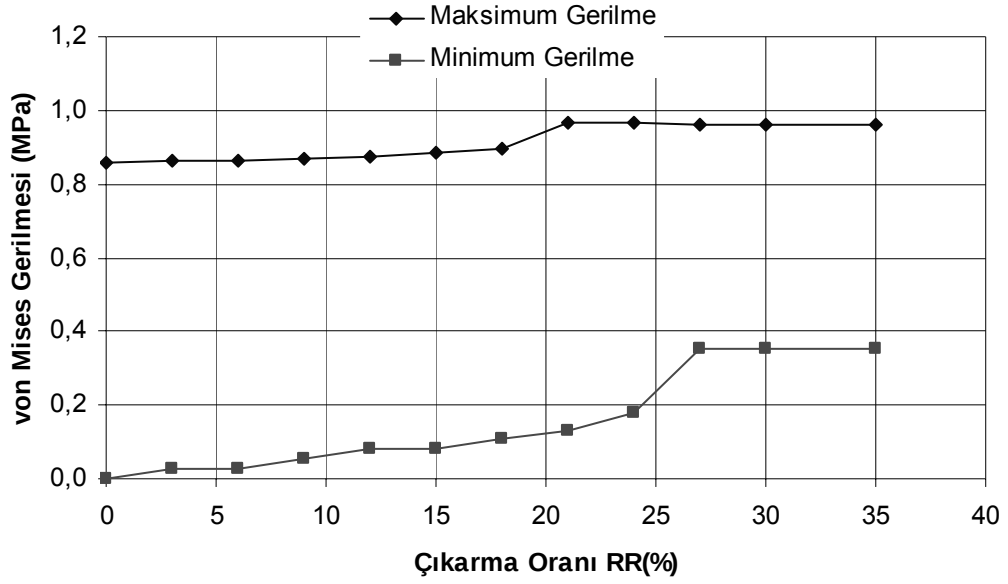


(j) $RR = \%30$

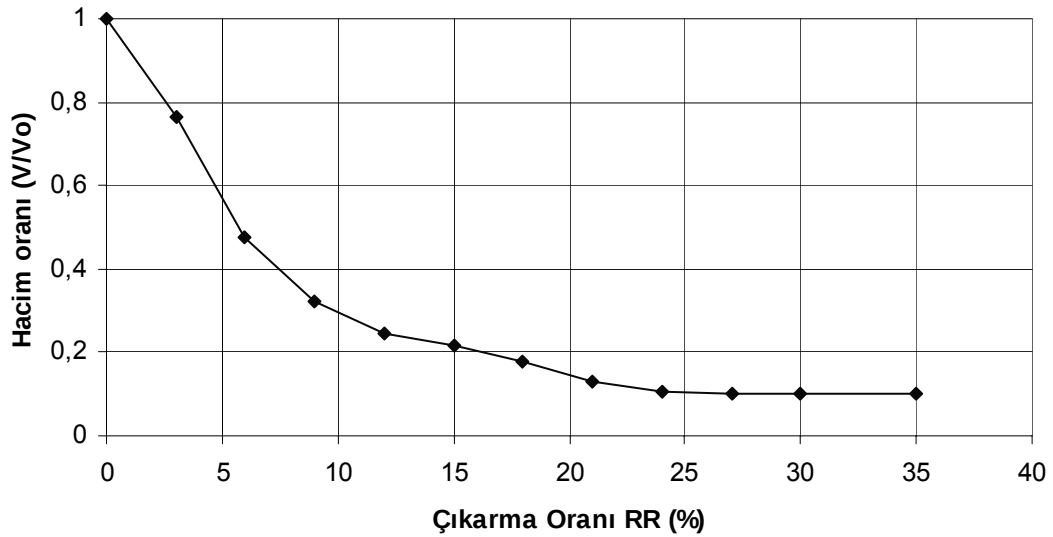
Şekil 4.8 Başlangıç modelinin iki çubuklu kafes yapıya dönüşen gelişim süreci.

Optimizasyon sürecinde eleman çıkarma işlemi, elemanları modelden çıkartılması şeklinde gerçekleşmemiştir. Bu elemanlar modelden çıkartılırsa eleman matrislerinde problemlerle karşılaşılabilir. Bunun yerine algoritmalarda çıkartılacak elemanların Elastisite modüllerine çok düşük değerler verilmiştir. Böylelikle çıkartılan elemanların yük taşımada hiçbir fonksiyonu kalmamıştır.

Belirli çıkarma oranları kullanılarak, optimum şekillerden elde edilen maksimum ve minimum von Mises gerilemeleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Çıkarma oranı ve hacim oranındaki değişim süreci de Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 İki çubuklu çerçeve yapıya ait von Mises gerilmelerinin değişim süreci



Şekil 4.10 İki çubuklu çerçeve yapıya ait hacim oranlarının değişim süreci

Tablo 4.2’de ise başlangıç modelimizde elde edilen gerilmeler, bunların oranları ve hacim değerleri ile optimum şekildeki bu değerler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 4.2 Başlangıç modeli Şekil 4.2 ve optimum dizayn Şekil 4.4(j) arasında yapılan karşılaştırma

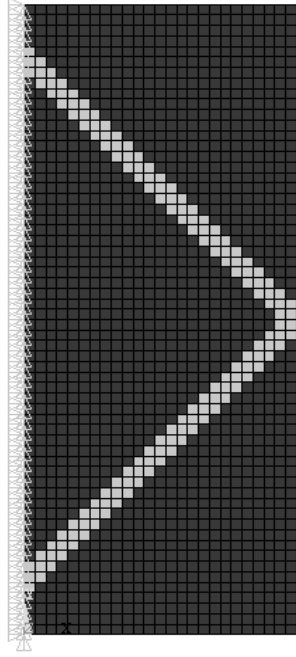
	$\sigma_{\min}^{vm}$ (MPa)	$\sigma_{\max}^{vm}$ (MPa)	$\sigma_{\min}^{vm} / \sigma_{\max}^{vm}$	Volume (m ³)
Başlangıç Modeli	0,0002	0,8602	0,0002	0,2400
Optimum Dizayn	0,3541	0,9606	0,3686	0,0237

Bu tablodan da görüleceği gibi başlangıç modelinde maksimum ve minimum von Mises gerilmeleri arasında çok büyük bir fark vardır. Fakat, optimum modelimize baktığımız zaman bu oranın önemli bir derecede azaldığını görmekteyiz. Aslında nihai model tam gerilmeli dizayn diye adlandırılan duruma gelmiştir.

