

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SONLU ELEMAN MODELİ GÜNCELLEMESİ TEKNİĞİNDE  
BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI KULLANILARAK  
MEKANİK SİSTEMLERDE HASAR TESPİTİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Yılmaz AVCI**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ**

**HAZİRAN 2008**

**SONLU ELEMEN MODELİ GÜNCELLEMESİ TEKNİĞİNDE  
BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI KULLANILARAK  
MEKANİK SİSTEMLERDE HASAR TESPİTİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Yılmaz AVCI  
(501051127)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008  
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Pelin Gündeş BAKIR  
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Hasan BODUROĞLU (İ.T.Ü)  
Prof.Dr. Faruk YÜKSELER (Y.T.Ü.)**

**HAZİRAN 2008**

## **ÖNSÖZ**

Bu çalışmada, sonlu eleman modeli güncelleme tekniğinde benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak basit bir kırıta hasar tespiti yapılmıştır.

Bu tezin hazırlanması esnasında zamanını, kıymetli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen saygı değer hocam Doç. Dr. Pelin GÜNDEŞ BAKIR'a, bana öğrenmeyi ve araştırmayı öğreten diğer tüm hocalarıma, çalışmam sırasında benden desteklerini esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma, özellikle Yıldırım Serhat ERDOĞAN'a ve bu çalışmada katkısı olan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2008

Yılmaz AVCI

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>x</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar	3
<b>2. OPTİMİZASYON ve TEMEL KAVRAMLAR</b>	<b>7</b>
2.1. Giriş	7
2.2. Bölgesel Minimum, Global Minimum ve Uygulanabilir Bölge	8
2.3. Arama Yöntemleri	9
2.4. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması	11
2.5. Optimizasyon Metotlarının Sınıflandırılması	12
<b>3. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI</b>	<b>14</b>
3.1. Giriş	14
3.2. Fiziksel Tavlama Süreci	15
3.3. Probleme Özel Seçenekler	18
3.4. Algoritmanın Kendisine Ait Genel Seçenekler	18
3.4.1. Teorik Soğutma Stratejileri	19
3.4.2. Basit Soğutma Stratejileri	20
<b>4. SONLU ELEMAN MODELİ GÜNCELLEMESİ ve HASAR TESPİTİ</b>	<b>23</b>
4.1. Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi	23
4.1.1. Giriş	23
4.1.2. Amaç Fonksiyonu	24
4.1.3. Güncelleme Parametreleri	25
4.1.4. Modal Güvence Ölçütü (MAC)	26
4.1.5. BT Algoritmasının Sonlu Eleman Güncellenmesine Uygulanması	28
4.2. Hasar Tespiti	31
<b>5. SAYISAL UYGULAMALAR</b>	<b>34</b>
5.1. Giriş	34
5.2. Kirişin Geometrik ve Malzeme Özellikleri	35
5.3. Yayılı Hasarlı Kirişte Güncelleme	35
5.3.1. Yayılı Hasarlı Kirişte Hafif Hasar	35

5.3.2. Yayılı Hasarlı Kirişte Orta Hasar	38
5.3.3. Yayılı Hasarlı Kirişte Ağır Hasar	40
<b>6. SONUÇLAR</b>	<b>43</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>45</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>52</b>

## **KISALTMALAR**

<b>FRF</b>	: Frekans Cevap Fonksiyonu
<b>BT</b>	: Benzetilmiş Tavlama
<b>MAC</b>	: Modal Güvence Ölçütü
<b>MSF</b>	: Modal Ölçek Faktörü

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 3.1</b> Tavlama süreci ve optimizasyon problemi arasındaki ilişki.....	17

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Bölgesel minimum ve global minimum kavramları.....	9
Şekil 2.2 : (a) Sürekli araştırma uzayı (b) Ayrık araştırma uzayı .....	12
Şekil 3.1 : Isıl işlem kademeleri .....	15
Şekil 3.2 : Basamak tipte sıcaklık düşürülmesi .....	20
Şekil 3.3 : Sürekli olarak sıcaklığın düşürülmesi .....	21
Şekil 3.4 : Monoton olmayan şekilde sıcaklığın düşürülmesi .....	21
Şekil 4.1 : Benzetilmiş tavlama algoritması .....	29
Şekil 5.1 : Kiriş sonlu eleman modeli .....	35
Şekil 5.2 : Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumu .....	35
Şekil 5.3 : Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumunda ilk 8 mod için MAC değerleri .....	36
Şekil 5.4 : Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumunda ilk10 doğal frekansın göreceli farkları .....	36
Şekil 5.5 : Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumunda düzeltme katsayıları	37
Şekil 5.6 : Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumu .....	38
Şekil 5.7 : Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda ilk 8 mod için MAC değerleri .....	38
Şekil 5.8 : Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda ilk10 doğal frekansın göreceli farkları .....	39
Şekil 5.9 : Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda düzeltme katsayıları	39
Şekil 5.10 : Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumu .....	40
Şekil 5.11 : Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda ilk 8 mod için MAC değerleri .....	40
Şekil 5.12 : Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda ilk10 doğal frekansın göreceli farkları .....	41
Şekil 5.13 : Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda düzeltme katsayıları	41

## SEMBOL LİSTESİ

$f(x)$	: Minimize edilecek amaç fonksiyonu
$x_1, x_2, \dots, x_n$	: Optimum çözüm vektörü
$y(x)$	: Fonksiyon
<b>A, B</b>	: Doğrusal fonksiyon değişkenleri
$e(x), \log(x), x^n$	: Doğrusal olmayan fonksiyon değişkenleri
<b>E</b>	: Sitem enerjisi
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>k</b>	: Boltzmann sabiti
$\delta$	: (0,1) aralığında rastgele bir sayı
$e$	: Euler sayısı
$\Delta E$	: Enerji seviyeleri arasındaki fark
<b>S</b>	: Başlangıç çözümü
<b>S'</b>	: Yeni çözüm
<b>r</b>	: Sıcaklık azaltma sabiti
<b>L</b>	: Markov zincir uzunluğu
$z_j(x)$	: Sayısal modal parametreler
$\tilde{z}_j$	: Deneysel modal parametreler
$r_j(x)$	: Artık vektörü
$r_f(x)$	: Doğal frekans artıkları
$r_s(x)$	: Mod şekli artıkları
$w_j(x)$	: Sayısal doğal frekanslar
$\tilde{w}_j$	: Deneysel doğal frekanslar
$m_f$	: Güncelleme işleminde kullanılacak frekans sayısı
$r_s(x)$	: Mod şekilleri arasındaki fark
$\phi_j^l(x)$	: Sayısal mod şekli
$\phi_j^r(x)$	: Sayısal mod şekillerinde maksimum deplasman
$\tilde{\phi}_j^l$	: Deneysel mod şekilleri
$\tilde{\phi}_j^r$	: Deneysel mod şekillerinde maksimum deplasman
$m_s$	: Güncelleme işleminde kullanılacak mod şekillerinin sayısı
$a_x$	: Düzeltme katsayıları
<b>X</b>	: Güncellenmiş fiziksel büyüklükler
<b>X<sub>ref</sub></b>	: Referans fiziksel büyüklükler
<b>E</b>	: Güncellenmiş durumdaki elastisite modülü
<b>E<sub>ref</sub></b>	: Başlangıç durumdaki elastisite modülü
$\Phi_s$	: Sayısal mod şekilleri
$\Phi_d$	: Deneysel mod şekilleri
<b>T<sub>b</sub></b>	: Başlangıç sıcaklığı

$P_b$	: Başlangıç kabul olasılığı
$P_s$	: Son kabul olasılığı
$\alpha$	: Soğutma oranı
$N_k$	: Her sıcaklıkta üretilecek çözümlerin sayısı
$C_{te}$	: Sabit sayı
$E$	: Elastisite modülü
$G$	: Kayma Modülü
$\mu$	: Poission oranı
$\rho$	: Birim ağırlık
$\lambda$	: Algoritmada kullanılan soğutma oranı
$n_{iter}$	: Algoritmada kullanılan her sıcaklıktaki iterasyon sayısı

## SONLU ELEMAN MODELİ GÜNCELLEMESİ TEKNİĞİNDE BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI KULLANILARAK MEKANİK SİSTEMLERDE HASAR TESPİTİ

### ÖZET

Son yıllarda hasar belirleme için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de sonlu eleman modeli güncelleme yöntemidir. Sonlu eleman modeli güncelleme yöntemi, yapıların titreşimlerinin izlenmesi suretiyle gerçek yapıda elde edilen modal parametreler ile yapının sonlu eleman modelinden elde edilen modal parametreler arasındaki korelasyonu artırmak amacıyla kullanılır.

Sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemi bir optimizasyon süreci olarak düşünülebilir. Sonlu eleman modeli güncellemesinde, deneysel ve sayısal doğal frekans ve mod şekli farklarının yer aldığı en küçük kareler problemi şeklinde ifade edilen bir uygunluk fonksiyonu minimize edilir. Bunun için sağlam ve güvenilir bir optimizasyon algoritması kullanılmalıdır. Bu çalışmada uygunluk fonksiyonunu minimize etmek için global optimizasyon tekniklerinden benzetilmiş tavlama algoritması kullanılmıştır.

Benzetilmiş tavlama, kısıtsız bir optimizasyon tekniğidir. Optimizasyon problemi çözümünde benzetilmiş tavlama algoritmasının kullanılması, optimal bir çözüm bulma ile katıların tavlama prosedüründe düşük enerji seviyesinin bulunması arasındaki benzerliğe bağlı olarak geliştirilmiştir. Optimizasyon problemi ve tavlama işlemi arasındaki benzerlikte, katının durumları optimizasyon probleminin mümkün olan çözümlerini temsil eder ve bu durumların enerjileri, çözümler için hesaplanan amaç fonksiyon değerlerine karşılık gelir. Minimum enerji durumu problem için optimal çözümü ifade eder, hızlı soğutma işlemi ise yerel optimum olarak düşünülebilir.

Bu tez çalışmasında global optimizasyon metotlarından benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemiyle bir kirişte hasar yerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Benzetilmiş tavlama, hasar tespiti, optimizasyon, sonlu eleman modeli güncellemesi

# **DAMAGE DETECTION OF MECHANICAL SYSTEMS IN FINITE ELEMENT MODEL UPDATING METHOD USING SIMULATED ANNEALING ALGORITHM**

## **SUMMARY**

In recent years, many techniques have been developed for structural damage detection. One of these methods is finite element model updating method. Finite element model updating method procedure aims to adjust the uncertain properties of the finite element model by minimising iteratively the differences between the measured modal parameters and the corresponding analytical predictions.

Finite element model updating method may be considered as an optimization process. In finite element model updating, an objective function is minimized which contains differences between experimental and numerical natural frequencies and mode shapes. Robust and reliable optimization algorithms must be used for this problem. In this study, simulated annealing which is a global optimization technique is used to minimize the objective function.

Simulated annealing is an unconstrained optimization technique. Simulated annealing algorithms which are used in the solution of the optimization problem have been developed based on an analogy between the annealing of solids to find the lowest energy level that corresponds to the optimal solution. In the analogy between the optimization problem and the annealing process, the states of the solid represent possible solutions of the optimization problem and the energies of these states correspond to the objective function values which are calculated for solutions. Minimum energy state defines an optimal solution for the problem and the rapid cooling process is considered as a local optimum.

In this study, the global optimization technique; simulated annealing is used for the finite element model updating technique in order to detect the damage of a beam.

**Keywords:** Simulated annealing, damage detection, optimization, finite element model updating

## 1. GİRİŞ

Optimizasyon kelime anlamı olarak "iyileştirme", "daha iyi yapma" olarak tanımlanabilir. Optimize edilmesi gereken ise verilen kısıtlamaları sağlayacak şekilde parametre değerlerinin bulunmasıdır (Pham ve Karaboga, 2000). Problemin parametre değerleri bulunurken mümkün olan en iyi çözümü, makul bir süre içerisinde bulmak hedeflenmektedir.

Birçok yapı tasarımı uygulaması optimizasyon problemi olarak formüle edilebilir. Yoğun araştırmalar sonucu çok sayıda optimizasyon tekniği geliştirilmiş olmasına rağmen, bu çalışmaların ancak küçük bir kısmı pratik uygulamalara aktarılmıştır. Pratik uygulama eksikliğinin ana nedeni eldeki kesit alanlarının belirli kısıtlar içinde herhangi bir değer alabilmesi esasına dayalı olmasındandır. Buna karşın, gerçek tasarım problemleri tasarım değişkenlerinin standart kesit grupları içinden seçilmesini gerektirmektedir.

Yapısal sistemlerin özellikle büyük sistemlerin doğru analitik modellerinin geliştirilmesi mühendislik analizinin temel gereksinimlerindedir. Bir yapının doğru olarak modellenebilmesi için analitik model sonuçlarının test ölçümleri ile karşılaştırılması çok sık olarak kullanılır. Deneyle elde edilmiş titreşim parametreleri ile sonlu eleman modelinden elde edilen dinamik parametrelerin birbirleriyle uyumlu hale getirilerek doğrulanmasına sonlu eleman modeli güncellemesi denir. Sonlu eleman modeli güncellemesi bir optimizasyon süreci olarak düşünülebilir. Sonlu eleman modeli güncellemesinde, deneysel ve sayısal doğal frekans ve mod şekli farklarının yer aldığı en küçük kareler problemi şeklinde ifade edilen bir uygunluk fonksiyonu minimize edilir. Bunun için sağlam ve güvenilir bir optimizasyon algoritması kullanılmalıdır.

Yapısal optimizasyon, bir yapının en iyi performansına ulaşmayı amaçlayan mühendislik, matematik, fen ve teknoloji alanlarının birleşmesidir. Bu yapı bir köprü, bir uzay aracı veya değişik bir çerçeve sistemli yapı olabilir. Optimum tasarım

sürecinde tasarım değişkenlerinin, minimize edilecek amaç fonksiyonunun ve yapının kısıtlayıcılarının tasarımcı tarafından başlangıçta belirlenmesi gerekir (Arora, 1989). Yapının bulunduğu yerde, istenmeyen durumlar dahil tüm çevresel etkenlerin hesaba katılması gerekir (Xie ve Steven, 1997).

Optimizasyon tekniklerini yerel ve global olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Tasarım kümesini yeterli derecede araştırmaksızın lokal bir optimuma yakınsamaları, başlangıç çözümüne fazlasıyla bağımlı olmaları, ayırık ve karma tasarım değişkenlerini ele alabilme yeteneğinden yoksun olmaları, yerel optimizasyon yöntemlerinin en önemli eksikliklerindedir (Pham ve Karaboga, 2000). Son zamanlarda diğer global optimizasyon teknikleri ile birlikte benzetilmiş tavlama algoritması ve genetik algoritmalar bu eksikliklerin üstesinden gelebilecek güçlü ve modern teknikler olarak ortaya çıkmışlardır. Bu yöntemler, yerel optimizasyon yöntemlerine göre global minimumu bulma açısından daha sağlamdırlar ve rastgele seçilen başlangıç değişkenlerinin sonuca etkisi çok azdır. Bu tekniklerin temelinde yatan kavramlar dolayısıyla onların algoritmik modelleri, optimizasyon ile doğada yer alan olaylar arasındaki benzerliklerin saptanmasıyla kurulmuştur. Benzetilmiş tavlama algoritması termodinamikteki soğuma sürecinden, genetik algoritmalar ise doğal evrimden ilham almıştır. Benzetilmiş tavlama algoritması ve genetik algoritmalar son yıllarda, sonlu eleman modeli güncellemesinde yapısal hasarı belirlemek için kullanılan yaygın yöntemler olarak ortaya çıkmışlardır.

