

Kafes Sistemlerin Aşamalı Göçme Analizi

Doğuşcan Aras

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2024



Progressive Collapse Analysis of Truss Systems

Doğuşcan Aras

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

January 2024

Kafes Sistemlerin Aşamalı Göçme Analizi

Doğuşcan Aras

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Hakan Özbaşaran
İkinci Danışman: Prof. Dr. Yusuf Cengiz Toklu

Ocak 2024

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Doğuşcan Aras**'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Kafes Sistemlerin Aşamalı Göçme Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hakan Özbaşaran

İkinci Danışman : Prof. Dr. Yusuf Cengiz Toklu

Yüksek Lisans Savunma Jürisi:

Üye: Danışman Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hakan EROL

Üye: Doç. Dr. İlyas Devran ÇELİK

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Hakan Özbaşaran ve Prof. Dr. Yusuf Cengiz Toklu danışmanlığında hazırlamış olduğum “Kafes Sistemlerin Aşamalı Göçme Analizi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 19/01/2024

Doğuşcan Aras

İmza

ÖZET

Kafes yapı sistemleri, mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılan bir taşıyıcı sistem türüdür. Bu sistemler, genellikle çelik veya ahşap gibi malzemelerden inşa edilir ve iki veya üç boyutlu bir kafes şekli oluştururlar. Bu sayede yükler homojen bir şekilde dağıtılır; büyük açıklıkların geçilmesine imkân tanır. Bu sistemlerin doğru bir şekilde analiz edilmesi ve tasarlanması büyük öneme sahiptir. Yapıların aşamalı göçmesi, yerel bir hasarın başlangıcında meydana gelen çöküşün, yapının diğer bölümlerine yayılarak genel bir çöküşe neden olma olayını ifade eder. Bu genellikle patlama ve yangın gibi dış etkenler sonucu meydana gelir. Gradyan İniş (Gradient Descent), matematiksel optimizasyon problemlerinde kullanılan basit ve iteratif bir algoritmadır. Bir fonksiyonun yerel minimum veya maksimum değerlerini bulma amacı güder. Algoritma, fonksiyonun gradyanını hesaplayarak mevcut konumdan daha düşük bir fonksiyon değerine doğru adım atmaya çalışır. Bu çalışma, enerji minimizasyonu yöntemi ve Gradient Descent algoritması kullanılarak kafes sistemlerin aşamalı göçme analizinin gerçekleştirilmesi konusunu ele almaktadır. Bu çalışmada önerilen prosedür, üzerinde yapılacak küçük değişiklikler ile kafes sistemlerin doğrusal olmayan analizi gibi çok sayıda başka uygulama için uygun hale getirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Aşamalı göçme, Aşamalı göçme analizi, Gradyan azalma, Kafes sistemler, Toplam potansiyel enerji minimizasyonu

SUMMARY

Truss structural systems represent a prevalent category of load-bearing frameworks extensively employed in engineering projects. Typically fashioned from materials such as steel or wood, these systems manifest as two or three-dimensional truss configurations. This structural design facilitates the homogeneous distribution of loads and affords the capability to span considerable openings. The precise analysis and design of such systems carry paramount significance. Progressive collapse within structures denote the phenomenon wherein the onset of collapse, triggered by localized damage, propagates to other segments of the structure, culminating in a comprehensive failure. This occurrence is frequently precipitated by external factors such as explosions or fires. Gradient Descent is a rudimentary and iterative algorithm entrenched in mathematical optimization, with the principal objective of discerning local extremal values of a function. The algorithm diligently computes the function's gradient and endeavors to navigate towards a reduced function value from the prevailing position. The present investigation delves into the analysis of progressive collapse in truss systems by implementing the energy minimization method and the Gradient Descent algorithm. The procedural framework proposed herein holds adaptability for a myriad of alternative applications, including the nonlinear analysis of truss systems, contingent upon nuanced adjustments.

Keywords: Gradient descent, Progressive collapse, Progressive collapse analysis, Total potential energy minimization, Truss systems.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimime başladığım 2020 senesinden itibaren bana her konuda katkısı olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN'a tez çalışmalarına ve hayatıma olan kıymetli katkılarından dolayı ve en önemlisi hayatına dokunduğu herkese gerçek bir rol model olduğu için teşekkür ederim.

Beni öğrencisi olarak kabul etmesinden dolayı şeref duyduğum ikinci danışmanım Prof. Dr. Y. Cengiz TOKLU'ya değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatın her aşamasında desteklerini her zaman hissettiğim beni bugünlere getiren annem Nurhayat ARAS'a ve babam Sezai ARAS'a teşekkür ederim. Sizlere olan minnetim, sevgim ve saygım sonsuzdur iyi ki varsınız.