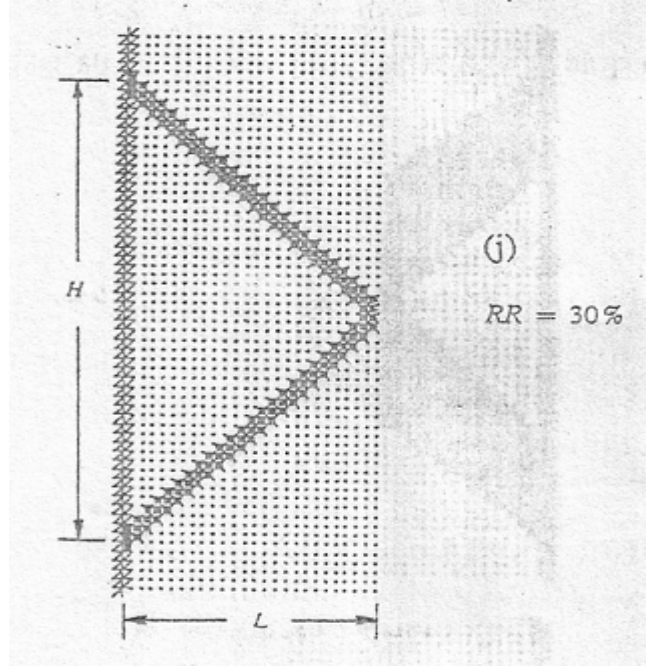
Gerilmenin uygulandığı iki eleman bu üniform gerilme halini bozmaktadır. Bu iki elemandaki gerilme ortalama gerilmenin iki katı değerindedir. Yüklemelerin uygulandığı elemanları ihmal edecek olursak, tam gerilmeli dizaynları elde etmiş oluruz. RR değeri %25 ile %40 arasına geldiği zaman yapıdan eleman çıkarma gerçekleşmez. %40 den sonra ise yükün uygulandığı bölgenin dışındaki tüm elemanlar yapıdan çıkartılır. Buradan üniform bir yapının elde edildiği anlaşılmaktadır.

Şekil 4.9’da dikkat çeken bir durum da, çıkarma oranının %20 ten 21’e yükseldiği noktadaki gerilme sıçramasıdır. Bu noktada gerilme 0,8957 değerinden 0,9659 değerine yükselmiştir. Buradaki ani artışın sebebi ise yapıda büyük miktarda eleman eksilmesi gerçekleşmiştir. Bu durum Şekil 4.8 de (f-g) görülmektedir.

Başlangıç modelinin gerilmesi ile optimum modelin gerilmesini karşılaştırdığımız zaman yaklaşık %12’lik bir artış (0,8603 değerinden 0,9606 değerine) görülmektedir. Aynı zamanda yapılar arasındaki hacim farkına bakıldığında da %98’lik bir azalma görülür. Hacimdeki bu büyüklükteki bir azalmanın gerilmedeki artışa göre çok daha önemli olduğu rahatlıkla söylenebilir. Böylelikle ESO yönteminin optimizasyon yöntemlerine kolaylık ve yeni bir yaklaşım getirdiğini açıkça ifade edilebilir. Şekil 4.11 de bu çalışmada kullanılan algoritma ile elde edilen sonuçlarla Xie ve Steven’in [12] sonuçlarının benzerliği görülebilir.



(a)



(b)

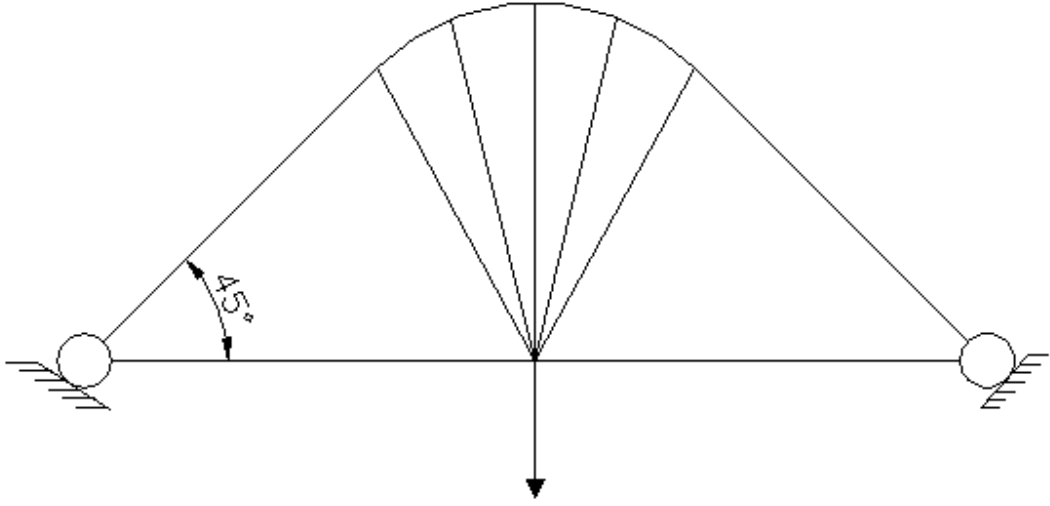
Şekil 4.11 Evolutionary Structural Optimization kitabında [3] elde edilen optimum dizayn (b) ve bu çalışmada elde edilen optimum dizaynın (a) karşılaştırılması

4.2. Michell Tipi Yapı Örneği

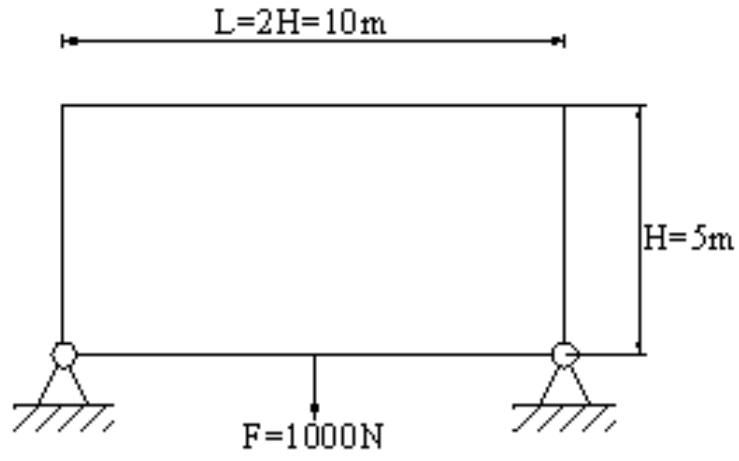
4.2.1 İki Ucu Sabit Mesnetli Michell Yapısı

Optimizasyon literatüründe kafes sistemlerin en az ağırlığı amaç fonksiyon alınarak yapılan ilk çözüm Avustralyalı mühendis ve matematikçi A.G.M. Michell'e aittir. Kendisi daha sonra bu çözüm için genel bir teorem üretmiştir [16].

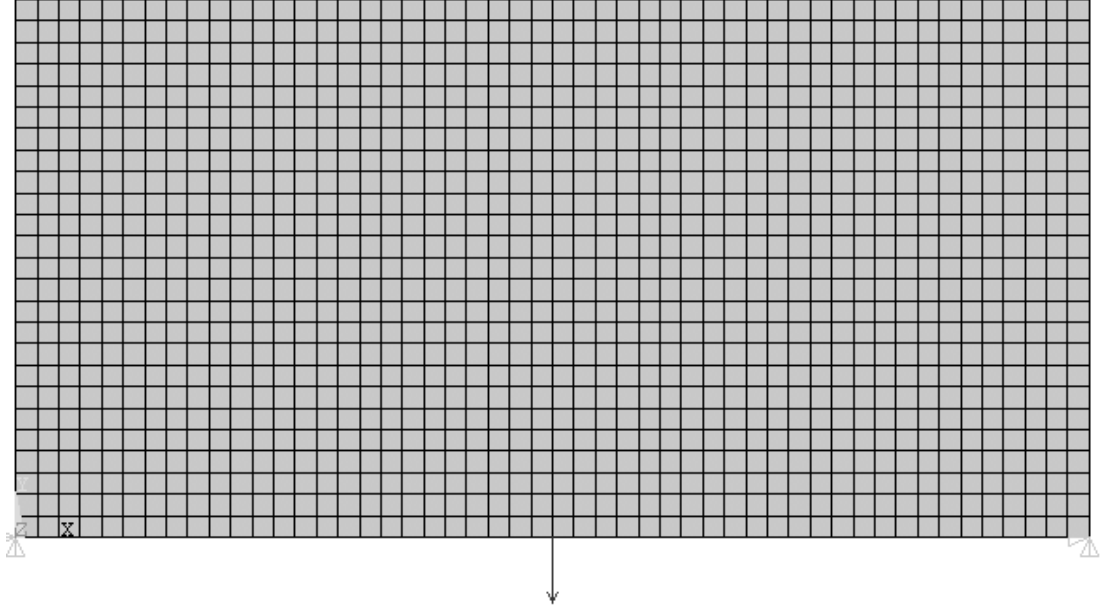
Şekil 4.12 de görülen sistem Michell yapılarından biridir. Bu sistem en az ağırlıklı kafes bir yapı olarak tasarlanmıştır. Ayrıca iki kenarından sabit mesnetli ve mesnetlerin ortasından düşey bir kuvvete maruz şekilde dizayn edilmiştir.