## **1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu çalışmanın amacı, global optimizasyon tekniklerinden benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemiyle basit bir kirişte hasar tespiti çalışması yapmaktır. Doğal frekanslar ve mod şekilleri yapının rijitliği ile direkt olarak ilgilidir. Bu sebeple doğal frekanslar veya mod şekillerindeki bir azalma, rijitlikte bir kayıp oluştuğunun dolayısıyla yapının elemanlarında bir hasar olduğunun göstergesidir. Hasar yerini tespit etmek için burada deneysel frekans ve mod şekilleri ile sayısal frekans ve mod şekilleri arasındaki fark, bir amaç fonksiyonu olarak düzenlenmiş ve benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak bu amaç fonksiyonu minimize edilmiştir.

Bu çalışmada benzetilmiş tavlama algoritmasının sonlu eleman modeli güncellemesinde ne kadar başarılı olduğu, düzgün yayılı hasar senaryosu dikkate alınarak incelenmiştir. Düzgün yayılı hasar senaryosu için hafif, orta ve ağır hasar olmak üzere üç hasar durumu incelenmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde, çalışmanın amaç ve kapsamını içeren kısa bir giriş ve konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

İkinci bölümde benzetilmiş tavlama algoritmasının bir global optimizasyon tekniği olması sebebiyle, optimizasyon ve optimizasyonla ilgili temel kavramlar anlatılmıştır. Bölgesel minimum, global minimum ve uygulanabilir bölge kavramları açıklanmış; arama yöntemleri, optimizasyon problemlerinin ve optimizasyon metotlarının sınıflandırılması ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde benzetilmiş tavlama algoritması ile ilgili bilgiler verilmiş; fiziksel tavlama süreci, probleme özel seçenekler, algoritmanın kendisine ait genel seçeneklerden, teorik ve basit soğutma stratejilerinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde sonlu eleman modeli güncellemesi ve hasar tespiti ile ilgili bilgiler verilmiş ve benzetilmiş tavlama algoritmasının sonlu eleman modeli güncellemesinde nasıl kullanılacağı anlatılmıştır.

Beşinci bölümde düzgün yayılı hasar senaryosuna göre basit bir kırışte, benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemiyle hasar tespiti çalışması yapılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde elde edilen bilgiler toparlanmış ve ulaşılan sonuçlar açıklanmıştır.

## **1.2 Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar**

Yapısal sistemlerin; özellikle büyük sistemlerin doğru analitik modellerinin geliştirilmesi mühendislik analizinin temel gereksinimlerindedir. Modelin doğru ölçülmesi için analitik model sonuçlarının test ölçümleri ile karşılaştırılması çok sık olarak kullanılır. Analitik model sonucu ortaya çıkan dinamik parametreler (doğal

frekanslar, mod şekilleri vb.) test sonuçları ile tam olarak örtüşmez, bu sebeple analitik model ile deneysel sonuçları uyarlamak için tekrarlı bir döngüye ihtiyaç vardır. Sonlu eleman modelinden elde edilen dinamik verilerin, deneylerden elde edilmiş titreşim parametrelerine uyumlu hale gelinceye kadar iteratif bir biçimde doğrulanmasına sonlu eleman modeli güncellemesi denir.

Son yıllarda sonlu eleman modeli güncellemesi, sonlu eleman modeli ile ölçüm verileri arasındaki korelasyonu geliştiren bir yöntem olarak çok sık kullanılmaya başlanmıştır (Mottershead ve Friswell, 1993; Friswell ve Mottershead, 1995). Bunların birçoğu sonlu eleman güncellemesini bir optimizasyon süreci olarak görmüştür. Bu metotları, analitik matrisi doğrudan uyarlayan direkt metotlar ve analitik model parametrelerini iteratif olarak doğrulayan parametrik (iteratif) metotlar olarak iki grupta sınıflandırabiliriz. Direkt güncelleme algoritmalarının geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan, Baruch ve Itzhack (1979), Berman ve Nagy (1983), Caesar ve Peter (1987), Wei (1990) sadece rijitlik matrisini güncellediler. Diğerleri ise ölçülmüş modal verileri referans alarak, kütle ve rijitlik matrislerini (Wei (1990), Friswell (1998)) veya sönüm ve rijitlik matrisini aynı zamanda güncellediler (Friswell, 1998). Bütün bu bahsedilen metotlar modal alanda tanımlı bir amaç fonksiyonu kullanırlar.

İteratif metotlar model güncellemenin değişik metodolojilerini kullanırlar. Lin ve Ewins (1994) tamamlanmamış veya limitli ölçülmüş frekans tepki fonksiyon (FRF) verilerinin düzenlenmesinin direkt olarak nasıl kullanılacağını araştırdılar ve FRF veri kullanımının, analitik modeli güncellemedeki avantajlarını gösterdiler. Lin (1995) geliştirilmiş ters öz duyarlılık metodunu sundu ve bunun düzlem kafes yapıların, sonlu eleman modeli üzerindeki etkileri üzerine çalışmalar yaptı. Bazı yeni yaklaşımlar modal güncelleme optimizasyon problemlerinde en iyi çözümü bulmak için stokastik arama tekniklerine uygulandı. Ayrıca son zamanlarda, yapılardaki hasar yerinin belirlenmesi için, analitik sonlu eleman modelindeki güncelleme parametrelerine istatistiksel Taguchi metodu uygulanmıştır (Kwon ve Lin, 2005). İstatistiksel Taguchi metodu ürün imalatı, biyoteknoloji, pazarlama ve reklamcılıkta kullanılan kalite gelişimi için Genichi Taguchi tarafından önerilen istatistiksel bir metottur.

Mod şekilleri ve doğal frekanslar hasarın bulunması açısından yaygın olarak kullanılan dinamik parametrelerdir. Doğal frekanslar ve mod şekilleri yapının rijitliği ile direkt olarak ilgilidir. Bu sebeple doğal frekanslar veya mod şekillerindeki bir azalma, rijitlikte bir kayıp oluştuğunun dolayısıyla yapının elemanlarında bir hasar olduğunun göstergesidir. Salawu (1997) ve Bicanic ve Chen (1997) bu konuda araştırmalar yapmış fakat frekansların tek başına yapıda hasar tespitinde iyi sonuç vermediğini görmüşlerdir. Hasarın uzaysal dağılımını belirleyebilmek amacıyla, sonlu eleman modeli güncellemesi tekniğinde mod şekillerinin de kullanılması öngörülmüştür. Fakat mod şekillerindeki değişimlerin hesaba katılması, birçok yerde ölçüm alınmasının gerekliliği ve frekanslara göre daha gürültülü olmaları dolayısıyla daha zordur. Pandey ve diğ. (1991) mod şekillerinin türevlerinden yararlanarak hasar belirleme çalışmaları yapmıştır. Bu türevlerin, küçük yer değiştirmelere karşı daha duyarlı olmalarına karşın, doğru bir şekilde hesaplanabilmeleri oldukça zordur. Ayrıca başka bir yaklaşım olarak Stubbs ve Kim (1996), Shi ve diğ. (2000) modal şekil değiştirme enerjisini kullanmışlardır.

Sonlu eleman güncellemesi birçok yapı çeşidine farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak uygulanmıştır. Brownjohn ve Xia (2000) Singapur'daki asma köprü olarak tasarlanmış Safti Link köprüsünün dinamik davranışını deneysel verilerle betonun elastisite modülündeki değişimi doğrulayarak incelemişlerdir. Aynı şekilde Natke ve Cempel (1997) frekans ve mod şekillerindeki değişimlerden yararlanarak çelik bir köprüde hasar belirleme çalışmaları yapmışlardır. Doubling ve Farrar (1997) hasarın mod şekillerinde önemli bir değişiklik meydana getirip getirmediğini incelemişler ve hasar belirlemede mod şekillerinin kullanılması ve mod şekli vektörünü doğru bir şekilde oluşturmak için yapının birçok yerinde ölçüm yapılması gerektiğini tavsiye etmişlerdir. Yu ve diğ. (2006) ise Northridge depreminde hasar görmüş mevcut 5 katlı bir yapıda hassalık tabanlı sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemi ile hasar belirleme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında doğal frekans değişimlerini ve frekans tepki fonksiyonlarını kullanmışlardır.

Birçok araştırmacı, yerel ve global optimizasyon yöntemlerini kullanarak sonlu eleman güncellemesi yapmıştır. Global optimizasyon teknikleri, optimizasyon probleminde mevcut olan lokal minimumlar arasından global minimumu tespit edebilen tekniklerdir. Levin ve Lieven (1998) iki yeni global optimizasyon metodunu

sonlu eleman modeli güncellemesi tekniğinde başarılı bir biçimde uyguladılar. Bunlar benzetilmiş tavlama algoritması ve genetik algoritma teknikleridir. Her iki metotta doğal olaylara benzerliklerinden elde edilmiş olasılıklı arama metotlarıdır. Benzetilmiş tavlama algoritması termodinamikteki soğuma sürecinden, genetik algoritmalar ise doğal evrimden ilham almıştır.

Elperin (1988) on çubuklu kafes kiriş problemini Monte Carlo tavlama algoritması kullanarak çözmüştür. Burada amaç fonksiyonu olarak kirişin ağırlığı kullanılmıştır. Balling (1991) benzetilmiş tavlama algoritmasını üç boyutlu altı katlı bir çerçeve sistemine uygulamıştır. Çerçevenin ağırlığı amaç fonksiyonu olarak ele alınıp optimize edilmiştir. Bennage ve Dhingra (1995) benzetilmiş tavlama algoritmasını, ayrık ve sürekli değişkenlerin kullanıldığı yapısal optimizasyon problemlerine uygulamışlardır.

Hao ve Xia (2002) hassaslık tabanlı güncelleme yönteminden yararlanmış ve genetik algoritmalar ile ankastre bir kiriş ve ahşap bir çerçevede hasar tespiti yapmışlardır. Amaç fonksiyonu için sadece doğal frekans değişimleri, sadece mod şekli değişimleri ve her ikisinin aynı anda değişimleri kriterlerini ayrı ayrı kullanmışlardır. Perrera ve Torres (2006) genetik algoritmaları kullanarak dört metre uzunluğundaki basit kirişte çeşitli hasar tiplerine göre hasar belirleme çalışması yapmıştır. Çalışmalarında doğrudan yöntemlerden yararlanmışlar ve rijitlik matrisini güncellemişlerdir.

## 2. OPTİMİZASYON ve TEMEL KAVRAMLAR

### 2.1 Giriş

Genel olarak optimum en iyi, en uygun anlamına gelir. Optimizasyon, belirlenmiş kısıtlamalar dahilinde bir problemin mümkün olabilecek çözümleri arasından en iyi olanı seçme işlemi olarak tanımlanabilir. En iyi çözümü aranan probleme de optimizasyon problemi denir (Pham ve Karaboga, 2000).

Mühendislik uygulamalarında birçok problem optimizasyon problemi olarak modellenebilir. Dijital sinyal işleme, devre tasarımı, veritabanı tasarımı, mekanik tasarım, kimyasal süreç kontrol, tesis organizasyonu, fabrikaların üretim ve dağıtım planlaması, ağ tasarımı, trafik planlaması, yapı tasarımı ve uçak tasarımı örnek olarak verilebilecek uygulamalardan bir kısmıdır.

Her optimizasyon problemi amaç fonksiyonu, kısıtlamalar ve tasarım değişkenleri olmak üzere üç temel unsurdan oluşur.

Amaç fonksiyonu; optimum değeri aranan bir fonksiyondur. Problemin türüne göre en iyi kavramı değişir, amaç fonksiyonun bir maliyet veya hata olduğu bir optimizasyon probleminde, optimum değer maliyeti veya hatayı en aza indiren değer iken, amaç fonksiyonun karlılık veya verimlilik olduğu bir başka problemde optimum değer, karlılığı veya verimliliği en yükseğe taşıyan değerdir. Bazı optimizasyon problemlerinde birden fazla amaç fonksiyonu bulunabilir. Bu tür problemler çok amaçlı optimizasyon problemi olarak adlandırılır. Eğer bir optimizasyon probleminde çok sayıda amaç fonksiyonu varsa, çoğunlukla çözüm de zordur. Çünkü bir fonksiyonu optimum değere getiren değişken değerleri, diğer bir amaç fonksiyonunda verimsiz kalabilir. Bu nedenle problemin çözümünü kolaylaştırmak için çok sayıda amaç fonksiyonu içeren problemler tek bir amaç fonksiyonuna indirgenmeye çalışılır. Bazı optimizasyon problemlerinde ise amaç fonksiyonu bulunmaz, örneğin bir entegre devrenin yerleşim planını belirleme

probleminde amaç, kısıtlamaları sağlayan değişkenler kümesi bulmaktır. Burada optimum değeri aranan bir fonksiyon yoktur. Bu tür problemler uygunluk problemi olarak adlandırılır. Değeri minimize edilecek bir optimizasyon problemi aşağıdaki şekilde Denklem (2.1) ile ifade edilebilir.

$$\min. f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

Burada  $f(x)$  minimize edilecek amaç fonksiyonu ve  $x_1, x_2, \dots, x_n$  de optimum çözüm vektörüdür.

Kısıtlamalar; Optimizasyon probleminde kullanılan değişkenlerin belirli değerleri alabilmesini veya belirli değerleri almamasını sağlamak amacıyla tanımlanırlar. Kısıtlamalar probleme göre değişiklik gösterir ve probleme özeldir. Kısıtlamalar eşitlik veya eşitsizlik biçiminde olabileceği gibi, her optimizasyon problemi için kesinlikle gerekli olan bir unsur değildirler. Problemin özelliğine bağlı olarak bazı optimizasyon problemlerinde hiçbir kısıtlama olmayabilir.

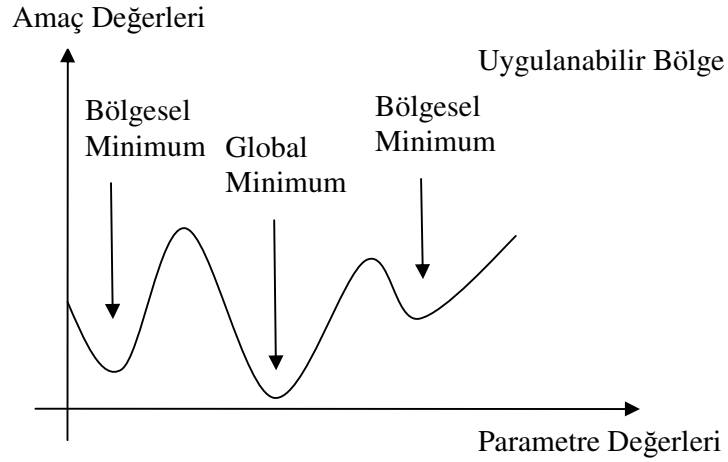
Tasarım değişkenleri; Optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonunun değerini etkileyen bilinmeyenlerdir. Değişkenleri tam olarak tanımlamadan amaç fonksiyonu ve kısıtlamaları tanımlamak mümkün değildir. Bütün optimizasyon problemlerinin ortak noktası optimum değerleri bulunması gereken değişkenlerdir. Optimizasyon problemlerinde probleme göre değişiklik gösteren değişkenlerin kusursuz tanımlanmış olması gerekir.

## 2.2 Bölgesel Minimum, Global Minimum ve Uygulanabilir Bölge

Bir optimizasyon probleminde tüm model kısıtlarını sağlayan seçenekler topluluğu uygulanabilir bölge (fizibil bölge) olarak adlandırılır. Değişken değerleri uygun bir bölge içerisinde, amaç fonksiyonunun muhtemel çözümleri içinde minimizasyon problemi için en küçük, maksimizasyon problemi için en büyük değeri veren noktalar bölgesel optimum, değişken değerlerinin uygulanabilir bölgede verdiği en iyi çözüm değeri ise optimum çözüm olarak tanımlanır. Global minimum, sistemimizin ulaşmasını istediğimiz asıl hedefidir. Eğer sistemimiz optimalse, yeterli zamandan sonra mutlaka buna ulaşacaktır.