Hem kardeşim hem en yakın arkadaşım Ece Nur ARAS'a beni hiçbir zaman yalnız bırakmadığı için teşekkür ederim.

Tez yazım sürecimdeki yardımları ve katkıları için Sayın Özgür Eren ZARİÇ'e teşekkürü borç bilirim.

Yüksek Lisans ders sürecimde derslere katılımım için gereken esneklikleri gösteren iş yerindeki amirim Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü Teftiş Kurulu Başkanı Başmüfettiş Erdinç KAHRAMAN'a değerli destekleri için teşekkür ederim. Ayrıca tezime olan katkılarından dolayı Başmüfettiş Dr. Tolga AVŞAR'a ve Başmüfettiş Kerem DELİGÖZ'e teşekkür ederim.

Tez ve ders dönemim süresince iş yerinde bana esnek bir ortam yaratan mesai ve oda arkadaşlarım Müfettiş Erhan PALA'ya, Müfettiş Hakan ÇAĞLAROĞLU'na ve Müfettiş Sedat KALKAN'a teşekkür ederim.

Hayatın getirdiği her serüvende tam da yanımda olan değerli arkadaşlarım Serdar AÇIKYILDIZ'a, Pırıl MADASOĞLU'na, Hazal Nur BEKTAŞ'a, Sinan AYGEN'e, Emre UCA'ya, Hasan ÇAKIR'a, Mehmet Ali ERDEM'e, Fatih DEMİRİSOY'a ve Doç. Dr. Murat AYHAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET | vi |
| SUMMARY | vii |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | x |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xi |
| 1. GİRİŞ ve AMAÇ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 7 |
| 3. YÖNTEM | 14 |
| 3.1. Python Programlama Dili..... | 14 |
| 3.2. Kullanılan Kütüphaneler..... | 14 |
| 3.3. Gradyan Azalma Algoritması..... | 15 |
| 3.4. Python Betiğinin Oluşturulması..... | 17 |
| 3.5. Algoritmanın Python Betiğine Tanıtılması..... | 21 |
| 3.6. Kullanıcı Tarafından Belirlenen Değerler ve Kısıtları..... | 22 |
| 3.7. Verilerin Kaydedilmesi..... | 24 |
| 4. SAYISAL DENEYLER | 25 |
| 4.1. Bir Numaralı Örnek Kafes Sistem..... | 25 |
| 4.2. İki Numaralı Örnek Kafes Sistem..... | 27 |
| 4.3. Üç Numaralı Örnek Kafes Sistem..... | 30 |
| 4.4. Dört Numaralı Örnek Kafes Sistem..... | 32 |
| 5. BULGULAR VE TARTIŞMA | 34 |
| 5.1. Bir Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları..... | 34 |
| 5.2. İki Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları..... | 37 |
| 5.3. Üç Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları..... | 41 |
| 5.4. Dört Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları..... | 44 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER | 48 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ | 52 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 2.1. Gerilme – deformasyon diyagramı (Toklu, 2004)..... | 11 |
| 4.1. Bir numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm..... | 26 |
| 4.2. İki numaralı örneğe ait genel geometrik görünümü | 28 |
| 4.3. Üç numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm | 31 |
| 4.4. Dört numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm | 32 |
| 5.1. Bir numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm..... | 35 |
| 5.2. Sistemin 81.iterasyon sonundaki görüntüsü | 35 |
| 5.3. Sistemin 408.iterasyon sonundaki görüntüsü | 36 |
| 5.4. Bir numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği..... | 37 |
| 5.5. Sistemin 165.iterasyon sonundaki görüntüsü | 38 |
| 5.6. Sistemin 330.iterasyon sonundaki görüntüsü | 39 |
| 5.7. İki numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği | 39 |
| 5.8. Sistemin 470.iterasyon sonundaki görüntüsü | 42 |
| 5.9. Sistemin 945.iterasyon sonundaki görüntüsü | 43 |
| 5.10. Üç numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği | 44 |
| 5.11. Sistemin 820.iterasyon sonundaki görüntüsü | 46 |
| 5.12. Sistemin 1642.iterasyon sonundaki görüntüsü | 46 |
| 5.13. Dört numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği | 47 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