Şekil 4.12 Michell tipi yapı örneği.



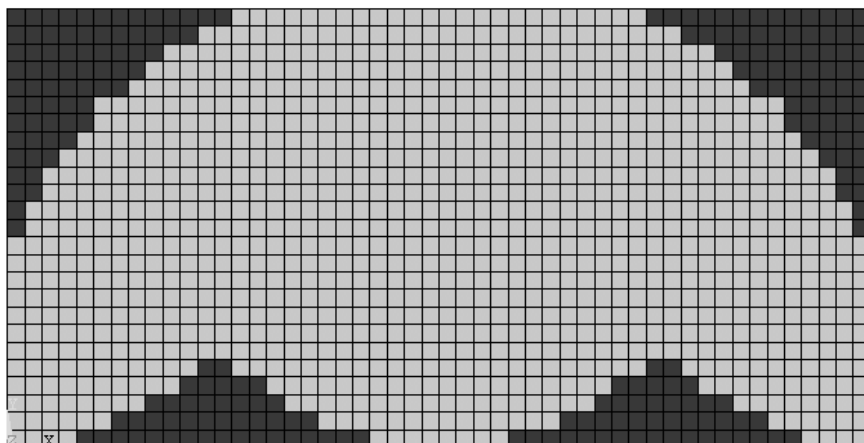
Şekil 4.13 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapı için dizayn alanı.



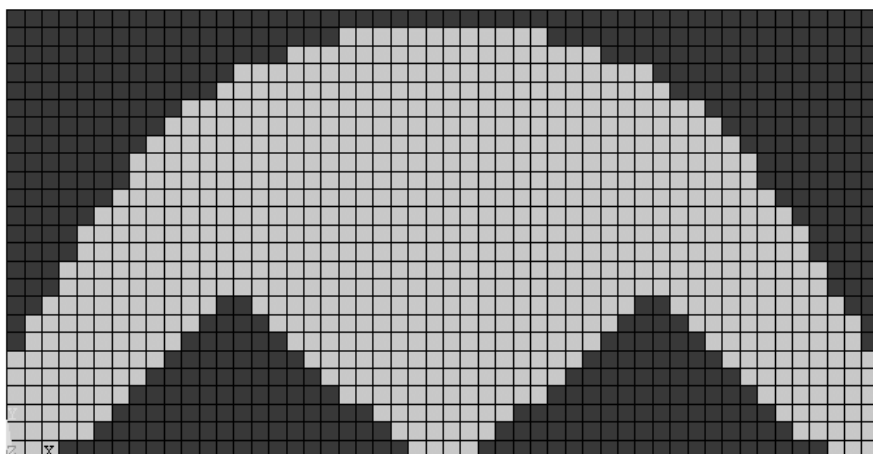
Şekil 4.14 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapı için sonlu eleman modellemesi.

Dizayn alanı olarak Şekil 4.13’de görülen $2H \times H$ ($H=5\text{m}$) boyutlarında bir sistem seçilmiştir. Sonlu eleman modellemesi kullanarak dizayn alanı 50×25 adet dört düğüm noktalı düzlem gerilme elemanlarına bölünmüştür (Şekil 4.14). Alt iki köşede düşey ve yatay hareketler sınırlandırılmıştır. Malzemenin Young modülü $E = 100\text{GPa}$ ve Poisson oranı $\nu = 0.3$ olarak alınmıştır. Plağın kalınlığı 0.1m kabul edilmiştir. Düşey F kuvveti ise 1000N ’dur.

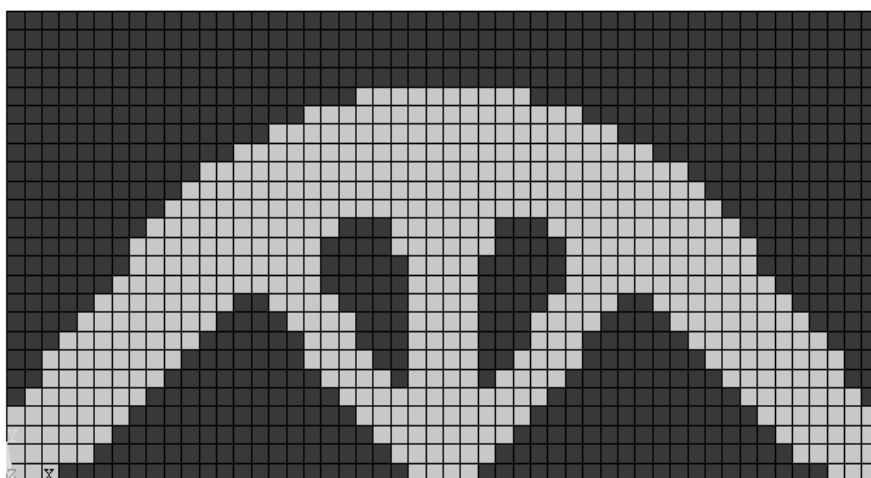
Bu örnekte de, iterasyon sayısı ve başlangıç çıkarma oranını sabit tutulmuştur. Bunun yanında evrimsel oran ER ise nihai çıkarma oranına göre değişim göstermiştir. Gelişim sürecinde kullanılan optimum yapılarda 50 iterasyon yapılmış ve başlangıç çıkarma oranı olarak $RR_0 = \%0.1$ alınarak Şekil 4.15(a-e) görülen optimum yapılar elde edilmiştir. ER ise $\%0.06$ (Şekil 4.15(a)) dan başlayıp $\%0.3$ ’e (Şekil 4.15(e)) kadar arttırılmıştır.