Bu kavramlar “Şekil 2.1” de gösterilmiştir. Bununla beraber optimizasyon probleminin uygulanabilir bölge içinde bir bölgesel optimum noktaya takılmasına ise erken yakınsama denir.

Optimum noktada sağlanması gereken şartlar, gerek şartlar olarak adlandırılır. Gerek şartları sağlayamayan noktalar optimum çözüm olamaz. Ancak, tek başına gerek şartların sağlanması da o noktayı optimum çözüm yapmaz. Gerek şartlarla birlikte optimum ve optimum olmayan noktaları ayırt etmek için yeter şartlar kullanılır. Gerek şartlar sağlandıktan sonra yeter şartlarda sağlanıyorsa o noktanın optimum çözüm noktası olduğu söylenebilir.



**Şekil 2.1:** Bölgesel minimum ve global minimum kavramları

### 2.3 Arama Yöntemleri

Optimizasyon metotları problem ve problem üstü olmak üzere iki düzeyde tanımlanır. Problem düzeyinde optimizasyon işleminde, bir problem kümesi içerisinde her problem tek tek diğerlerinden bağımsız olarak çözülür. Problem üstü düzeyde, çeşitli problemlerden oluşan bir küme bir bütün olarak göz önüne alınarak optimum çözüm aranır. Problem üstü düzeyde optimizasyon metotları problem düzeyinde optimizasyon metotlarını yönlendirmek amacıyla da kullanılır (Shang, 1997).

Optimizasyon algoritmalarında çeşitli arama stratejileri kullanılır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları; yorucu (exhaustive), rastgele (random), aç gözlü

(greedy), tepe tırmanma (hill-climbing), sezgisel (heuristic), belirleyici (deterministic) ve ihtimalci (stochastic) arama stratejileri örnek verilebilir (Spaulding, 1998).

Yorucu aramada giriş veri kümesinin tüm kombinasyonları test edilerek araştırma uzayında en iyi çözüm aranır. Tüm kombinasyonların testini gerektirdiğinden dolayı pratikte uygulaması zor bir metottur.

Rastgele aramada giriş veri kümesinin rastgele üretilen kombinasyonları makul bir çözüm bulununcaya kadar denir. Global çözüme yakınsama özelliği yoktur. Rastgele arama metodunda genellikle kısa zamanda iyi çözümler bulunmaz.

Açgözlü arama rastgele aramaya benzerlik gösterir. Açgözlü arama giriş veri kümesinin rastgele üretilen kombinasyonlarını dener ve iyi bir çözüm bulduğunda bunu saklar. Daha sonra bu iyi çözüm etrafında araştırmaya devam eder. Bu metotta açgözlü kelimesi, bölgesel ölçekte daha iyi çözümü kabul etmek yönünde tercihin yüksek oluşunu ifade eder. Bölgesel ölçekte aramayı kötüye götüren çözümler kabul edilemez. Oysa global optimum kimi zaman yeni araştırma yönü olarak bölgesel ölçekte kötü olan çözümleri kabul etmekle bulunabilmektedir. Açgözlü arama hızlı sonuç vermesine karşın global optimumu bulma bakımından genelde yetersizdir.

Tepe tırmanma metodu bölgesel optimumu aşabilmek için araştırma yönü olarak bölgesel optimum etrafında daha kötü çözümlerin kabul edilmesi gerektiğini temel alır. Bu metotta arama, hata veya maliyet değerini daha yükseğe çıkaran tarafa yönlendirildiği için arama işlemi tepe tırmanmayı çağırır. Arama esnasında elde edilen çözümler iyiye giderken bir noktadan sonra kötüye giderse, o noktanın bir sırt noktası olduğu veya tersi yönde gelişim durumunda gelişimin yön değiştirdiği noktanın bir dip noktası olduğu anlaşılır. Bu metot türev alma işleminin verdiği neticeyi bir başka biçimde arayıp deneyerek bulur ve genellikle doğrusal olmayan problemlerde kullanılır.

Sezgisel metot, akıllı tahminlere dayalı buluşsal veya yeni çözümlerin keşfine götüren bulgulara dayalı arama yöntemidir. Belirlenen hedefe ulaşmak için verilen kısıtlamalar içerisinde geliştirilen çözüm stratejisi ile bulunan çeşitli alternatif çözümlerden en etkili olanlar seçilir. Her karar sürecinde verilecek kararlar

değişebilir. Sezgisel stratejiler arama zamanını kısaltır, optimum çözüme yakın çözümler sunar fakat optimum çözümü garanti edemezler.

Belirleyici yaklaşım probleme özeldir ve statik bir yapı kullanır. Bu stratejide mevcut çözüme göre bir sonraki aşamada elde edilecek çözümler belirlidir ve sabittir.

İhtimalci yaklaşım dinamik bir yapıya sahiptir. Bu optimizasyonda eski çözümlerin kalitesi nispetinde değerler alan bir olasılık dağılım fonksiyonuyla bir rastgele sayı üreticinden faydalanarak yeni çözümler belirlenir. Karar mekanizması olasılık tabanlı seçimlere dayanır. Her karar sürecinde verilecek kararlar değişebilir.

Optimizasyon algoritmaları genel olarak önce deterministik bir yöntemle hesaplanabilen en iyi çözümü başlangıç çözümü olarak tespit eder ve daha sonra bu çözümü ihtimalci ve sezgisel stratejiler kullanarak geliştirmeye çalışırlar (Karaboga, 2003).

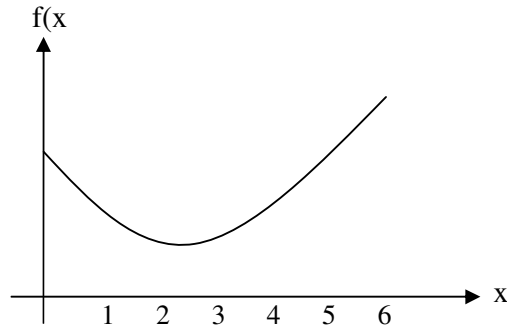
## **2.4 Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması**

Optimizasyon problemleri çeşitli şekillerde sınıflandırılırlar. Bir optimizasyon probleminde amaç fonksiyonunun değişkenlerinde herhangi bir kısıtlama varsa kısıtlamalı optimizasyon, herhangi bir kısıtlama yoksa kısıtlamasız optimizasyon problemi olarak isimlendirilir.

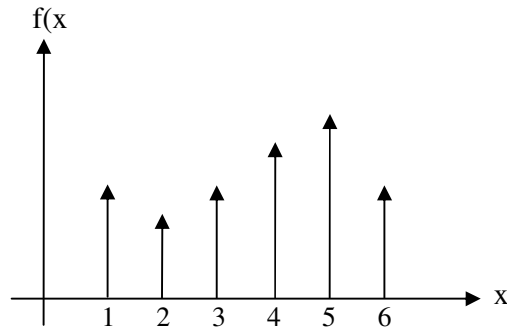
Optimizasyon problemlerinde diğer bir sınıflandırma ise amaç fonksiyonun ve kısıtlamalarla ilgili fonksiyonların doğrusal olup olmamalarına göre yapılır. Optimizasyon problemi doğrusal amaç ve kısıtlama fonksiyonlarına sahip ise doğrusal optimizasyon problemi, bu fonksiyonlardan herhangi biri doğrusal değil ise doğrusal olmayan optimizasyon problemi olarak isimlendirilir. Doğrusal ve doğrusal olmayan fonksiyonlara örnek vermek gerekirse; grafiği doğrulardan oluşan  $y = Ax+B$  şeklinde birinci dereceden eşitliği ile tanımlanan fonksiyon doğrusal bir fonksiyon iken, grafiği eğrilerden oluşan  $y = e(x), \log(x), x^n$  şeklinde tanımlanan fonksiyonlar doğrusal olmayan fonksiyonlardır (Waner ve Costenoble, 2001).

Diğer bir gruplandırma ise ayrık (discrete) ve sürekli (continuous) optimizasyon problemleri şeklindedir. Optimizasyon problemindeki bilinmeyenler uygulanabilir

bölgede tüm değerleri alabiliyorlarsa sürekli optimizasyon problemi, eğer değişkenler sonlu sayıda belirli değerler alabiliyorlarsa ayrık optimizasyon problemi olarak adlandırılırlar. Şekil 2.2’de bu problemlere örnek olabilecek araştırma uzayları gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.2: (a) Sürekli araştırma uzayı, (b) Ayrık araştırma uzayı

## 2.5 Optimizasyon Metotlarının Sınıflandırılması

Optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilen metotlar genel olarak iki gruba ayrılırlar; direkt metotlar ve optimalite kriterine dayalı metotlar (endirekt metotlar).

Direkt metotlarda araştırmaya, tahmini bir başlangıç çözümü ile başlanır. Bu başlangıç çözümü genellikle optimalite şartlarını sağlayamayacağından bu şartlar

sağlanana kadar başlangıç çözümleri algoritma tarafından iteratif olarak geliştirilir. Bu tür bir yaklaşımla optimum çözümleri bulmak için çözümler uzayı araştırılmış olur.

Endirekt metotlar ise optimalite şartlarına göre çözümler arayan minimizasyon teknikleridir. Optimalite kriteri bir fonksiyonun minimum noktalarının sağlaması gereken şartlardır. İlk önce gerek ve yeter şartlar yazılır, sonra bu şartlar bölgesel minimuma aday noktalar için çözümler.

### 3. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI

#### 3.1 Giriş

Olasılık tabanlı sezgisel bir algoritma olan benzetilmiş tavlama algoritması ilk olarak Kirkpatrick ve diğ. (1983) tarafından önerilmiştir. Benzetilmiş tavlama algoritması, pek çok değişkene sahip fonksiyonların en büyük veya en küçük değerlerinin bulunması ve özellikle pek çok yerel minimumlara sahip doğrusal olmayan fonksiyonların en küçük değerlerinin bulunması için tasarlanmıştır. Bu algoritma, katı cisimlerin soğurken atomlarının mükemmel şekilde dizilip potansiyel enerjiyi minimize etmesini örnek aldığından ve özellikle metallerin tavlama işlemini andığından bu ismi almıştır. Diğer olasılıksal yaklaşımlar (genetik algoritmalar, tabu arama vb.) gibi en iyi çözümün en kısa zamanda üretimini sağlar. Bu sebeple, özellikle matematiksel modellerle gösterilemeyen kombinasyonel problemlerin eniyileme uygulamalarında benzetilmiş tavlama algoritması tercih edilir. Benzetilmiş tavlama algoritması; elektronik devre tasarımı, görüntü işleme, yol bulma problemleri, seyahat problemleri, malzeme fiziği benzetimi, kesme ve paketleme problemleri, akış çizelgeleme ve iş çizelgeleme problemlerinin çözümlerinde başarılı sonuçlar vermiştir (Kirkpatrick ve diğ., 1983).

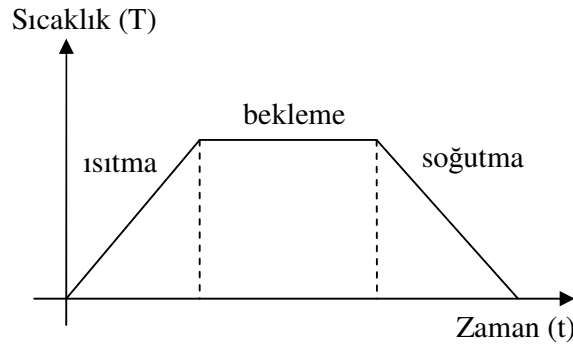
Algoritmayı anlamak için şöyle bir örnek verebiliriz. Diyelim ki en alçak noktasını aradığımız bol delikli bir golf sahamız var. Eğer sahanın eğimi yönünde ilerlemek gibi basit bir yöntem kullanırsak o zaman yüksek olasılıkla deliklerden birinde takılabiliriz. Bunun yerine şöyle yapıyoruz: Sahaya bir top koyup araziye olduğu gibi sallamaya başlıyoruz. Top arada bir deliklere girse de sürekli salladığımız için sonra çıkıyor. Zamanla sallama hızımızı ağır ağır azaltıyoruz. Tamamen durduğumuzda ise topumuzun sahanın en alçak noktasında (global minimum) ya da yakın bir yerlerde olduğunu farz ediyoruz. Gerçek dünyadaki katı cisimlerde de durum bu örnekteki benzerdir. Örneğimizdeki sallama hareketi cisimlerin sıcaklığına karşılık gelir. Bir

gazı soğuturken atomlar bir süre sonra nasıl ki periyodik aralıklarla dizilip potansiyel enerjiyi minimize ediyorlar ise (kristalleşme) biz de aynı yöntemi kullanarak enerjiyi değil kendi tanımladığımız bir fonksiyonu minimize etmeye çalışıyoruz.

Benzetilmiş tavlama, yerel arama yöntemlerinin yerel bir minimuma ulaştıktan sonra global minimum için daha fazla arama yapmamasından kaynaklanan eksikliğini gidermeye çalışan bir yöntemdir. Benzetilmiş tavlama, bir istisnası dışında yerel arama yöntemindeki aynı temel adımları kullanır. Soğutma işlemi bu algorithmada daha iyi sonuçların bulunmasını sağlayacak yeni komşu çözümlerin üretilmesini sağlayan üstel (exponential) bir ifadedir.

### 3.2 Fiziksel Tavlama Süreci

Benzetilmiş tavlama algoritması katıların fiziksel tavlama işlemi ve kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümü arasındaki benzerlik üzerine dayalıdır. Isıl işlem sayesinde malzemenin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması (ısıtma) bu sıcaklığın uygun bir süre tutulması (bekleme) ve belirli bir programa uygun olarak sıcaklığın düşürülmesi (soğutma) ile üç kademede özellik değişimleri sağlanır.



**Şekil 3.1:** Isıl işlem kademeleri

Katının ergime noktasına kadar ısıtılması ve devamında mükemmel kafes yapılı durumda kristalize olana kadar yavaşça soğutulması işlemine tavlama denilmektedir. Malzemelerin atomları, yüksek sıcaklıklarda yüksek enerji seviyelerindedir ve düzgün yerleşimler için daha fazla hareket serbestliğine sahiptirler. Düzgün yapılı bir kristal sağlandığında, sistem minimum enerjiye sahiptir. Sıcaklık azaldıkça, atomik

enerji düşer. Eğer soğutma işlemi çok hızlı gerçekleşirse, kristal yapıda bozukluklar ve düzensizlikler ortaya çıkacaktır.

Fiziksel tavlama işlemi, Monte Carlo tekniği üzerine dayalı olarak Metropolis ve diğ. (1953) tarafından modellenmiştir. Verilen bir T sıcaklığında, sistem enerjilerinin olasılık dağılımı aşağıda verilen termodinamik kanunu, Denklem (3.1) ile belirlenir:

$$P(E) = e^{-E/(kT)} \quad (3.1)$$

Burada, E sistem enerjisi, k ise Boltzmann sabitidir.

Küçük bir karışıklıkla sistem durumunda değişiklik yaratılması halinde, Metropolis algoritmasına göre sistemin yeni enerjisi hesaplanır. E<sub>1</sub> enerjisine sahip mevcut durumdaki katının durumu gelişigüzel seçilen küçük bir parçanın yer değiştirmesi ile mekanik bir değişme sağlanır ve E<sub>2</sub> enerji seviyesi ile diğer duruma geçilir. Eğer enerji azalmış yani  $\Delta E = (E_2 - E_1) < 0$  ise sistem bu yeni duruma geçer. Eğer enerji artmış ise yani  $\Delta E > 0$  ise E<sub>1</sub> enerji durumunun kabul edilip edilmemesine, Denklem (3.2) de verilen olasılık formülü kullanılarak karar verilir: Uniform dağılımdan (0,1) aralığında rastgele bir  $\delta$  sayısı üretilir ve Denklem (3.2) de verilen şart sağlanıyorsa yeni çözüm, mevcut çözüm olarak kabul edilir. Aksi takdirde, mevcut çözüm değiştirilmez.

$$\delta \leq e^{\Delta E/T} \quad (3.2)$$

Burada,  $\Delta E$ , iki durumun enerji seviyeleri arasındaki farktır. Bu kabul kriteri Metropolis kriteri olarak bilinir. Denklem (3.1)' e göre, yüksek sıcaklıklarda tüm enerji durumları için P(E), 1'e yakınsar. Küçük bir olasılıkla, düşük sıcaklıklarda bile sistem yüksek enerji seviyesine sahip olabilir.