| | |
|---|----|
| 1.1 Analiz prosedürü özeti (Marjanishvili, 2004)..... | 5 |
| 3.1 Kullanılan kütüphaneler | 14 |
| 4.1 Bir numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri | 27 |
| 4.2 İki numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri (a)..... | 29 |
| 4.3 İki numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri (b) | 30 |
| 4.4 Üç numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri..... | 31 |
| 4.5 Dört numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri | 33 |
| İki numaralı örnek kopan çubuk listesi | 40 |
| 5.2 Üç numaralı örnek kopan çubuk listesi | 42 |
| 5.3 Dört numaralı örnek kopan çubuk listesi..... | 45 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u> |
|------------------------|--|
| Π | Toplam potansiyel enerji |
| U | Sistemin şekil değiştirme enerjisi |
| W | Sistem üzerindeki kuvvetlerin yaptığı iş |
| e | Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu |
| σ | Gerilme |
| ε | Birim şekil değiştirme |
| E | Elastisite modülü |
| P_i | i. düğümde bulunan dış kuvvet |
| u_i | i. düğümün yer değiştirmesi |
| ΔL | Elemanın uzama miktarı |
| L_0 | Elemanın ilk boyu |
| L_j | j. elemanın boyu |
| A_j | j. elemanın kesit alanı |
| V | Cismin hacmi |
| N_m | Yapı elemanı sayısı |
| N_p | Sistem üzerindeki yüklerin sayısı |
| k_F | Yük arttırma faktörü |
| ε_{cr} | Kritik birim şekil değiştirme değeri |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| Kısaltmalar | Açıklama |
|--------------------|---|
| ASCE | American Society of Civil Engineers |
| US | United States |
| US GSA | United States General Services Administration |
| TPO | Toplam Potansiyel Optimizasyonu |
| FEMA | Federal Emergency Management Agency |

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Çağımızın medeniyet yapısının temel taşı olan şehirleşme süreci, çok katlı ve geniş açıklıklı yapıların karmaşık yapısal öğeler kullanılarak inşa edildiği mühendislik başarıları ile devam etmektedir. Bu yapılar, servis ömürleri boyunca sıklıkla aşırı yüklemelere maruz kalmaktadırlar. Bu yüklemeler, deprem, kasırga, araç çarpması veya insan kaynaklı hatalar gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. Bu tür olaylar, ilk etapta yapısal elemanlarda yerel deformasyonlara ve sonrasında yerel hasarlara yol açabilir. Ancak, bu yerel hasarlar zamanla yapının genelinde yapısal bütünlüğün bozulmasına sebebiyet verebilir. Yerel bir hasarın tetiklediği ve yapının genelinde meydana gelen bu zincirleme süreç, aşamalı göçme olarak tanımlanmaktadır (Adam vd., 2018). Aşamalı göçme fenomenine dikkatleri çeken ve akademik araştırmaların başlamasına önyak olan vaka, Londra'da bulunan Ronan Point apartmanının çöküşüdür. Bu olay, medyada geniş yankı uyandırmıştır. Olay, apartmanın 18. katında bulunan köşe dairede yaşanan patlama ile tetiklenmiştir. Söz konusu dairede ikamet eden bir kadın, gaz ocağını yakmak amacıyla kibrit çaktığında, mutfakta mevcut olan gaz kaçağı nedeniyle birikmiş gazın ani bir patlamaya yol açtığı tespit edilmiştir. Bu patlama, köşe duvarlardan birinin yıkılmasına sebep olmuş ve bu yıkılış, üst katlardaki dört diğer dairenin köşe duvarlarının destekten yoksun kalıp çökmesine neden olmuştur. Bu zincirleme etki, binanın aşamalı olarak aşağıya doğru çökmesine yol açmış, sonuçta alt kattaki taşıyıcı duvarlar artan yüklemelere dayanamayarak çökmüş ve bu süreç binanın sol köşesinin tamamen göçmesi ile sonuçlanmıştır. (Derseh ve Mohammed, 2023). Aşamalı göçme fenomeni üzerine derinlemesine ve geniş kapsamlı araştırmaların artmasına zemin hazırlayan kritik olay, şüphesiz 11 Eylül saldırılarıdır. Teröristler tarafından ele geçirilen bir uçanın, New York'taki Dünya Ticaret Merkezi kulelerinin üst bölümlerine çarpması sonucu, kulelerin üst katlarındaki taşıyıcı sistemlerin aşırı ısı etkisiyle erimesi gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının üst katlarındaki döşemelerin ardışık olarak çökmesine ve her bir katın taşıyıcılarında artan yüklemeye yol açmıştır. Sonuç itibariyle, her iki kule de tamamen çökmüştür. Bu iki olay, can ve mal kayıpları açısından büyük trajedilere sebep olmuş, çevresel ve küresel ölçekte derin etkiler yaratmıştır. Bu tür olaylar mühendislik disiplinde aşamalı göçmenin önemini artırmış, bilim insanları tarafından aşamalı göçme olgusunun hesaplama ve analiz süreçlerine dahil edilmesi için çalışmalar yapılmıştır.