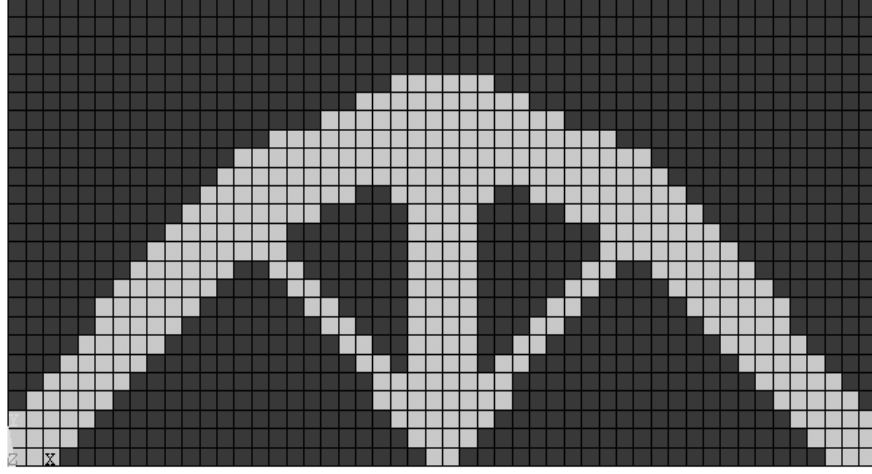
(a) $RR = \%3$



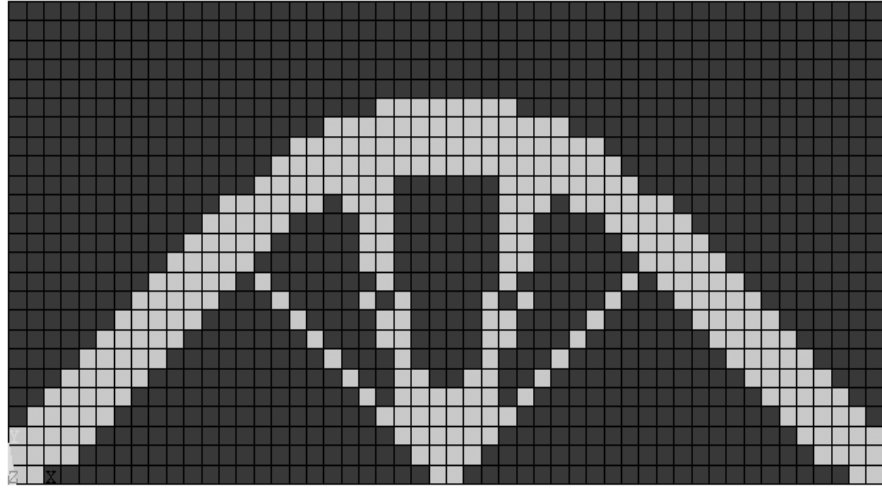
(b) $RR = \%6$



(c) $RR = \%9$



(e) $RR = \%12$



(f) $RR = \%15$

Şekil 4.15 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapı için ESO çözümü

Bir önceki iki-çubuklu çerçeve örneğine benzer olarak, bu modelinde hacminde çok büyük bir azalma meydana gelmiştir, bunun yanında ise von Mises gerilmesinde düşük bir artış gözlemlenmektedir. Şekil 4.14'daki dikdörtgen başlangıç modeli ve Şekil 4.15(e) de görülen optimum dizayn arasındaki hacim ve gerilme değerlerinin karşılaştırılması Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

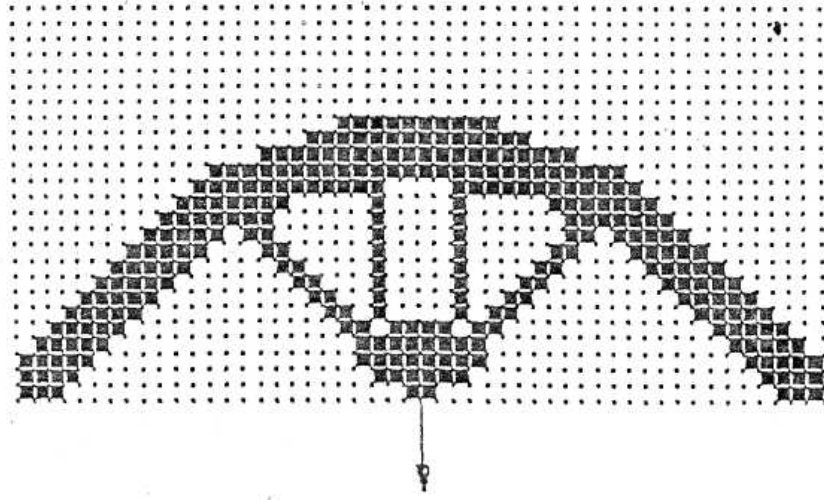
Tablo 4.3 Başlangıç modeli Şekil 4.14 ve optimum dizayn Şekil 4.15(e) arasında yapılan karşılaştırma

	σ_{min}^{vm} (kPa)	σ_{max}^{vm} (kPa)	$\sigma_{min}^{vm} / \sigma_{max}^{vm}$	Volume (m ³)
Başlangıç Modeli	0,0129	33,4805	0,0004	5,0000
Optimum Dizayn	4,2600	39,1500	0,1088	1,1920

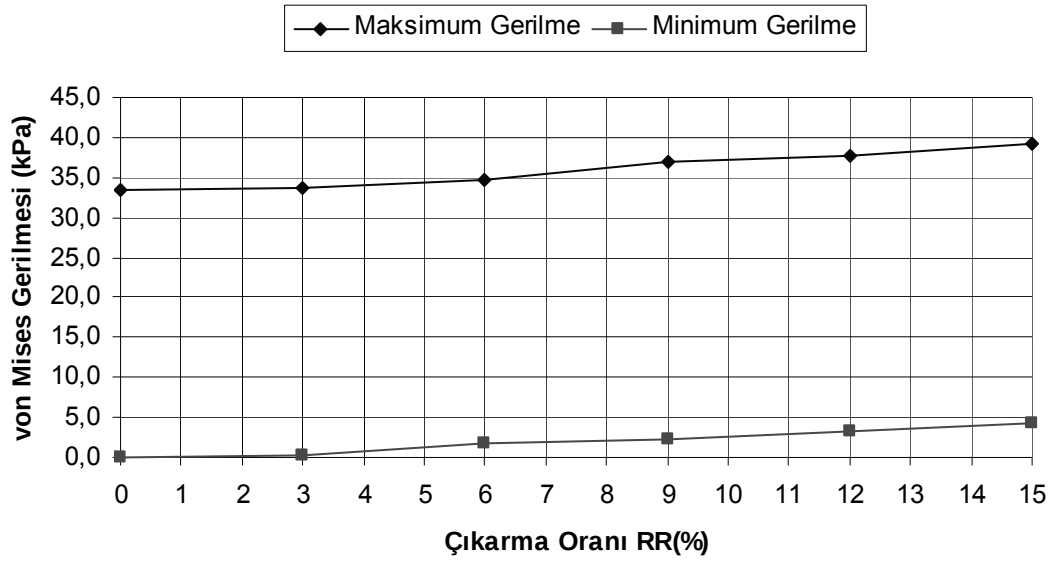
Orijinal Michell yapısı (Şekil 4.12) ile ESO sonucu elde edilen yapı (Şekil 4.15(e)) karşılaştırıldığı zaman çok büyük bir benzerlik görülebilir. İki yapı da bir kemer ve yükün uygulandığı nokta ile kemeri bağlayan birkaç çubuktan oluşmaktadır. Bir diğer önemli benzerlikte kemerlerin ayaklarının düşey doğrultuyla yaptığı açıdır. İki modelde de bu açı 45° değerindedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuç ile Xie ve Steven [1] da elde edilen sonuçların karşılaştırması için Şekil 4.15(e) ve Şekil 4.16'e bakıldığı zaman, yaklaşık olarak aynı şeklin elde edildiği görülebilir. Şekiller arasındaki çok küçük farklılıklar ise iterasyon sayısı, kullanılan algoritmalar, çıkartma oranları RR ve evrimsel oran ER gibi bazı değerlerin farklılıklarından meydana gelmektedir.