Optimizasyon problemi çözümünde benzetilmiş tavlama algoritmasının kullanılması, optimal bir çözüm bulma ile katıların tavlama prosedüründe düşük enerji seviyesinin bulunması arasındaki benzerliğe bağlı olarak geliştirilmiştir. Optimizasyon problemi ve tavlama işlemi arasındaki benzerlikte, katının durumları optimizasyon probleminin mümkün olan çözümlerini temsil eder ve bu durumların enerjileri

çözümler için hesaplanan amaç fonksiyon değerlerine karşılık gelir. Minimum enerji durumu problem için optimal çözümü ifade eder, hızlı soğutma işlemi ise yerel optimum olarak görülebilir (Eglese, 1990). Benzetilmiş tavlama ve optimizasyon problemleri arasındaki ilişki “Tablo 3.1”de gösterilmektedir.

**Tablo 3.1:** Tavlama süreci ve optimizasyon problemi arasındaki ilişki

Tavlama Süreci	Optimizasyon Problemi
Sıcaklık	İterasyon Sayısını Kontrol Eden Kontrol Parametresi
Fiziksel Sistemin Durumu	Problemin Çözümü
İçinde Bulunan Durumun Enerjisi	Amaç Fonksiyonunun Değeri
Minimum Enerji	Optimal Çözüm

Benzetilmiş tavlama algoritması iteratif bir algoritmadır, yani algoritma çözüm uzayında sayıların vektörü formundaki tek bir çözümü sürekli olarak geliştirme şeklinde çalışır. Benzetilmiş tavlama algoritmaları mümkün başlangıç çözümünün seçilmesi ve amaç fonksiyonunun hesaplanması ile başlar. Yeni veya komşu bir çözüm rastgele oluşturulur ve amaç fonksiyonu tekrar hesaplanır. Amaç fonksiyonundaki değişim değerlendirilir. Bu prosedür durdurma kriterine gelinceye kadar devam eder.

Temel bir benzetilmiş tavlama algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir (Sridhar ve Rajendran,1993):

**Adım 1.** Bir başlangıç çözümü üret,  $S$ .

**Adım 2.** Bir  $S' \in N(S)$  çözümü seç ve amaç fonksiyon değerlerindeki farkı hesapla.

$$\Delta = C(S) - C(S')$$

**Adım 3.** Eğer, i)  $S'$ ,  $S$  den daha iyi ( $\Delta > 0$ ) yada (ii)  $T / e E \Delta \leq \delta$  ise,

S' nü yeni çözüm olarak tayin et ( $S \leftarrow S'$ ) Aksi takdirde, mevcut çözümü tut.

**Adım 4.** Sıcaklığı güncelle.

**Adım 5.** Eğer Durdurma kriteri sağlanıyor ise dur, Aksi takdirde Adım 2' ye git.

Benzetilmiş tavlama algoritmasının bir probleme uygulanması amacıyla tasarımında karar verilmesi gereken kavramları, probleme özel seçenekler ve algoritmanın kendisine ait genel seçenekler şeklinde iki grupta toplamak mümkündür (Jhonson ve diğ., 1989; Wong ve diğ., 2002).

### 3.3 Probleme Özel Seçenekler

Karar verilmesi gereken seçeneklerin bir kısmı, çözülmesi hedeflenen optimizasyon problemi ile ilgilidir. Bu seçeneklerin tanımlamalarını değiştirmek suretiyle algoritmadan daha iyi performans elde edilebilir. Probleme özgü seçimler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Problem, mümkün olan çözümlerin kümesi, tanımlanabilecek bir şekilde formüle edilmelidir. Çözümler temsili olarak belirlenmeli, minimize edilecek bir amaç fonksiyonu tanımlanmalı ve bir başlangıç çözümü üretilmelidir.
- Komşu çözümlerin üretilmesini sağlayan komşu üretme mekanizması tanımlanmalıdır. Algoritmanın performansı kullanılan komşuluk yapısına oldukça bağlıdır.
- Hareket seçimleri için uygun stratejiler tanımlanmalıdır.

### 3.4 Algoritmanın Kendisine Ait Genel Seçenekler

Genel seçenekler soğutma stratejisinin elemanlarını tanımlar. Soğutma planına ait aşağıda verilen seçimler belirgin şekilde yapılmalıdır.

- Sıcaklık parametresi T'nin başlangıç değerinin tayin edilmesi
- Soğutma oranı ve güncelleme kuralının tanımlanması

- Her bir sıcaklıkta icra edilecek iterasyonların sayısının belirlenmesi
- Algoritmayı durdurmak için durdurma kriterinin tayin edilmesi

Benzetilmiş tavlama algoritmasının performansı, önemli derecede seçilen soğutma tarifesine bağlıdır. Uygun bir soğutma tarifesi ile çoğu optimizasyon problemi için optimale yakın çözümler elde edilebilir. Önerilen en eski soğutma tarifesi Kirkpatrick ve arkadaşlarının fiziksel tavlama ile olan benzerliğe dayanarak ileri sürdükleri plandır. Bu tavlama planına göre, maddenin sıvı safhaya ulaştığında tüm parçacıkların rasgele düzenlenmesini taklit etmek için, T sıcaklık parametresinin başlangıç değeri, denenen tüm hareketler kabul edilecek kadar yüksek seçilmiştir. Sıcaklık parametresinin değerini azaltmak için ise, oransal bir sıcaklık fonksiyonu kullanarak sabit bir r için,  $T(t+1)=r.T(t)$  dikkate alınmıştır. Burada, r değeri 1'den küçük fakat 1'e yakın bir sabittir ve genellikle değeri 0.8 ile 0.99 arasında bir değer almaktadır. Burada r'nin yüksek değerlerinde yavaş bir soğuma, düşük değerlerinde ise hızlı bir soğuma gerçekleşir (Aarst ve Korst,1989). Bu sıcaklık fonksiyonu ile sıcaklık parametresinin değeri, sıfıra yaklaştıkça daha da yavaş azalmaktadır. Sıcaklık parametresinin her değerinde gerçekleştirilecek yeterli tekrar sayısı, sabit bir üst sınıra göre belirlenerek problemin, fiziksel tavlamadaki ısı dengeye karşılık gelen bir denge durumuna ulaşması amaçlanmaktadır. Bu tavlama planı ile sıcaklık parametresinin her değerinde elde edilen çözüm, belli sayıda ardışık sıcaklık değişimleri boyunca aynı kalırsa, benzetilmiş tavlama algoritması durdurulmaktadır. Buna göre elde edilen son durum, fiziksel tavlamadaki donma durumuna (frozen state) karşılık gelmektedir. Takip eden bölümde önerilen soğutma tarifeleri verilmektedir.

### **3.4.1 Teorik Soğutma Stratejileri**

Teorik soğutma stratejileri benzetilmiş tavlama algoritmasının 1.0'a eşit olasılıkla global optimal çözümlere yakınsamasını sağlar. Teorik soğutma stratejilerinde iki tip formülasyon ortaya çıkmıştır.

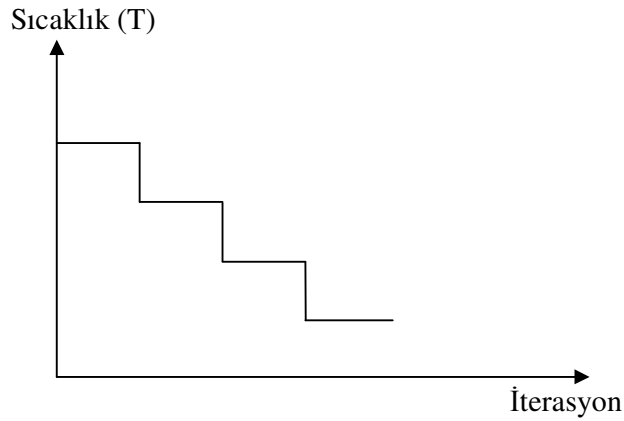
Homojen algoritma: Bu algoritmada sıcaklık, sıfıra erişinceye kadar sonsuz kademeler dizisi şeklinde azaltılır. Verilen bir sıcaklık değerinde gerçekleştirilen iterasyon sayısı belirlenir.

Homojen olmayan algoritma: Bu algoritmada da yine sıcaklık sıfıra erişinceye kadar sonsuz kademeler dizisi şeklinde azaltılır. Bununla birlikte her bir kademe sadece tek bir iterasyon hareketini temsil etmektedir.

### 3.4.2 Basit Soğutma Stratejileri

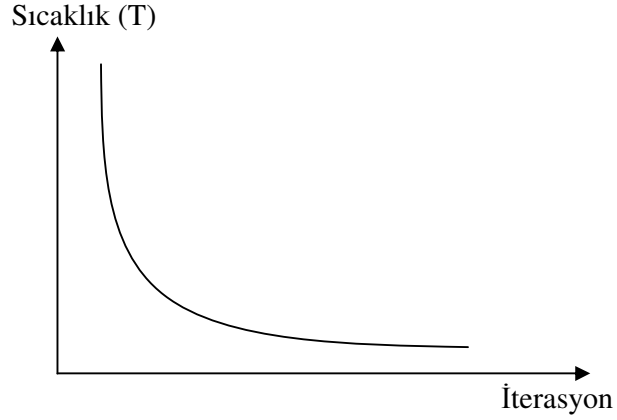
Pratikte basit soğutma stratejileri teorik soğutma stratejilerine göre daha başarılı neticeler üretmektedir. Bunun sebebi teorik olanların yakınsamayı ispat etmeye çalışması fakat bununda yakınsamayı yavaşlatması olabilir.

Basamak tip sıcaklık düşürme stratejisi: Bu kategori, belirli bazı kurallara göre sıcaklığı bir kademe düşürerek, mevcut sıcaklık değerinde sabit bir Markov zincir uzunluğundaki (L) uygulamaları içerir. “Şekil 3.2”de basamak tipte sıcaklık düşürme stratejisi gösterilmiştir.



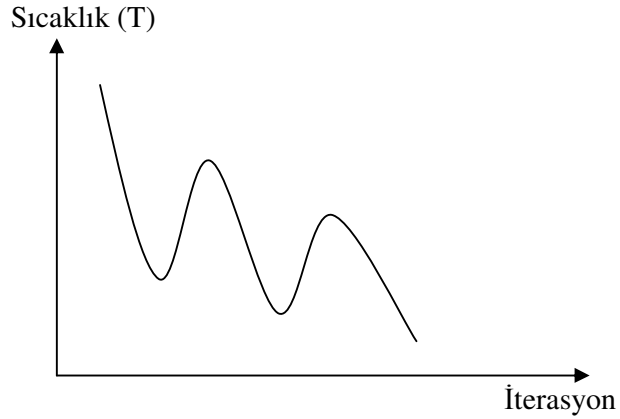
**Şekil 3.2:** Basamak tipte sıcaklık düşürülmesi

Sürekli sıcaklık düşürme stratejileri: Bu kategori her sıcaklık değerinde sadece bir hareketin yapıldığı soğutma tarifelerini içerir. Sıcaklık T, her iterasyondan sonra düşürülerek sürekli azaltılır. “Şekil 3.3”de sürekli sıcaklık düşürme stratejisi gösterilmiştir.



**Şekil 3.3:** Sürekli olarak sıcaklığın düşürülmesi

Monotonik olmayan sıcaklık düşürme stratejileri: Monoton olmayan sıcaklık düşürme stratejisinde, her iç değişimden sonra sıcaklık yavaş yavaş azaltılmaktadır. Komşu çözümlerde herhangi bir değişim gözlenmez ise sıcaklık belirli bir değere kadar artırılır. “Şekil 3.4”de monoton olmayan sıcaklık düşürme stratejisi gösterilmiştir.



**Şekil 3.4:** Monoton olmayan şekilde sıcaklığın düşürülmesi

Monoton olmayan sıcaklık düşürme stratejisi yukarıda bahsettiğimiz diğer soğutma stratejilerinin dezavantajlarını yok etmek için geliştirilmiştir. Önceki soğutma tarifelerinde, komşuluk genellikle rastgele alternatif çözümler üretmek için

araştırılmakta ve sıcaklığın düşük değerlerinde, mevcut çözümden daha kötü çözümlerin kabul edilebilirlik olasılığı çok azalmaktadır.

Son yıllara kadar benzetilmiş tavlama algoritması, çoğunlukla ayrık formdaki optimizasyon problemlerine uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınmakta iken, son zamanlarda yapı dinamiği, kontrol sistemleri, eleman ağı gibi farklı mühendislik sahalarından değişik nümerik optimizasyon problemlerine de uygulanmıştır (Wong ve diğ., 2002; Kalınlı, 2003; Mottershead ve Friswell, 1993).

## **4. SONLU ELEMAN MODELİ GÜNCELLEMESİ ve HASAR TESPİTİ**

### **4.1 Sonlu Eleman Modeli Güncellemesi**

#### **4.1.1 Giriş**

Son yirmi yıldır yapısal sistem tanımlama ve hasar belirleme için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de sonlu eleman modeli güncelleme yöntemidir. Sonlu eleman modeli güncelleme yöntemi, yapıları tahribatsız olarak inceleyerek gerçek yapıda meydana gelen etkiler altında yapının davranışını gözleyerek deneylerden elde edilen mod şekli, frekans vb. parametreler ile sonlu eleman modeli parametreleri arasındaki korelasyonu artırmak amacıyla kullanılır.

Yapısal sistemlerin özellikle büyük sistemlerin doğru analitik modellerinin geliştirilmesi mühendislik analizinin temel gereksinimlerindedir. Modelin doğru ölçülmesi için analitik model sonuçlarının test ölçümleri ile karşılaştırılması çok sık olarak kullanılır. Analitik model sonucu ortaya çıkan dinamik parametreler (doğal frekanslar, mod şekilleri vb.) test sonuçları ile tam olarak örtüşmez. Bu sebeple analitik model ile deneysel sonuçları uyarlamak için tekrarlı bir döngüye ihtiyaç vardır. Sonlu eleman modeli güncellemesi bir optimizasyon süreci olarak düşünülebilir. Sonlu eleman güncellemesinde, deneysel ve sayısal doğal frekans ve mod şekli farklarının yer aldığı en küçük kareler problemi şeklinde ifade edilen bir uygunluk fonksiyonu minimize edilir. Bunun için sağlam ve güvenilir bir optimizasyon algoritması kullanılmalıdır.

Deneysel modal veriler, deneylerden elde edilir. Bu çalışmada sonlu eleman modelindeki kirişte yayılı hasar olduğu farz edilerek çeşitli hasar senaryoları kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal modal veriler kullanılarak uygunluk fonksiyonu oluşturulur. Bu uygunluk fonksiyonu yerel veya global optimizasyon algoritmalarından biri kullanılarak minimize edilir. Bu çalışmada benzetilmiş

tavlama algoritması kullanılmıştır. Minimizasyona yeterli yakınsama sağlanana kadar devam edilir veya optimizasyon algoritmasının yapısına uygun olarak belirli bir iterasyondan sonra algoritma durdurulur ve güncellenmiş değişkenler elde edilir.

#### 4.1.2 Amaç Fonksiyonu

Genellikle bir yapının uygulanabilir tasarımları arasında sonsuz sayıda seçenek bulunabilir. Bu durumda yapının hangi tasarımının optimum olacağını belirlemek için, tasarım değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak kullanılan fonksiyona amaç fonksiyonu denir. Amaç fonksiyonu, optimizasyon sürecinde en uygun değeri aranan fonksiyon olarak da bilinir.

Sonlu eleman güncellemesi için, Mottershead ve Friswell (1993), Maia ve Silva (1997) gibi birçok araştırmacı amaç fonksiyonu olarak en küçük kareler probleminin çözümünü önermişlerdir. Bu yöntemin dışında kullanılan farklı yaklaşımlar da olmasına rağmen, en küçük kareler yöntemi etkili ve genel kullanılan bir yöntem olarak kabul edilmiştir. Amaç fonksiyonu Denklem (4.1) de görüldüğü gibi sıradan bir en küçük kareler problemi şeklinde, sayısal modal veriler ile deneysel modal veriler arasındaki farkın kareleri toplamı olarak formüle edilebilir.

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [z_j(x) - \tilde{z}_j]^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m r_j(x)^2 \quad (4.1)$$

Burada  $z_j(x)$  sayısal modal parametreleri,  $\tilde{z}_j$  ise deneysel modal parametreleri temsil etmektedir. Temel en küçük kareler yöntemi ağırlıklı en küçük kareler yöntemi olarak da ele alınabilir. Ağırlıklı en küçük kareler yönteminde artıklar, farklı tipte artıkların birbirine göre önemlerini ve kesinliklerini dikkate almak için bir ağırlık matrisi ile çarpılırlar. Sonlu eleman güncellemesinde amaç fonksiyonu Denklem (4.2) de verilmiştir.

$$f(x) = \frac{1}{2} \|r(x)\|^2 = \frac{1}{2} \left\| \begin{matrix} r_f(x) \\ r_s(x) \end{matrix} \right\|^2 \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) de ağırlık vektörünün birinci parçası  $r_f(x)$  Denklem (4.3) te görüldüğü gibi, güncellenmiş frekanslar ile hasarlı durumdaki frekansların karesinin farkının hasarlı durumdaki frekansların karesine oranını göstermektedir.

$$r_f(x) = \frac{w_j(x)^2 - \tilde{w}_j^2}{w_j^2} \quad j = 1, 2, \dots, m_f \quad (4.3)$$

Burada  $w_j(x)$  sayısal frekansı,  $\tilde{w}_j$  deneysel frekansı,  $m_f$  ise güncelleme işleminde kullanılacak tanımlanmış frekans sayısını belirtmektedir.  $r_s(x)$  ise Denklem (4.4) te görüldüğü üzere güncellenmiş mod şekilleri ile hasarlı durumdaki mod şekilleri arasındaki farkı göstermektedir.

$$r_s(x) = \frac{\phi_j^l(x)}{\phi_j^r(x)} - \frac{\tilde{\phi}_j^l}{\tilde{\phi}_j^r} \quad j = 1, 2, \dots, m_s \quad (4.4)$$

Burada  $\phi_j(x)$  sayısal mod şekillerini,  $\tilde{\phi}_j$  deneysel mod şekillerini,  $m_s$  ise güncelleme işleminde kullanılacak tanımlanmış mod şekillerini göstermektedir.

Frekansların yapı ile ilgili olarak genel bilgiler sağlaması, sistemin rijitlik özellikleri ile ilgili elemanlar olması ve deneysel olarak doğru bir şekilde ölçülebilmeleri onları güncelleme işlemi için vazgeçilmez karakteristikte kılmaktadır. Fakat bütün bu özelliklerine rağmen frekanslar yapının uzaysal dinamik davranışını tam olarak yansıtmazlar. Bu sebeple amaç fonksiyonu, Denklem (4.4) de tanımlanan mod şekillerinin katkısıyla daha gerçekçi hale getirilir. Ancak mod şekilleri, frekanslara göre ölçülmesi daha zor büyüklüklerdir.

#### 4.1.3 Güncelleme Parametreleri

Güncelleme parametreleri, sayısal modelin belirli olmayan değişkenleridir. Bu değişkenler yapının düğüm noktası rijitlikleri, destek noktalarındaki yayların rijitlikleri, elastisite modülü gibi fiziksel özellikleridir. Sonlu eleman modeli güncellemesinde bu bilinmeyen fiziksel özelliklerin seçimi oldukça önemlidir (Teughles ve De Roeck, 2002).

Sonlu eleman modeli güncellemesinde hasarın varlığı, sistem rijitlik matrislerindeki azalmayla ifade edilir. Sonlu eleman modelindeki her elemanın elastisite modülü veya atalet momenti gibi fiziksel büyüklükleri, hasar boyutuna göre düzeltme katsayılarıyla güncellenir. Bu katsayılar amaç fonksiyonunun minimize edilmesiyle bulunur ve böylece hasarın büyüklüğü ve yeri belirlenebilir. Denklem (4.5) de düzeltme katsayıları boyutsuz olarak tanımlanmıştır.

$$a_x = -\frac{X - X_{ref}}{X_{ref}} \quad (4.5)$$

Bu denklemde  $a_x$  düzeltme katsayıları,  $X_{ref}$  referans (başlangıç) fiziksel büyüklükler,  $X$  ise güncellenen fiziksel büyüklüklerdir. Aynı şekilde güncellenmiş  $X$  fiziksel büyüklüğünün değeri Denklem (4.6) ile bulunur.

$$X = X_{ref}(1 - a_x) \quad (4.6)$$

Sonlu eleman güncellemesi yönteminde sistem matrisindeki her elemanın elastisite modülü güncelleme için aday bir büyüklüktür. İnşaat mühendisliği uygulamalarında yapı hasarlı durumdayken kütle matrisinin özelliklerinin değişmediği kabul edildiğinden, elastisite modülü gibi rijitlik matrisinin elemanlarında düzeltme yapılır böylece Denklem (4.7) elde edilir.

$$E = E_{ref}(1 - a_x) \quad (4.7)$$

Burada  $E_{ref}$  ve  $E$  sırasıyla başlangıç ve güncellenmiş durumdaki elastisite modüllerini temsil eder.

#### 4.1.4 Modal Güvence Ölçütü (MAC)

Modal Güvence Ölçütü (MAC) sayısal ve deneysel mod şekilleri arasındaki uygunluğu ifade etmektedir (Ewins, 1984). Sayısal (indeks s) ve deneysel (indeks d) mod şekilleri arasındaki MAC ifadesi Denklem (4.8) ile hesaplanır.

$$MAC(\Phi_s, \Phi_d) = \frac{|\left[ \Phi_s \right]^T \left[ \Phi_d \right]|^2}{\left( \left[ \Phi_s \right]^T \left[ \Phi_s \right] \right) \left( \left[ \Phi_d \right]^T \left[ \Phi_d \right] \right)} \quad (4.8)$$

Sayısal ve deneysel modların mümkün olabilen tüm kombinasyonları arasındaki bağlantı ölçütleri, MAC matrisinde depolanır. MAC hesabı hızlıdır ve kütle yada rijitlik matrislerine ihtiyaç duyulmaz. MAC matrisindeki köşegen dışı elemanlar modlar arasındaki lineer bağımsızlığın kontrolü anlamına gelirken MAC matrisi diagonalde bire eşittir. Bire eşit değerdeki iki mod sekli, aynı modları (veya tam korelasyonu) gösterir.

MAC değeri serbestlik derecelerindeki deneysel ve sayısal olarak elde edilen modal yer değiştirmeler çarpılarak hesaplanır. MAC matrisi genellikle en iyi sensor yerlerini belirlemede kullanılır. MAC matrisinin bir diğer uygulaması otomatik mod sekli eşleşmesindedir. Mod sekli eşleşmesi, modal güvence ölçütünü (MAC) kullanarak kolayca çözülebilir. Deneysel ve analitik mod arasındaki MAC 1'e yakınsa, modların bu eşleşmesi güncelleme algoritmasında güvenle kullanılabilir. Yeterli güvenle eşleşmeyen her mod, güncelleme algoritmasında kullanılmaz.

Deneysel ve analitik veri karşılaştırmada ikinci problem, mod sekli ölçeklendirmedir. Sonlu eleman modelindeki kütle dağılımı ve gerçek yapının farklı olabilmesinden dolayı, mod şekilleri sürekli ölçeklendirilmeyebilir. Modal ölçek faktörü kullanılarak (MSF), ölçüm mod sekli analitik mod şekliyle çarpılarak ölçeklendirilebilir (Allemang ve Brown, 1982). Sayısal ve deneysel mod şekilleri arasındaki MSF ifadesi Denklem (4.9) ile hesaplanır.

$$MSF(\Phi_s, \Phi_d) = \frac{\left[ \Phi_s \right]^T \left[ \Phi_d \right]}{\left[ \Phi_d \right]^T \left[ \Phi_d \right]} \quad (4.9)$$

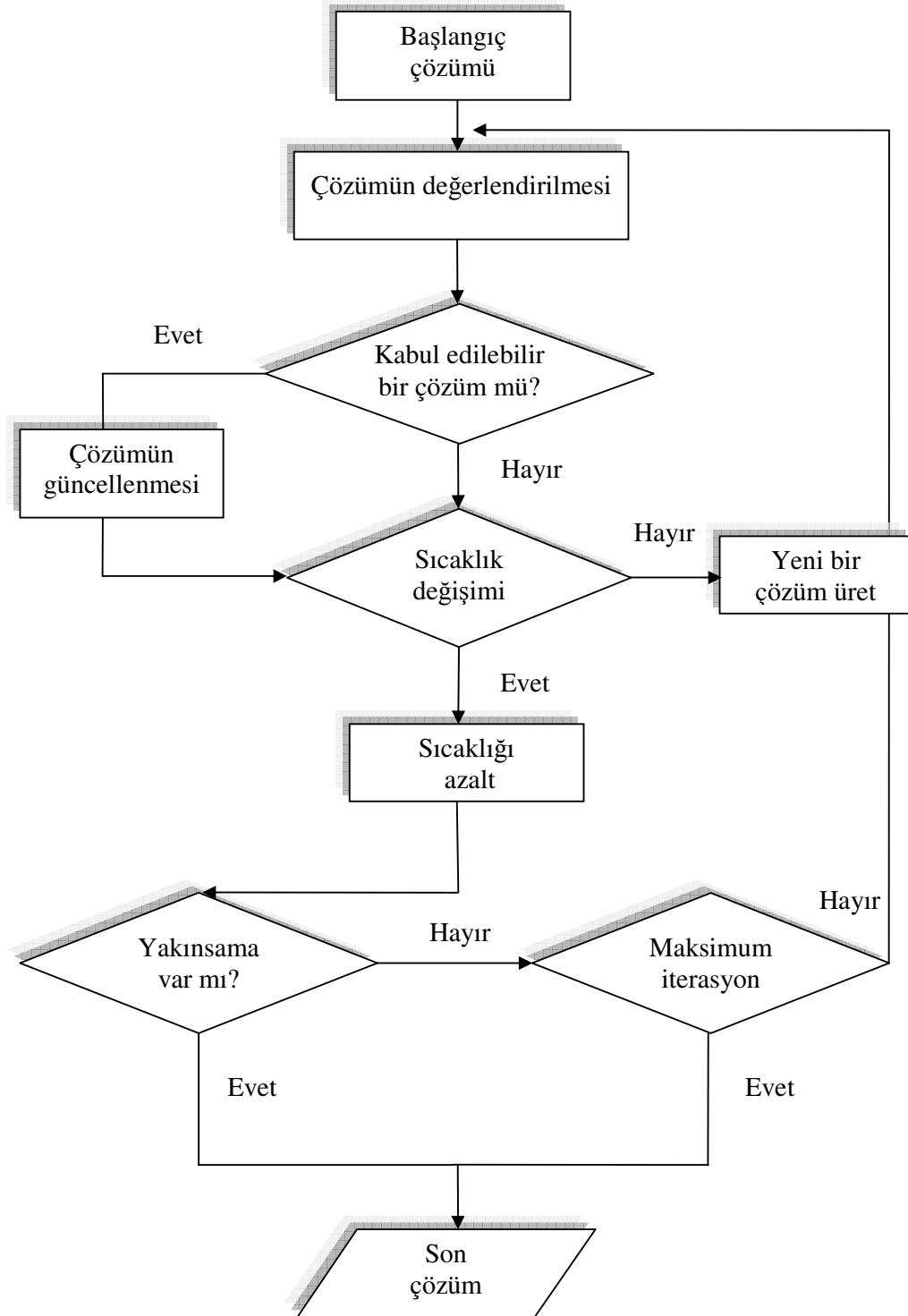
#### 4.1.5 BT Algoritmasının Sonlu Eleman Güncellemesine Uygulanması

Benzetilmiş tavlama algoritmasının sonlu eleman güncellemesine problemine uygulanması başlangıç çözümünün seçilmesi ve amaç fonksiyonunun hesaplanması ile başlar. Yeni veya komsu bir çözüm rastsal olarak oluşturulur ve amaç fonksiyonu tekrar hesaplanır. Amaç fonksiyonundaki değişim değerlendirilir. Bu süreç durdurma kriterine gelinceye kadar devam eder. Benzetilmiş tavlama algoritmasının sonlu eleman güncellemesine uygulanması “Şekil 4.1”de verilen akış diyagramıyla açıklanmıştır.

Sonlu eleman modeli güncellemesi probleminin çözümünde benzetilmiş tavlama algoritmasının kullanılması için bazı kontrol parametrelerin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler şu şekilde tanımlanabilir:

- i. Başlangıç sıcaklığı
- ii. Her sıcaklıktaki iterasyon sayısı
- iii. Soğutma fonksiyonu
- iv. Algoritmayı durdurma kriteri

Başlangıç sıcaklığı, bir girdi parametresidir. Sıcaklık kötü çözümlerin kabul edilme olasılığını kontrol etmek için kullanılır. Mümkün çözümlerin hepsinin değerlendirilebilmesi için başlangıç sıcaklığı ( $T_b$ ) yeterince büyük olmalıdır. Böylece algoritmanın başlangıç safhasında geniş bir arama yapılabilmesi sağlanır. Çözümlerin başlangıç kabul olasılığı ( $P_b$ ) 1'e çok yakın olmalıdır. Bu sayede başlangıç çözümlerin çoğu kabul edilir. Sonlara doğru ise çözümlerin kabul olasılığı ( $P_s$ ) 0'a çok yakın olarak alınır ve amaç fonksiyonunda herhangi bir iyileşme sağlamayan yeni çözümlerin kabul edilmemesi sağlanır.



**Şekil 4.1:** Benzetilmiş Tavlama Algoritması

Sıcaklık, bir önceki çözümden daha kötü olan bir çözümün, kabul edilme olasılığının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Benzetilmiş tavlama algoritmasında, soğutma işlemi yavaş yavaş yapılmalıdır. Bunun için bir sıcaklık azaltma fonksiyonundan yararlanılır. Literatürde önerilen farklı sıcaklık azaltma fonksiyonları vardır. Örnek olarak aşağıda dört tanesi verilmiştir. Burada  $C_{te}$ ; sabit bir sayı,  $\alpha$ ; 0,8 ile 0,99 arasında değişen bir katsayı,  $k$  ise iterasyon sayısını göstermektedir.

i. Aritmetik fonksiyon  $T_k = T_{k-1} - C_{te}$  ; **(4.10)**

ii. Geometrik fonksiyon  $T_k = T_{k-1} * \alpha$  ; **(4.11)**

iii. Ters fonksiyon  $T_k = C_{te} / (1+k)$  ; **(4.12)**

iv. Logaritmik fonksiyon  $T_k = C_{te} / (\text{Log}(1+k))$  ; **(4.13)**

Her bir sıcaklıkta üretilecek çözümlerin sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için literatürde önerilen fonksiyonlardan bazıları şunlardır.  $N_k$  aynı sıcaklıkta üretilecek çözümlerin sayısını göstermektedir.

i. Sabit  $N_k = C_{te}$  ; **(4.14)**

ii. Aritmetik  $N_k = N_{k-1} + C_{te}$  ; **(4.15)**

iii. Geometrik  $N_k = N_{k-1} / \alpha$ ,  $\alpha$  birden küçük sabit bir sayı ; **(4.16)**

iv. Logaritmik  $N_k = C_{te} / (\text{Log}(T_k))$  ; **(4.17)**

v. Üstel  $N_k = (N_{k-1})^{(1/\alpha)}$ ,  $\alpha$  birden küçük sabit bir sayı ; **(4.18)**

Yapılan çalışmada her bir sıcaklıkta üretilecek çözümlerin sayısı problemin boyutlarına bağlı olarak oluşturulmuştur. Bu yaklaşıma göre problemde verilen

eleman sayısının 100 ile çarpımı sonucu bulunan sabit değer, o problem için her bir sıcaklıkta üretilecek çözümlerin sayısını belirlemektedir (Levin ve Lieven, 1998).