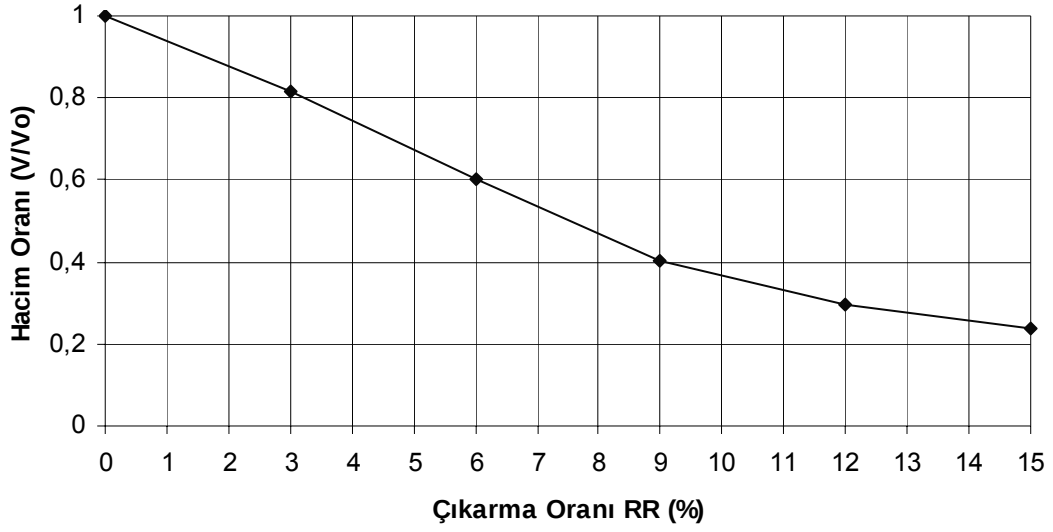
Belirli çıkarma oranları kullanılarak, optimum şekillerden elde edilen maksimum ve minimum von Mises gerilemeleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Çıkarma oranı ve hacim oranındaki değişim süreci de Şekil 4.18'de gösterilmiştir



Şekil 4.16 ESO kitabında [3] elde edilen optimum dizayn



Şekil 4.17 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapıdaki von Mises gerilmelerinin gelişim süreci

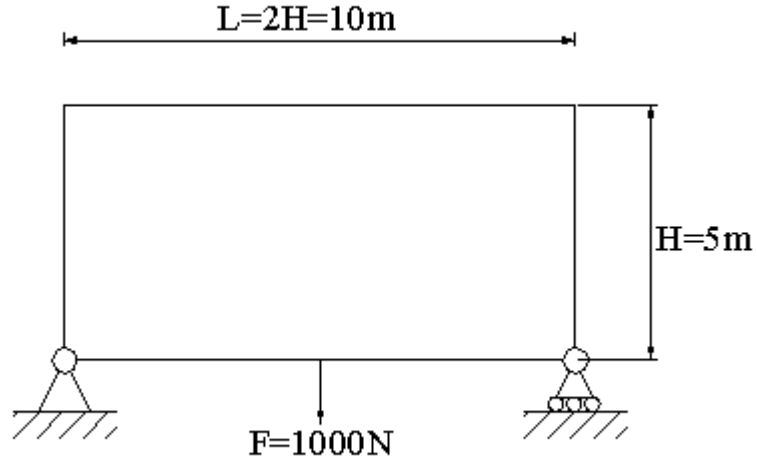


Şekil 4.18 İki ucu sabit mesnetli Michell tipi yapının hacmindeki değişim süreci

Michell çözümü ile ESO yönteminin arasındaki bu şekilsel benzerliklere rağmen elde edilen sonuçlarda önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıkların çok açık sebepleri bulunmaktadır. Bunların başında Michell çözümlerinin kafes sistem kabulü ile sonuca gitmesi bulunmaktadır. Bu kabule göre tüm elemanlar mafsallı birleşimlere sahip olmaktadır. Bunun yanında ESO yönteminde ise Şekil 4.14’da görüldüğü gibi sürekli eleman modellemesi kullanılmıştır. Diğer bir fark ise Şekil 4.12’de görüldüğü gibi Michell yapısında tüm elemanlar aynı kesite sahip olarak kabul edilmiştir. ESO yönteminde elde edilen sonuca bakılacak olursa (Şekil 15(e)) bileşenlerin kesitlerinin farklı olduğunu kolaylıkla görülebilir. ESO yönteminde eleman kesitlerin aynı boyutlarda olması gibi bir kısıtlama yoktur. Elde edilen sonuçlarda mevcut elemanların oluşturduğu kemerin boyutlarının, ara çubukların boyutlarından daha büyük olduğu görülür. Aslında verimlilik açısından bu istenilen bir durumdur.

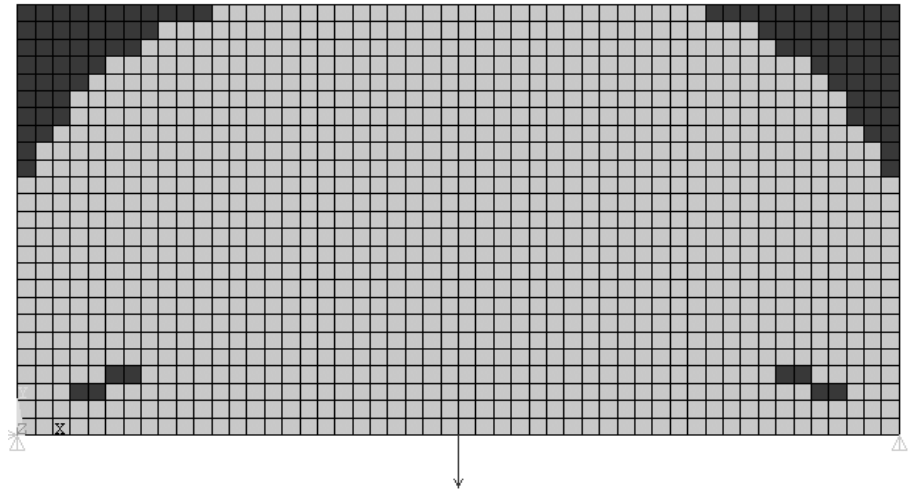
4.2.2 Bir Ucu Sabit Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı

Gerilme temelli ESO yönteminin işleyiş sürecini daha farklı örneklerle göstermek için, bir kısım değişikliklere uğramış Michell kirişi kullanılmıştır. Bu modelin iki köşesi sabit mesnetli olmayıp, bir ayağı kayıcı mesnet olarak dizayn edilmiştir (Şekil 4.19).

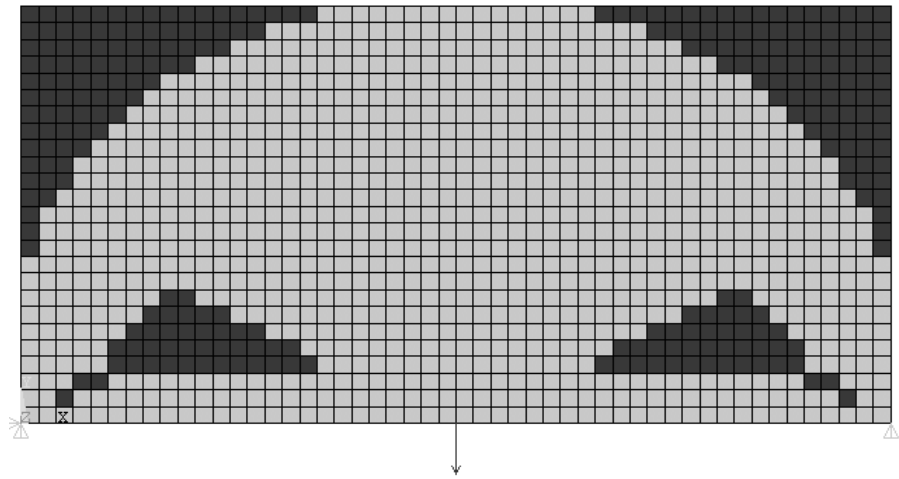


Şekil 4.19 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısının başlangıç dizayn alanı

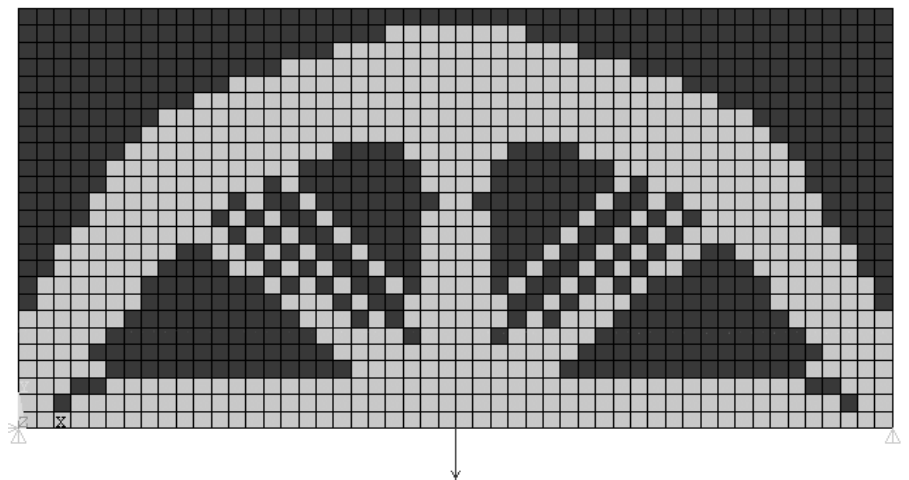
Bu örneğin mesnet koşulları hariç diğer tüm durumları ve parametreleri bir önceki Michell yapısı ile aynı alındığı zaman Şekil 4.20(a-e) de görülen farklı dizaynlar elde edilir. Bu şekillerden de anlaşılacağı gibi ESO yöntemi ortama uyum sağlamıştır. Böylelikle modelin sağ ayağındaki hareketliliği engellemek için yapının alt kısmında çekmeye çalışan ekstra bir çubuk (Şekil 4.20 (e)) oluşmuştur.