Soğutma oranı  $\alpha$  olmak üzere  $T_k = \alpha T_{k-1}$  eşitliği literatürde yaygın olarak kullanılan soğutma fonksiyonudur. Bu çalışmada da geometrik fonksiyon kullanılmıştır. Uygulamalarda  $\alpha$  degeri genellikle 0.8 ve 0.999 arasında alınmaktadır.

Algoritmayı durdurma koşulu ise son parametredir. Durdurma koşulu için literatürde kullanılan birkaç farklı test vardır. Bunlar:

- i. Verilen maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında
- ii. Verilen bir deneme sayısı için, kabul edilen çözümlerin sayısına ulaşıldığı zaman
- iii. Önceden belirlenen bir son sıcaklık değerine ulaşıldığı zaman

Bu çalışmada, bitirme koşulu olarak, önceden belirlenen bir maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığı zaman algoritma sonlanır ve bulunan en iyi çözüm kırıste hasar yerinin belirlenmesinde kullanılır.

## **4.2 Hasar Tespiti**

İnşaat mühendisliği yapılarındaki hasar, doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranları gibi yapının modal parametrelerinde değişikliğe yol açar. Son yıllarda önemli sayıda hasar tespiti teknikleri ortaya çıkarıldı ve bunlar başarılı bir şekilde mekanik, uzay ve inşaat mühendisliği yapılarının çok geniş bir alanında titreşim verilerine uygulanmaktadır.

Deprem vb. sebeplerden hasar görmüş bina ve köprü gibi birçok inşaat mühendisliği yapısında, hasarın yeri ve şiddetinin belirlenmesi günümüzde gittikçe önem kazanmaktadır. Hasar belirlemede yaygın olarak kullanılan yöntemler, mevcut yapıdan karot alınarak yapı malzemesinin dayanımının belirlenmesi gibi yıkıcı yöntemlerin yanısıra ya görsel ya da ultrasonik, x-ray gibi yıkıcı olmayan

yöntemlerdir (Doherty,1987). Fakat bu yöntemler genelde yerel olarak yapının ulaşılması kolay veya görülebilir yerlerine uygulanabilir. Ayrıca bu tür yöntemleri kullanırken daha önceden hasar durumu hakkında yaklaşık olarak bilgi sahibi olunmalıdır. Bundan dolayı modal verileri kullanarak karmaşık yapılarda hasarı global olarak belirlemek amacıyla yeni teknikler öne sürülmüştür. Bu yöntemlerde yapıdaki hasarı belirlemede, frekans ve mod şekilleri gibi yapının dinamik karakteristiklerindeki değişimlerden yararlanılmıştır. Hasarlı ve hasarsız durumdaki yapının karşılaştırılması hasarın büyüklüğünü ve yerel olarak tespitini mümkün kılmaktadır.

Mod şekilleri ve doğal frekanslar hasarın bulunması açısından yaygın olarak kullanılan dinamik parametrelerdir. Doğal frekansların yalnız başına kullanılması, yapının tek bir noktasında ölçülerek kolay bir şekilde bulunması açısından çekicidir. Salawu (1997) ve Bicanic ve Chen (1997) bu konuda araştırmalar yapmış fakat frekansların tek başına yapının dinamik davranışını yansıtmadığı görülmüştür. Bundan dolayı mod şekillerinin de kullanılması öngörülmüştür. Fakat mod şekillerindeki değişimlerin hesaba katılması, birçok yerde ölçülmesinin gerekliliği ve çevredeki titreşimlerden etkilenmeleri dolayısıyla daha zordur.

Pandey ve diğ. (1991) mod şekillerinin türevlerinden yararlanarak hasar belirleme çalışmaları yapmıştır. Bu türevlerin, küçük yer değiştirmelere karşı daha duyarlı olmalarına karşın, doğru bir şekilde hesaplanabilmeleri oldukça zordur. Ayrıca başka bir yaklaşım olarak Stubbs ve Kim (1996), Shi ve diğ. (2000) modal şekil değiştirme enerjisini kullanmışlardır.

Deneysel modal analiz, son 30 yıldır çeşitli araştırmacılar tarafından yapısal sistemlerin durum tespiti/izlemesi ve hasar tanımlanması amacıyla kullanılmaktadır. Ölçüm ve analizlerin tekniğine uygun olarak tasarlanıp uygulanması durumunda bu teknik ile yapısal bir sistemin dinamik özellikleri (frekanslar, sönüm oranları ve modal şekilleri) kestirilebilmektedir. Sistemde oluşacak herhangi bir hasarın sistemin aynı zamanda dinamik özelliklerini değiştireceği gerçeğinden yola çıkılırsa, hasar öncesi ve sonrası dinamik özelliklerin izlenmesi sayesinde yapıda oluşan hasarlar tahribatsız bir biçimde tespit edilebilir.

Deneysel modal verilerle sayısal modal veriler arasındaki uyumu sağlayarak hasarın belirlenmesi genel olarak sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemiyle mümkün olur. Sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemi asıl olarak 1990'ların başlarında gelişmeye başlamıştır. Burada amaç hasarlı ve hasarsız durumdaki yapının doğal frekansları ve mod şekillerinin arasındaki farkın minimize edilerek elastisite modülü gibi malzeme özelliklerindeki veya rijitlikteki değişimin bulunmasıdır. Rijitlik ile modal parametreler arasındaki ilişki, rijitlikteki değişimin modal parametrelerde değişikliğe yol açmasına neden olur. Yapının elemanlarında, malzeme özelliğinin birbirinden bağımsız bir şekilde değişmesi hasarın yerel olarak yeterli bir şekilde saptanmasını kolaylaştırmıştır. Mottershead ve Friswell (1993), Imregun ve Visser (1991) bu konuda önemli çalışmalar yapmıştır. Sonlu eleman güncellemesinde aradığımız değişkenler genelde elastisite modülündeki yüzde olarak azalma miktarını temsil eden katsayılardır. Bu katsayılar sonlu eleman modelimizin hassaslığına bağlı olarak değişir. Her sonlu eleman için bir değişken kullanılır. Bu tezin kapsamında olduğu gibi genelde en küçük kareler problemi şeklinde tanımlanan uygunluk fonksiyonunun minimize edilmesiyle bu değişkenler bulunur. Hangi elemanın elastisite modülünde ne kadar azalma olduğu, hasarın yeri ve derecesini belirlememizi sağlar.

## 5. SAYISAL UYGULAMALAR

### 5.1 Giriş

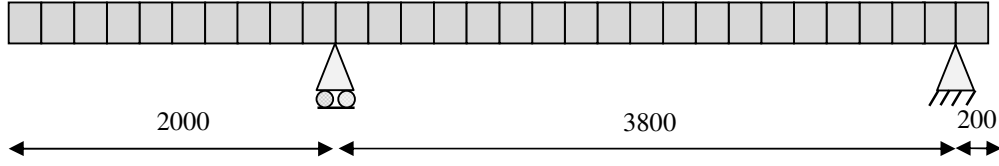
Çalışmanın bu bölümünde, global optimizasyon tekniklerinden benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemiyle geometrik ve malzeme özellikleri bölüm (5.2) de tanımlanan kirişte, farklı hasar senaryolarına göre hasar yeri ve büyüklüğü belirlenmeye çalışılmıştır. Sayısal uygulamalarda kullanılan kirişin deneysel modal verileri için deney yapılmamış, bunun için kirişte yapay hasar senaryoları oluşturularak bu veriler elde edilmiştir.

Sonlu eleman modeli güncellemesindeki benzetilmiş tavlama algoritması için James Spall tarafından Matlab’da geliştirilen bilgisayar kodu kullanılmıştır. Güncelleme için ise Gundes ve diğ. (2007a), Gundes ve diğ. (2007b)’de geliştirilen sonlu eleman modeli güncellemesi algoritmalarının içindeki trust region algoritmasının yerine bu benzetilmiş tavlama algoritması kodu yerleştirilmiştir.

Hasar senaryoları, hasarın düzgün yayılı olarak oluştuğu varsayılarak oluşturulmuştur. Ayrıca bu senaryo için hafif, orta ve ağır hasar olmak üzere üç hasar durumu incelenmiştir. Amaç fonksiyonu için kirişin ilk 10 frekansı ve 8 mod şekli alınmıştır. Mod şekilleri, sadece düşey deplasmanların ölçülebildiği kabulü ile yalnız düşey yöndeki deplasmanları içermektedir. Her durum için MAC değerleri hesaplanmış, frekanslar için de yüzde olarak yakınsamalar grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca hasarı belirleyen düzeltme katsayıları da grafiksel olarak sunulmuştur.

## 5.2 Kirişin Geometrik ve Malzeme Özellikleri

Sayısal uygulamalar için kullanılan kiriş 6 m boyunda, 200x250 ( $h \times b$ ) mm<sup>2</sup> enkesit alanına sahiptir. Sonlu eleman modellemesi için kiriş 30 eşit parçaya bölünmüştür ve “Şekil 5.1” de görüldüğü gibi sınır koşulları  $x=2000$  mm de kayıcı mesnetli  $x= 5800$  mm de sabit mesnetli olarak tanımlanmıştır. Malzeme olarak C25 betonu kullanılmıştır.  $E=30000$  MPa,  $\mu = 0,2$ ,  $\rho = 2500 \text{ kg / m}^3$ ,  $G=12500$ MPa’ dır.



Şekil 5.1: Kiriş sonlu eleman modeli

## 5.3 Yayılı Hasarlı Kirişte Güncelleme

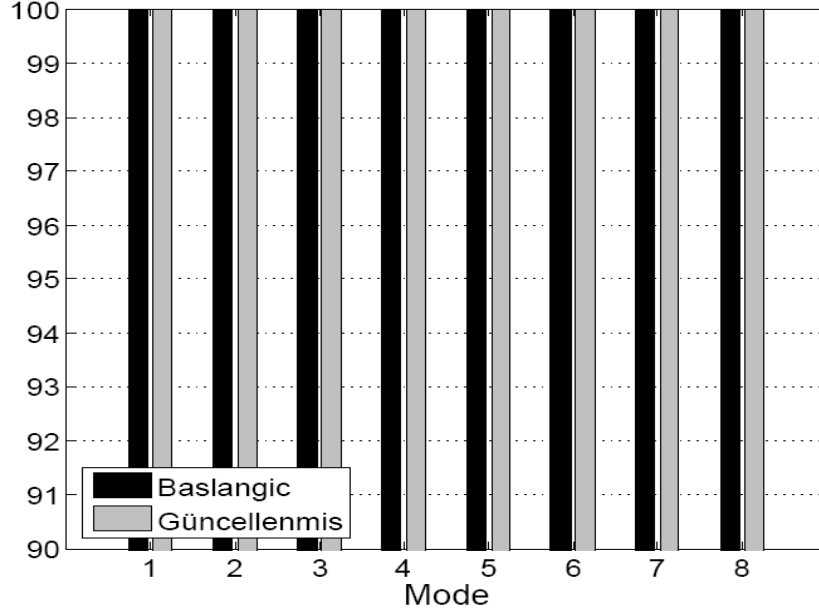
### 5.3.1 Yayılı Hasarlı Kirişte Hafif Hasar

Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumu için “Şekil 5.2” de hasarın yeri ve büyüklüğü gösterilmiştir. Başlangıç sıcaklığı;  $T=250$ , soğutma oranı;  $\lambda=0.90$ , her sıcaklıktaki iterasyon sayısı;  $n_{iter}= 3000$  alınmıştır.

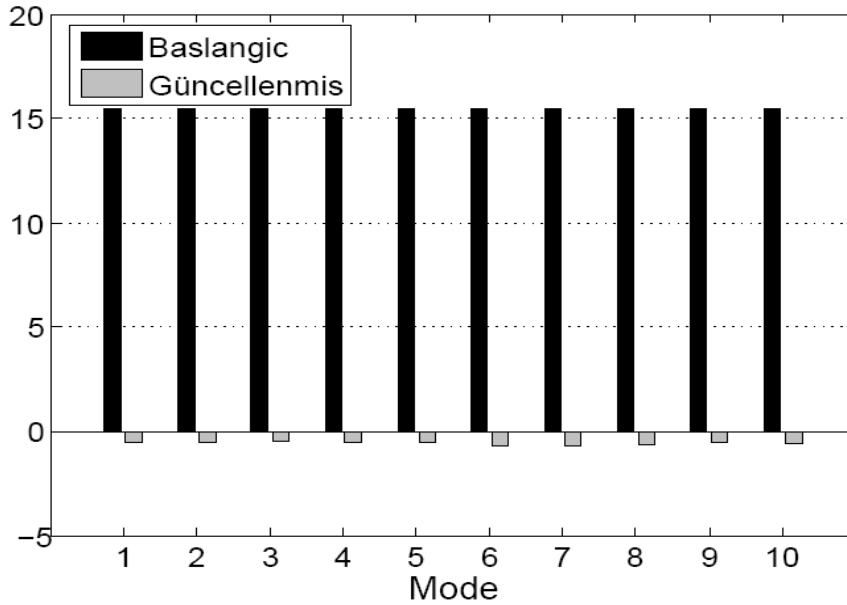


Şekil 5.2: Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumu

“Şekil 5.3” ve “Şekil 5.4” sayısal ve deneysel modların MAC değerlerini ve doğal frekans farklarını göstermektedir. “Şekil 5.5” ise yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumunda elde edilen düzeltme katsayılarının karşılaştırılmasını göstermektedir.

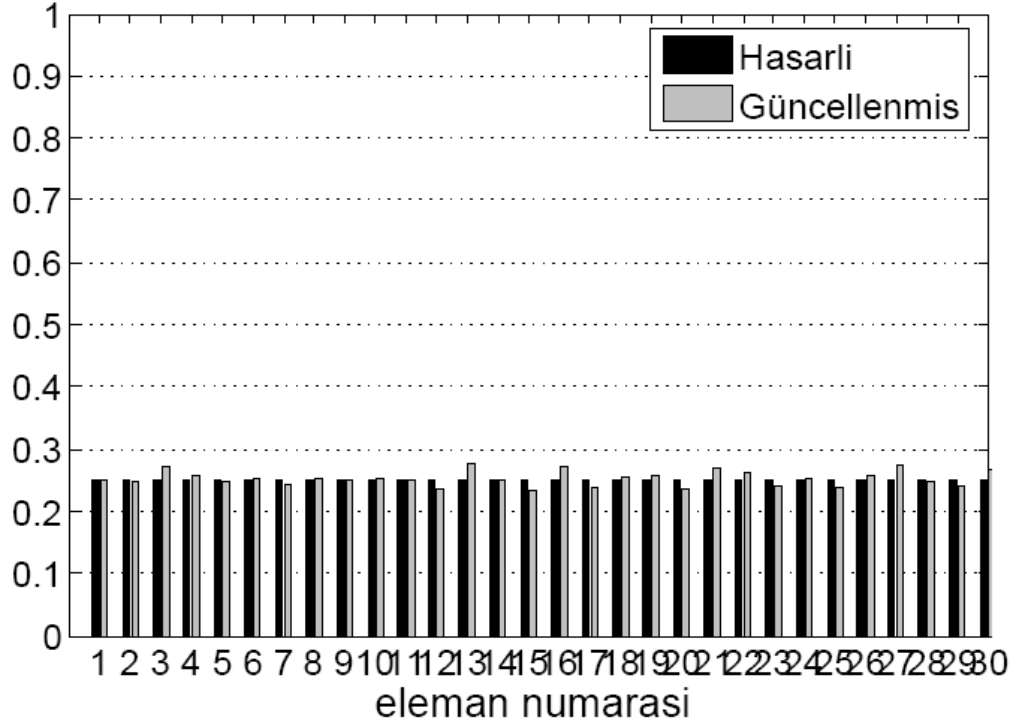


Şekil 5.3: Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumunda ilk 8 mod için MAC değerleri



Şekil 5.4: Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumunda ilk10 doğal frekansın göreceli farkları

“Şekil 5.4” deki göreceli farklar  $\frac{\nu_g - \nu_h}{\nu_h} \%$  şeklinde bulunur ve güncellenen frekanslar ile hasarlı durumdaki frekansların farkıdır.