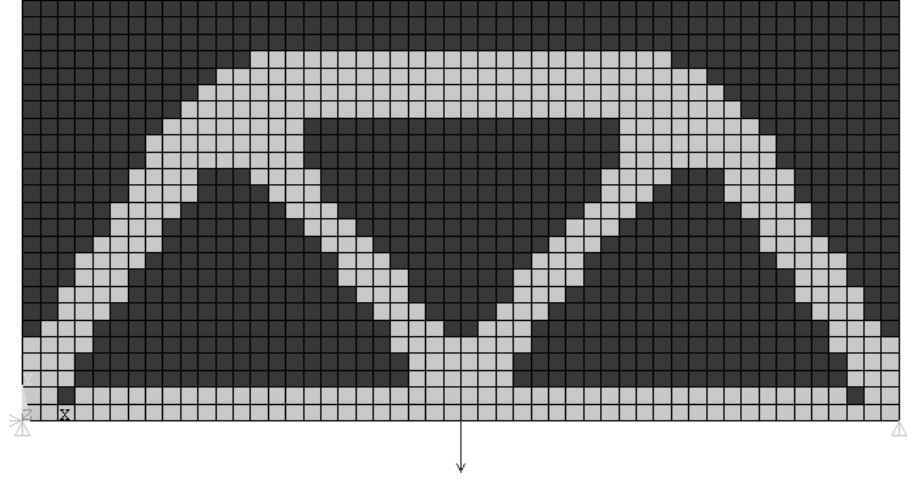
(a) $RR = \%3$



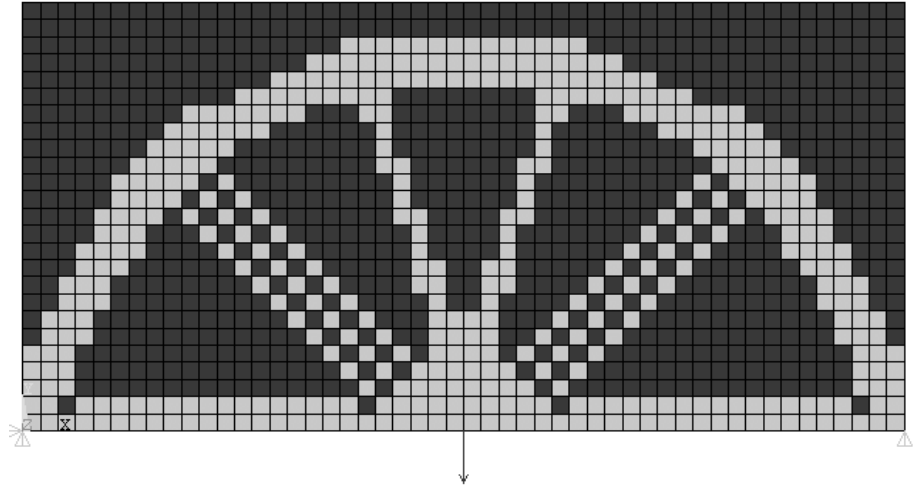
(b) $RR = \%6$



(c) $RR = \%9$



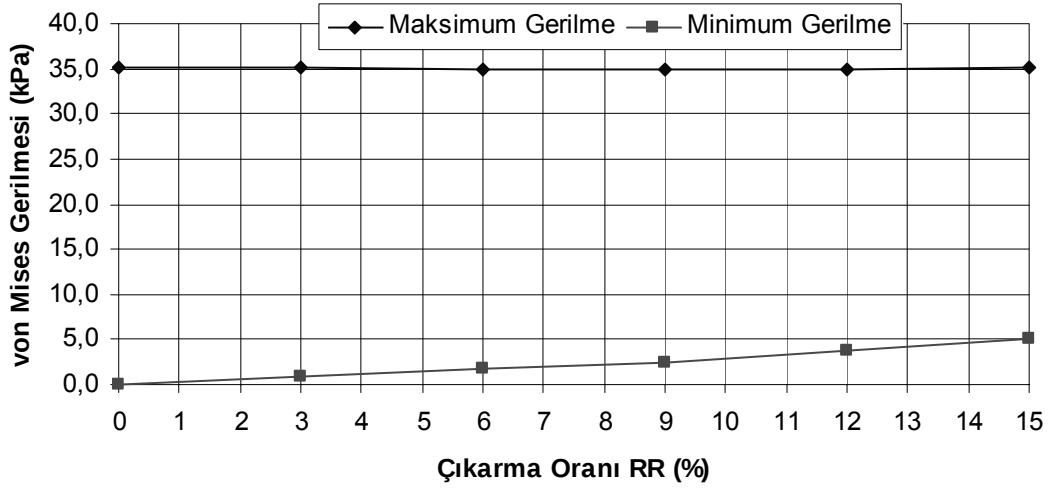
(d) $RR = \%12$



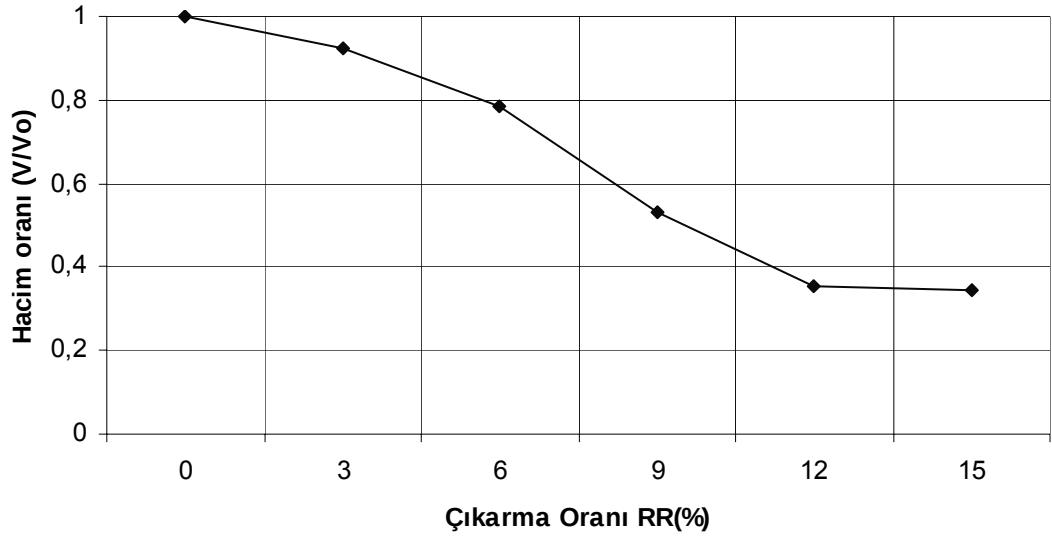
(e) $RR = \%15$

Şekil 4.20 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı için ESO Çözümü

Optimizasyon sürecindeki von Mises gerilmesinin değişim süreci Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Çıkarma oranının değişimiyle hacimde görülen azalmalar da Şekil 4.22’deki grafikte sunulmuştur. Başlangıç dizaynındaki gerilme ve hacim değerleri ile optimum dizayndaki değerleri karşılaştıracak olunursa Tablo 4-4’deki veriler elde edilir.



Şekil 4.21 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı için gerilme değişim süreci



Şekil 4.22 Bir Ucu Kayıcı Mesnetli Michell Yapısı için hacim oranı değişim süreci

Tablo 4.4 Başlangıç modeli şekil 4.19 ve optimum dizayn şekil 4.20(e) arasında yapılan karşılaştırma

	$\sigma_{\min}^{vm}$ (kPa)	$\sigma_{\max}^{vm}$ (kPa)	$\sigma_{\min}^{vm} / \sigma_{\max}^{vm}$	Volume (m ³)
Başlangıç Modeli	0,0129	35,1280	0,0004	5,0000
Optimum Dizayn	4,2600	35,1700	0,1088	1,1920

Gelişim sũreci incelediği zaman (şekil 4.21, Tablo 4-4) maksimum von Mises gerilmesinde değişiklik olmadığını, bunun yanında ise modelimin hacminde %76’lık bir azalma meydana geldiğini gũrũlmektedir.

5- SONUÇLAR

Bu çalışmadaki örneklerde ESO yönteminin en basit formu sunulup eleman çıkartma algoritması olarak yerel gerilme seviyeleri kullanılmıştır. Üniform gerilme seviyelerine sahip etkin dizaynlar elde etmenin, optimizasyon işlemlerinin amaçlarından biri olduğu söylenebilir. ESO yöntemi ile tüm yapıda veya yapının belirli bir bölgesinde bu amacı kolaylıkla elde edilebileceği gösterilmiştir.

Sonlu eleman yöntemleri gün geçtikçe gelişim göstermektedir. Bu gelişim optimizasyon yöntemlerine de yansımaktadır. Optimizasyon işlemleri genellikle iteratif süreçlerden oluşmaktadır. Bu tekrarlı işlemlerde sonlu eleman yöntemleri ile kolay bir şekilde gerilme analizleri gerçekleştirilmektedir.

Bir çok optimizasyon teknikleri sonlu eleman analizlerini temel almaktadır. ESO yönteminde ise sonlu eleman metodunun kullanılmasının yanı sıra, her iterasyon sonrası yeni sonlu eleman ağları oluşturulması gerekmemektedir [3]. Bu da ESO yöntemine çok büyük bir ayrıcalık sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Kirsch Uri, 1981, OPTIMUM STRUCTURAL DESIGN Concepts, Methods, and Applications, McGraw-Hill Book Company, New York,
2. Haftka T. Raphael, Gürdal Zafer, 1992, Elements of Structural Optimization, Kluwer Academic Publishers,
3. Xie Y.M. and Steven G.P., Evolutionary Structural Optimization, Springer (1997)
4. Arora Jasbir S., 1989, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill Book Company
5. K.I Majid, 1974 Optimum Design of Structures, Butterworth & Co., London,
6. M. Save, W. Prager, 1985, STRUCTURAL OPTIMIZATION Volume 1 Optimality Criteria, Plenum Press, New York and London
7. D.Nha Chu, Xie Y.M., Hira A., Steven G.P., “On various aspects of evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints”, Finite Elements in Analysis and Design, Vol.24 197-212 (1997)
8. Guan H., Chen Y.J, Loo Y.C, Xie Y.M, Steven G.P., “Bridge topology optimization with stress, displacement and frequency constraints”, Computers & Structures Vol.81 131-145 (2003)
9. Peter Thomas, Trees: Their Natural History, Cambridge University Press, (2000)
10. Claus Mattheck, Design in Nature: Learning from Trees, Springer (1998)
11. Xie Y.M. and Steven G.P., “A simple evolutionary procedure for structural optimization”, Computers & Structures, 4 885-896 (1993)
12. D.Nha Chu, Xie Y.M., Hira A., Steven G.P., “On various aspects of evolutionary structural optimization for problems with stiffness constraints”, Finite Elements in Analysis and Design, Vol.24 197-212 (1997)
13. Steven G.P., Li Q. and Xie Y.M., “Multicriteria optimization that minimizes maximum stress end maximizes stiffness”, Computers & Structures Vol.80 2433-2448 (2002)
14. Savaş. S., Ülker M., Saka M.P., “Evolutionary Topological Design of Three Dimensional Solid Structures”, CIVIL-COMP 03, The Ninth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, 2-4 September 2003, Egmond-and-Zee, The Netherlands.
15. ANSYS Release 8.0Help System, ANSYS Inc.
16. Michell A.G.M., “The limits of economy material in frame-structures”, Philos. Mag. Vol.8 589-597 (1904)

EK 1. İKİ ÇUBUKLU ÇERÇEVE ÖRNEĞİNİN ANSYS OPTİMİZASYON ALGORİTMASI KULLANILARAK ELDE EDİLEN AKIŞ DİYAGRAMI.

```
/FILNAM,tbf
```

```
L=1000
```

```
H=2400
```

```
A=100
```

```
/PREP7
```

```
ET,1,LINK1
```

```
R,1,A
```

```
MP,EX,1,2.1E5
```

```
N,1,0,0
```

```
N,2,L,H/2
```

```
N,3,0,H
```

```
EN,1,1,2
```

```
EN,2,2,3
```

```
EN,3,1,3
```

```
D,1,ALL,0,,3,2
```

```
F,2,FY,-20000 !N
```

```
FINISH
```

```
/SOLU
```

```
SOLVE
```

```
/POST1
```

```
SET, LAST
```

```
ETABLE, EVOL, VOLU
```

```
SSUM
```

```
*GET, VTOT, SSUM, , ITEM, EVOL
```

ESEL,S,REAL,,1
ETABLE,ELS,LS,1
ESORT,ETAB,ELS,1,1
*GET,ELSMIN,SORT,,MIN
*GET,ELSMAX,SORT,,MAX
ESEL,ALL,ALL
EPLOT

LGWRITE,tbf,lgw,,COMMENT
FINISH

/OPT
OPANL,tbf,lgw
OPVAR,H,DV,100,2000,0.00001
OPVAR,L,DV,100,2000,0.00001
OPVAR,ELSMIN,SV,0,2,0.00001
OPVAR,ELSMAX,SV,10,144,0.00001
OPSAVE,tbf,opt
OPVAR,VTOT,OBJ
OPTYPE,FIRST
OPFRST,50
OPEXE
OPLIST,ALL

EK 2. İKİ ÇUBUKLU ÇERÇEVE ÖRNEĞİNİN ESO YÖNTEMİYLE ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN AKIŞ DİYAGRAMI

/CLEAR

F1=0.01

/GRAPHICS

/PREP7

*DIM,RRT,,1500

*DIM,RRP,,1500

*DIM,SMAX1,,75

*DIM,SMAX3,,75

*DIM,MK,,1500

*DIM,PRES1,,1500

*DIM,TENS1,,1500

ANTYPE,STATIC

ET,1,PLANE42,,3

MP,EX,1,1E5

MP,NUXY,1,0.3

MP,EX,2,1E-2

R,1,1

MAT,1

REAL,1

TYPE,1

N,1,0,0,0

NGEN,26,1,1,1,1,400,,,
NGEN,61,26,1,26,1,,400,
EN,1,1,2,28,27
ENGEN,1,25,1,1,
ENGEN,25,60,26,1,25
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,0,24000
D,ALL,ALL
NSEL,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,X,10000
NSEL,R,LOC,Y,12000
F,ALL,FY,-400
NSEL,ALL,ALL
ESEL,ALL,ALL
FINISH

*CREATE,MAC1
E0=1
/SOLU
*DO,E0,1,1500
*IF,MK(E0),EQ,2,THEN
MPCHG,2,E0
*ENDIF
*ENDDO
ANTYPE,STATIC
SOLVE
*END

*CREATE,MAC2
/POST1
ESEL,ALL,ALL
ETABLE,STORE1,S,1
ESORT,ETAB,STORE1,0
*GET,SMAX1(I),SORT,,MAX
ESEL,ALL,ALL

ETABLE,STORE3,S,3
ESORT,ETAB,STORE3,0,1
*GET,SMAX3(I),SORT,,MAX
ESEL,ALL,ALL
ETABLE,STORE1,S,1
ETABLE,STORE3,S,3

*DO,E0,1,1500,1

MK(E0)=0
*GET,PRES1(E0),ELEM,E0,ETAB,STORE1
*GET,TENS1(E0),ELEM,E0,ETAB,STORE3
RRP(E0)=PRES1(E0)/SMAX1(I)
RRT(E0)=TENS1(E0)/SMAX3(I)
*IF,RRP(E0),LT,F1,THEN
*IF,RRT(E0),LT,F1,THEN
MK(E0)=2
*ENDIF
*ENDIF

*ENDDO
ESEL,ALL,ALL
*END

/PREP7
*DO,I,1,1,1
*USE,MAC1
*USE,MAC2
F1=F1+0.0025
*ENDDO
FINISH

EK 3. İKİ UCU SABİT MESNETLİ MICHELL KİRİŞİNİN ESO YÖNTEMİYLE ÇÖZÜMÜNDE KULLANILAN AKIŞ DİYAGRAMI

/CLEAR

F1=0.01

/GRAPHICS

/PREP7

*DIM,RRT,,1250

*DIM,RRP,,1250

*DIM,SMAX1,,50

*DIM,SMAX3,,50

*DIM,MK,,1250

*DIM,PRES1,,1250

*DIM,TENS1,,1250

ANTYPE,STATIC

ET,1,PLANE42,,,3

MP,EX,1,1E5

MP,NUXY,1,0.3

MP,EX,2,1E-4

R,1,100

MAT,1

REAL,1

TYPE,1

N,1,0,0,0

NGEN,51,1,1,1,1,200,,,

NGEN,26,51,1,51,1,,200,

EN,1,1,2,53,52

ENGEN,1,50,1,1
ENGEN,50,25,51,1,50
NSEL,S,LOC,X,5000
NSEL,R,LOC,Y,0
F,ALL,FY,-1000
NSEL,ALL,ALL
ESEL,ALL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0
NSEL,R,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,X,10000
NSEL,R,LOC,Y,0
D,ALL,UY
D,ALL,UX
NSEL,ALL,ALL
ESEL,ALL,ALL
FINISH

*CREATE,MAC1
E0=1
/SOLU
*DO,E0,1,1250
*IF,MK(E0),EQ,2,THEN
MPCHG,2,E0
*ENDIF
*ENDDO
ANTYPE,STATIC
SOLVE
*END

*CREATE,MAC2
/POST1
ESEL,ALL,ALL
ESEL,U,ELEM,,25
ESEL,U,ELEM,,26
ETABLE,STORE1,S,1

```

ESORT,ETAB,STORE1,0
*GET,SMAX1(I),SORT,,MAX
ESEL,ALL,ALL
ESEL,U,ELEM,,1
ESEL,U,ELEM,,50
ETABLE,STORE3,S,3
ESORT,ETAB,STORE3,0,1
*GET,SMAX3(I),SORT,,MAX
ESEL,ALL,ALL
ETABLE,STORE1,S,1
ETABLE,STORE3,S,3

*DO,E0,1,1250,1
MK(E0)=0
*GET,PRES1(E0),ELEM,E0,ETAB,STORE1
*GET,TENS1(E0),ELEM,E0,ETAB,STORE3
RRP(E0)=PRES1(E0)/SMAX1(I)
RRT(E0)=TENS1(E0)/SMAX3(I)
*IF,RRP(E0),LT,F1,THEN
*IF,RRT(E0),LT,F1,THEN
MK(E0)=2
*ENDIF
*ENDIF

*ENDDO
ESEL,ALL,ALL
*END

/PREP7
*DO,I,1,50,1
*USE,MAC1
*USE,MAC2
F1=F1+0.0068
*ENDDO
FINISH

```