Şekil 5.5: Yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumunda düzeltme katsayıları

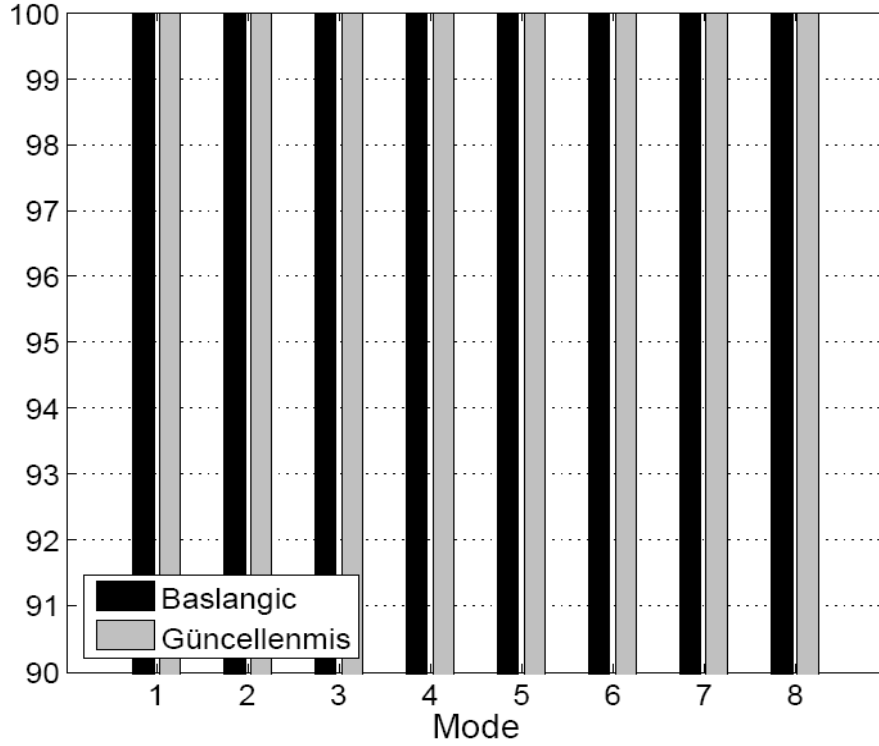
Grafiklerden de anlaşılacağı gibi sonlu eleman modeli güncellemesinde benzetilmiş tavlama algoritması, yayılı hasarlı kirişte hafif hasar durumu için oldukça iyi bir yakınsaklık sağlamaktadır. MAC değerlerinin sonlu eleman güncellemesinden sonra yayılı hasar durumu için karşılaştırılması pek uygun olmasa da, sayısal ve deneysel model arasındaki göreceli doğal frekans farkları, model güncelleme sonunda çok azalmıştır. Frekanslardaki yakınsamanın oldukça iyi olduğu grafikten görülmektedir. “Şekil 5.5” deki düzeltme katsayılarında sonuçlar hasar hakkında yaklaşık olarak bir bilgi edinmemizi sağlayacak yeterliliktedir. Sonuçlar başlangıç parametrelerindeki uygun değişikliklerle iyileştirilebilir.

### 5.3.2 Yayılı Hasarlı Kirişte Orta Hasar

Yayıllı hasarlı kirişte orta hasar durumu için hasar miktarı bir miktar artırılarak “Şekil 5.6” da hasarın yeri ve büyüklüğü gösterilmiştir. “Şekil 5.7” ve “Şekil 5.8” sayısal ve deneysel modların MAC değerlerini ve doğal frekans farklarını göstermektedir. “Şekil 5.9” ise yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda elde edilen düzeltme katsayılarının karşılaştırılmasını göstermektedir.

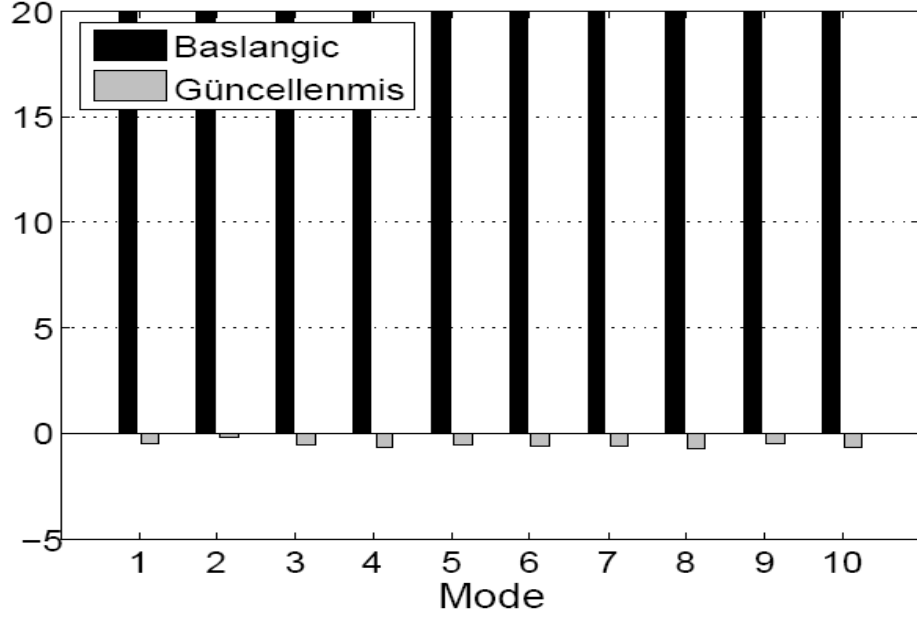


Şekil 5.6: Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumu



Şekil 5.7: Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda ilk 8 mod için MAC değerleri

Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumu için de oldukça iyi bir yakınsaklık sağlanılmıştır. MAC değerleri sonlu eleman güncellemesinden sonra yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumu için neredeyse bire yakındır.



**Şekil 5.8:** Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda ilk 10 doğal frekansın göreceli farkları



**Şekil 5.9:** Yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda düzeltme katsayıları

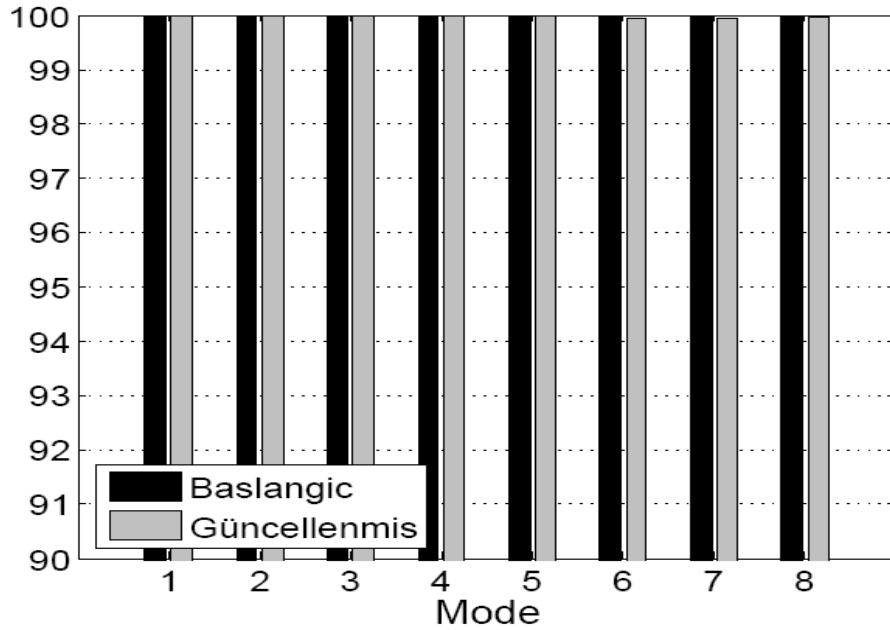
Doğal frekans farklarındaki hata oranları hafif hasarlı kirişe göre biraz artsa da sonuçlar yeterince iyidir. Doğal frekans farklarındaki hata oranı % 2'nin de altındadır. Şekil 5.9'dan görüleceği üzere yayılı hasarlı kirişte orta hasar durumunda düzeltme katsayıları yeterli yakınsaklıktadır.

### 5.3.3 Yayılı Hasarlı Kirişte Ağır Hasar

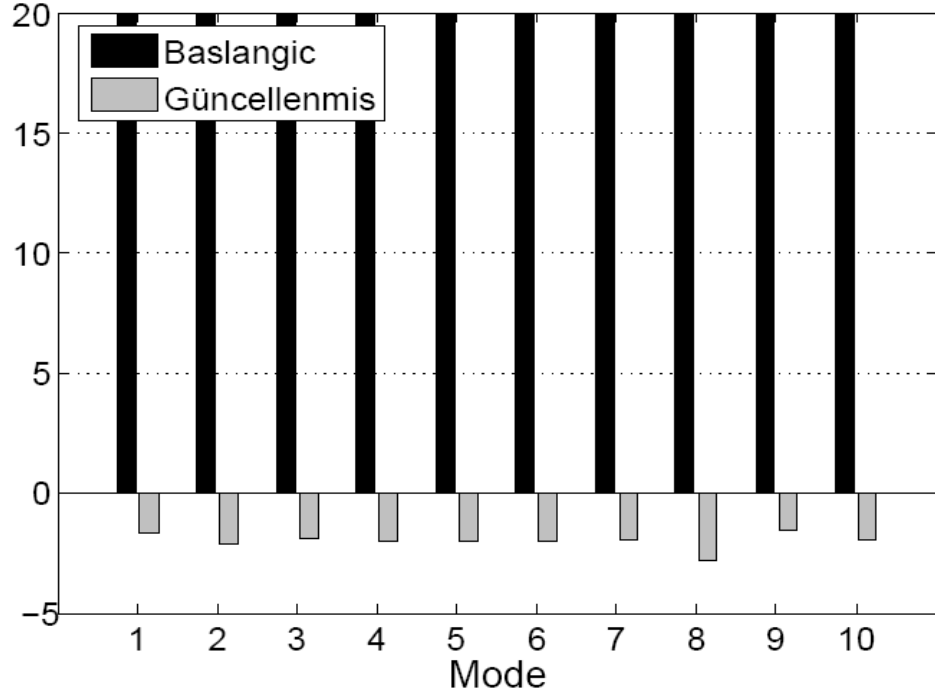
Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumu için hasar miktarı biraz daha arttırılmıştır. “Şekil 5.10” da hasarın yeri ve büyüklüğü gösterilmiştir. “Şekil 5.11” ve “Şekil 5.12” sayısal ve deneysel modların MAC değerlerini ve doğal frekans farklarını göstermektedir. “Şekil 5.13” ise yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda elde edilen düzeltme katsayılarının karşılaştırılmasını göstermektedir.



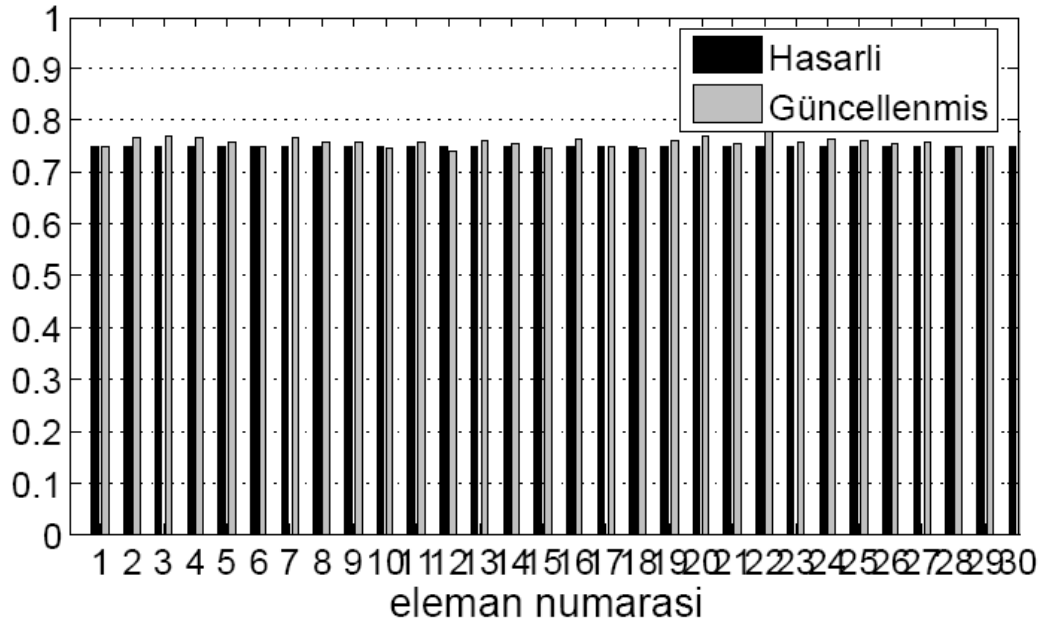
Şekil 5.10: Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumu



Şekil 5.11: Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda ilk 8 mod için MAC değerleri



Şekil 5.12: Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda ilk10 doğal frekansın göreceli farkları



Şekil 5.13: Yayılı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda düzeltme katsayıları

Yayıllı hasarlı kirişte ağır hasar durumunda doğal frekans ve mod şekilleri için yeteri yakınsaklığın sağlandığı görülmektedir. Hafif ve orta hasar durumuna göre göreceli doğal frekans farkları ve MAC değerlerinin yakınsamasında azalma olsa da sonuç tatmin edicidir. Benzetilmiş tavlama algoritmasının yakınsaklığı ağır hasarlı durum için yeterince iyidir.

Kirişteki hasar miktarı arttırıldıkça başlangıç sıcaklığı artırılmış ve her sıcaklıktaki iterasyon sayısı sabit bırakılmıştır. Benzetilmiş tavlama algoritmasında başlangıç sıcaklığı, her sıcaklıktaki maksimum iterasyon sayısı, soğutma oranı gibi başlangıç parametreleri değiştirildiği takdirde farklı sonuçlara ulaşmak mümkündür. Aynı parametrelerin her problemde kullanılması sonuçların aynı yakınsaklıkta olmasını gerektirmez.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada global optimizasyon metotlarından benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak sonlu eleman modeli güncellemesi yöntemiyle bir kirişte hasar yerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Benzetilmiş tavlama algoritması, katıların fiziksel tavlama işlemi ile kombinasyonel optimizasyon problemlerinin çözümü arasındaki benzerliğe dayalı olarak ortaya konmuştur. Fiziksel tavlama, bir katının düşük enerjili durumlarının elde edilmesi sürecidir. Eritilen katının ısısının çok yavaş düşürülmesi ile katının düşük enerjili durumuna ulaşması sağlanır.

Hasar yerinin belirlenebilmesi için, deneysel modal veriler ile sonlu eleman modelinden elde edilen veriler arasında uygunluk sağlanarak yapının bilinmeyen parametreleri saptanmıştır. Bu bilinmeyen parametreler, sonlu elemanlara bölünmüş kirişin her elemanının elastisite modülündeki azalmayı temsil eden düzeltme katsayılarıdır. Düzeltme katsayılarının tespitinin, yapıdaki hasarın yeri ve büyüklüğünün belirlenmesi anlamına geldiği gösterilmiştir. Bunun için kullanılan sonlu eleman güncellemesi yönteminde deneysel ve sayısal frekans ve mod şekillerinin arasındaki farkı tanımlayan bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bu amaç fonksiyonu problemi bir en küçük kareler problemine dönüştürmüş ve bir optimizasyon problemi çözülmüştür. Bu tezde tanımlanan uygunluk fonksiyonu dışında farklı uygunluk fonksiyonları da tanımlamak mümkündür.

Sonlu eleman modeli güncellemesinin ana algoritması olarak global optimizasyon yöntemlerinden benzetilmiş tavlama algoritması kullanılmıştır. En küçük kareler problemi şeklinde ifade edilen uygunluk fonksiyonumuz benzetilmiş tavlama algoritması yöntemiyle minimize edilmiştir. Benzetilmiş tavlama algoritmasının temel basamakları açıklanmış ve verilen sayısal örneklerde bu temel basamaklar kullanılmıştır.

Benzetilmiş tavlama algoritması, iteratif yapısı nedeniyle bölgesel araştırmada başarılıdır. Benzetilmiş tavlama algoritması yerel arama yöntemlerinin yerel bir minimuma ulaştıktan sonra global minimum için daha fazla arama yapmamasından kaynaklanan eksikliğini gidermeye çalışan bir yöntemdir. Bununla birlikte, benzetilmiş tavlama algoritması araştırmanın geçmiş adımlarıyla ilgili bir kayıt tutmadığından ve herhangi bir gelişme olmadığında gelecek çözümleri olasılık tabanlı kurallar ile belirlediği için benzer çözümleri defalarca değerlendirebilmektedir. Ayrıca algoritmanın yakınsama hızı da başlangıç çözümünün bulunduğu noktaya fazlaca bağılı olmaktadır. Eğer başlangıç çözümü global optimumun bulunduğu bölgeye çok uzak olursa, o bölgeye ulaşması çok uzun zaman gerektirebilmektedir.

Benzetilmiş tavlama algoritması uygulamadaki kolaylığı ve yeterli yakınsaklıkta bilgi sunması açısından elverişli bir optimizasyon tekniğidir. Ancak sayılar örneklerde de görüldüğü gibi çok sayıda iterasyon gerektirmekte bu da işlem hacmi ve zamanı açısından bir olumsuzluk meydana getirebilmektedir. Fakat hızlı gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde bilgisayar hızlarındaki artış benzetilmiş tavlama algoritmasını daha elverişli bir teknik haline getirmektedir.

Birçok optimizasyon algoritmasında rastgele seçilen başlangıç değerlerinin sonuçlara etkisi önemli boyutlardayken benzetilmiş tavlama algoritmasında bu büyük bir sorun teşkil etmez. Bununla birlikte uygulamalarda da görüleceği gibi her problem için başlangıç sıcaklığı ve iterasyon sayısı gibi benzetilmiş tavlama algoritmasının temel parametreleri her problem için en uygun değeri bulmak açısından değiştirilmiştir. Bununla ilgili temel bir kriter mevcut değildir. Sayısal uygulamalarda ele alınan hasar senaryolarında benzetilmiş tavlama algoritmasının yakınsaklığı incelenmiş ve oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Üç farklı hasar senaryosu için de benzetilmiş tavlama algoritmasının sonlu eleman güncelleme yöntemiyle hasar belirlemede yakınsaklığı elde edilen sonuçlar açısından yeterlidir. Ancak örneklerden de anlaşılacağı gibi her örnek için farklı iterasyon sayısı, başlangıç sıcaklığı ve soğutma oranı kullanılmıştır ve farklı problemler için hangi parametrelerin uygun olduğunu belirlemek için tam bir kriter verilmemiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara birçok parametrenin etkisi söz konusu olduğundan sonuçların iyileştirilmesi mümkündür.

## **KAYNAKLAR**

- Aarst, E.H.L. and Korst, J.H.M.**, 1989. Simulated Annealing and Boltzmann Machines, John Wiley & Sons, New York.
- Allemang, R.J. and Brown, D.L.**, 1982. A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis, *1st International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, November 1982, 110-116
- Arora Jasbir S.**, 1989. Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill Book Company, New York
- Balling, R.J.**, 1991. Optimal steel frame design by simulated annealing, *Journal of Structural Engineering*, **117**, 1780-1795
- Baruch M. and Itzhack B.**, 1979. Optimal weighted orthogonalization of measured modes, *AIAA Journal*, **16**, 346-351
- Bennage, W.A. and Dhingra, A.K.**, 1995. Single and multiobjective structural optimization in discrete-continuous variables using simulated annealing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **38**, 2753-2773
- Berman A. and Nagy E.J.**, 1983. Improvement of large analytical model using test data, *AIAA Journal*, **21**, 1168-1173.
- Bicanic, N. and Chen, H.**, 1997. Damage identifications in frame structures using natural frequencies, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **40**, 4451-4468
- Brownjohn, J.M.W. and Xia, P.Q.**, 2000. Dynamic assesment of curved cable-stayed bridge by model updating, *Journal of Structural Engineering*, **126**, 252-260
- Caesar, B. and Peter, J.**, 1987. Direct update of dynamic mathematical models from modal test data, *AIAA Journal*, **25**, 1494-1499
- Doubling, S.W. and Farrar, C.R.**, 1997. Using statistical analysis to enhance modal-base damage identification, *Proceeding of DAMAS 97*, Sheffield, UK, 199-210

- Dowsland, K.A.**, 1995. Simulated Annealing. In Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, McGraw-Hill, New York
- Eglese, R.W.**, 1990. Simulated Annealing: A Tool for Operational Research”, *European Journal of Operational Research*, **34**, 600-612
- Elperin, T.**, 1988, Monte carlo structural optimization in discrete variables with annealing algorithm, *International Journal for Numerical methods in Engineering*, **26**, 815-821
- Ewins, D.J.**, 1984. Modal Testing: Teory and Practice, Wiley, New York
- Fouskakis, D. And Draper, D.**, 2002. Stochastic Optimization: a Review, *International Statistical Review*, **70**, 315–349
- Friswell, M.I. and Mottershead J.E.**, 1995. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Friswell, M.I., Inman, D.J. and Pilkey, D.F.**, 1998. The direct updating of damping and stiffness matrices, *AIAA Journal*, **36**, 491-493
- Friswell, M.I., Mottershead, J.E. and Ahmadian, H.**, 1998. Combining subset selection and parameter constraints in model updating, *J. Vib.and Acous.*, **120**, 854-859
- Fritzen, C.P., Jennewein, D. and Kiefer, T.**, 1998. Damage detection based on model updating methods, *Mechanical System and Signal Processing* , **12**, 163-186
- Fritzen C.P and Bohle K.**, 1999. Identification of damage in large scale structures by means of measured FRFs-Procedure and application to the I40 highway bridge, *proceeding of DAMAS 99*, Dublin, Ireland, 310-319
- Gao, Y. and Spencer, B.F.**, 2002. Damage localization under ambient vibration using changes in flexibility, *Eart. Eng. Eng. Vib.*, 1. 136-144
- Ge, M. and Lui E.M.**, 2005. Structural damage detection using system dynamic properties, *Computers and structures*, **83**, 2185-2196
- Gill, P.E., Murray, W. and Wright, M.H.**, 1997. Practical Optimization, Akademic Press Limited, San Diego
- Goldberg, D.E.**, 1989. Genetic Algorithm in Search, optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing, Mass.

- Gundes, P., Reynders, E. and De Roeck, G.,** 2007a. An improved finite element model updating method by the global optimization technique 'Coupled Local Minimizers' *Computers and Structures*, accepted in 2007
- Gundes, P., Reynders, E. and De Roeck, G.,** 2007b. Sensivity based finite element model updating using constrained optimization with a trust region algorithm, *Journal of Sound And Vibration*, **305**, 211-225
- Hao, H. and Xia, Y.,** 2002. Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithms, *Journal of Computing in Civil Engineering*, **16**, 222-229
- He, R.S. and Hwang, S.F.,** 2006. Damage detection by an adaptive real-parameter simulated annealing genetic algorithm, *Computers and Structures*, **84**, 2231-2243
- Heylen, W.,** 1987. Optimization of model matrices of mechanical structures using experimental modal data, *PhD Thesis*, K. U. Leuven, Belgium
- Holland, J.,** 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Michigan
- Imregun, M. and Visser, W.J.,** 1991. A review of modal updating techniques, *The shock and Vibration Digest*, **23**, 9-20
- Jhonson, S., Aragon, C., Mccgeoch, L. and Schevon, C.,** 1989. Optimization By Simulated Annealing: An Experimental Evaluation, *Operations Research*, **37**, 865-892
- Kalınlı, A.,** 2003. Eleman Ağıının Benzetilmiş Tavlama Algoritması Kullanarak Eğitilmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **19**, 28-37
- Karaboga, D.,** 2003. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Atlas-Nobel Yayınları, İstanbul
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P.,** 1983. Optimization by simulated annealing, *Science*, **220**, 671-680
- Kosmatka, J.B. and Ricles, J.M.,** 1999. Damage detection in structures by modal vibration characterization, *Journal of Structural Engineering*, **125**, 1384-1392

- Kwon, K.S. and Lin, R.M.**, 2004. Frequency selection method for FRF-based model updating, *Journal of Sound and Vibration*, **278**, 285-306
- Kwon, K.S. and Lin, R.M.**, 2005. Robust finite element model updating using Taguchi method, *Journal of Sound and Vibration*, **280**, 63-76
- Levin, R.I. and Lieven N.A.J.**, 1998. Dynamic finite element model updating using simulated annealing and genetic algorithms, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **12**, 91-120
- Lin, R.M. and Ewins, D.J.**, 1994. Analytical model improvement using frequency response functions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **8**, 437-58
- Lin, R.M., Lim, M.K. and Du, H.**, 1995. Improved inverse eigensensitivity method for structural analytical model updating, *Journal of Vibration and Acoustics*, **117**, 192-198
- Lu, Y. and Tu, Z.**, 2005. Dynamic model updating using a combined genetic-eigensensitivity algorithm and application in seismic response prediction, *Earthquake Engineering and structural Dynamic*, **34**, 1149-1170
- Maeck J., Abdel Wahab M., Peeters B., De Roeck G., De Visscher J., De Wilde W.P., Ndambi J.-M., Vantomme J.**, 2000. Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination, *Engineering Structures*, **22**, 1339-1349
- Maia N.M.M., Silva J.M.M., Almas E.A.M.**, 2003. Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **17**, 489-498
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A. and Teller, E.**, 1953. Equation of the state calculation by fast computing machines, *Journal of Chemical Physics*, **21**, 1087-1092
- Mottershead, J.E. and Friswell, M.I.**, 1993. Model updating in structural dynamics: a survey, *Journal of Sound and Vibration*, **167**, 347-375
- Natke, H.G. and Cempel, C.**, 1997. Model-aided diagnosis based on symptoms, *Proceedings of DAMAS 97*, Sheffield, UK, 363-374
- Nocedal, J. and Wright, S.J.**, 1999. Numerical Optimization, Springer, New York

- Nolitolela, N.G., Penny, J.E.T. and Friswell, M.I.**, 1992. A mass or stiffness addition technique for structural parameter updating, *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, **7**, 157-168
- Pandey A.K., Biswas M.**, 1994. Damage detection in structures using changes in flexibility, *Journal of Sound and Vibration*, **169**, 3-17
- Pandey, A.K., Biswas, M. and Saman, M.M.**, 1991. Damage detection from changes in curvature mod shapes, *Journal of Sound and Vibration*, **145**, 321-332
- Peeters B.**, 2000. System identification and damage detection in civil engineering, *Ph.D. dissertation*, Structural Mechanics, Civil Engineering Department, K.U.Leuven, Belgium
- Peeters B., De Roeck G.**, 2000. Reference based stochastic subspace identification in civil engineering, *Inverse Problems in Engineering*, **8**, 47-74
- Perrera, R. and Torres, R.**, 2005. Structural damage detection via modal data with genetic algorithms, *Journal of Structural Engineering*, **132**, 1491-1501
- Pham, D.T., and Karaboga, D.**, 2000. Intelligent Optimization Techniques, Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing And Neural Networks, Advanced Manufacturing Series, Springer-Verlag, London
- Ratnam, C. and Rao, P.**, 2003. Identification of damage in structures using genetic algorithms, *Journal of The Institution of Engineers*, **84**, 154-160
- Rao, S.S.**, 1996. Engineering Optimization- Theory and Practice, John Wiley & Sons, New York
- Rytter A.**, 1993. Vibration based inspection of civil engineering structures, *Ph.D. Dissertation*, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark
- Salawu, O.S.**, 1997. Detection of structural damage through changes in frequency: A Review, *Engineering Structures*, **19**, 718-723
- Shi, Z.Y., Law, S.S. and Zhang L.M.**, 2000. Structural damage detection from modal strain energy changes, *Journal of Engineering Mechanics*, **126**, 1216-1223

- Spall, J.C.**, 2003. Introduction to Stochastic Search and Optimization, John Wiley & Sons, New York
- Spaulding, K.A.**, 1998. Natural Metaphoric Optimization Algorithms, *Master of science Engineering*, The University of Texas at Austin, United States
- Sridhar, J., Rajendran, C.**, 1993. Scheduling in CMS: a simulated annealing approach, *International Journal of Production Research*, **34**, 126- 215
- Stubbs, N. and Kim J.T.**, 1996. Damage localization in structures without baseline modal parameters, *AIAA J.*, **34**, 1644-1654
- Suji D., Natesan S.C., Murugesan R. and Sanjai P. R.**, 2008. Optimal design of fibrous concrete beams through simulated annealing, *Asian Journal of Civil Engineering*, **9**, 193-213
- Teughels, A., Maeck, J. and De Roeck G.**, 2002. Damage assesment by FE model updating using damage functions, *Computers and Structures*, **80**, 1869-1879
- Teughels, A. and De Roeck G.**, 2004. Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating, *Journal of Sound and Vibration*, **278**, 589-610
- Teughels, A.**, 2003. Inverse modelling of civil engineering structures based on operational modal data, *PhD Thesis*, KU, Leuven, Belgium
- Teughels A., De Roeck G., Suykens J.A.K.**, 2002. CLM, a global optimisation method applied to FEM updating, Proceedings of the 5th European Conference on Structural Dynamics: Eurodyn 2002, München, Germany, 1555-1560
- Vestroni, F. and Capecchi, D.**, 2000. Damage detection in beam structures based on frequency measurement, *Journal of Engineering Mechanics*, **126**, 761-768
- Wei, F.S.**, 1990. Structural dynamic model improvement using vibration test data, *AIAA Journal*, **28**, 175-177
- Wong, K.P., Steven, R.M., Feng, D. and Fulham M.J.**, 2002. Estimation of Input Function and Kinetic Parameters Using Simulated Annealing: Application in a Flow Model, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **49**, 707-713

**Yu, E., Wallace, J.W. and Taciroglu, E.,** 2006. Parameter identification of framed structures using an improved finite element model updating method-Part II: Application to experimental data, *Earth. Eng. and Struc. Dynamic*, **36**, 641-660

## **ÖZGEÇMİŞ**

Yılmaz AVCI 1980 yılının Mayıs ayında Adıyaman’da doğdu. İlkokulu Hobyarlı Ahmet Paşa İlköğretim okulunda, ortaokulu ise Davutpaşa Lisesi’nde tamamlamıştır. Eminönü Cibali Lisesi’nden mezun olduktan sonra 2001 yılında, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazanmış, 2005 yılında da mezun olmuştur. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda eğitimini sürdürmektedir.