Aşamalı göçme, bir yapı elemanının geometrisindeki ani yerel değişiklikler sonucu ortaya çıkan ve onu çevreleyen elemanların taşıma kapasitelerini aşan dinamik iç kuvvetlerle karakterize edilen, dinamik ve karmaşık bir süreçtir. Yapının, oluşan deformasyonları enerji emilimi yoluyla tolere edebilmesi halinde stabilizasyon sağlanabilir. Ancak, yapı bu deformasyonları tolere edemezse çöküş gerçekleşir. Genellikle, aşamalı çöküş olayları saniyeler içinde meydana gelmektedir. (Marjanishvili, 2004).

Bilim insanları, aşamalı göçme fenomenini kapsamlı bir şekilde analiz ederek, bu karakteristiğin altında yatan çeşitli yıkılma tiplerini sınıflandırmış ve altı farklı yıkılma modeli tanımlamışlardır. Bu yıkılma tipleri; Pancake (Katmanlı Yıkılma), Zipper (Fermuar Tipi Yıkılma), Domino (Domino Etkisi), Section (Bölümlü Yıkılma), Instable (Kararsız Yıkılma) ve Mix (Karışık Yıkılma) olarak adlandırılmıştır. Araştırmacılar, bu sınıflandırmanın ardından, her bir yıkılma tipinin hangi özgün mekanizmalar sonucunda ortaya çıktığını detaylı bir şekilde inceleyerek aşamalı göçme mekanizmaları üzerine bir sistematiği ortaya koymaya çalışmışlardır. Bu çaba, aşamalı göçme olaylarının daha iyi anlaşılmasına ve önlenmesine yönelik önemli bir adım olmuştur (Derseh ve Mohammed, 2023).

Ülkeler, aşamalı göçmeyi önlemek için yapısal tasarım standartlarına ek kriterler getirerek önlemler almaya çalışmışlardır. Amerika Birleşik Devletleri öncülüğünde, Birleşik Krallık, Avrupa ülkeleri, Çin, Kanada ve Avustralya bu konuda tasarım kriterleri geliştirmişlerdir. Ülkelerin tasarım kriterleri ve yaklaşımları farklı olsa da her biri aşamalı göçmeyi mekanik olarak ele alış şeklinde benzerlikler taşımaktadır (Adam vd., 2018).

Byfield vd., (2014) yaptıkları çalışmalarda tasarım kriterlerini üç temel metotta ele almışlardır. Bu metotlar sırasıyla; Yapı Elemanlarını Bağlama Metodu, Alternatif Yol Metodu ve Yerel Direnç Artırma Metodudur.

Yapı Elemanlarını Bağlama Metodu, tasarım standartlarında, örneğin ASCE 7, British Standarts, FEMA Standarts ve Eurocode 1 gibi, kendine yer bulmuştur. Bu

standartlarda vurgulanan temel prensip, anormal bir yükleme durumu altında yapının bütünsel hareket etmesini sağlamak ve yeknesak hareket eden yapının tüm kısımlarının yerel bozulmalara karşı ayakta kalacak şekilde davranmasını geliştirmektir. Yeknesaklığı sağlamak için yapı planının düzenlenmesi (uzun açıklıkların azaltılması), entegre bağ sistemlerin tasarımı kullanılması, döşeme açıklık yönlerinin değiştirilmesi, sünek detayların artırılması ve patlama yüklerine karşı takviyelerin eklenmesi gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Ayrıca düşey ve yatay taşıyıcıların ankrajlarla birbirlerine bağlanmasının da yeksenaklık sağlanması açısından önemli olduğu vurgulanmıştır.

Bir diğer yöntem olan Alternatif Yol Metodunda ise yapı, yerel hasar bölgesini köprülemek için yeni bir yük yolu geliştirilebilecek şekilde tasarlanır. Alternatif yük yolu, hasar sonrası yeni durumda yapı elemanlarının maruz kaldığı aşırı yüklerin yeniden dağıtılmasını esas alır. Yapıya yük dağıtım davranışını kazandıran olgu, sürekliliği ve sünekliği esas alan “sağlamlık” kavramına dayanır. Sağlamlık, tasarımcının dikkatini yapının bir miktar hasar aldıktan sonraki davranışına yönlendirir. Bu yöntem, tehditten bağımsız bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. ASCE, US GSA ve US Savunma Bakanlığı tarafından ifade edilen alternatif yük yolu analizindeki temel prosedür, olası bir yerel hasarın yayılıp yayılamayacağını kontrol etmek için bir taşıyıcı elemanın sistemden çıkartılmasıdır. Ardından, oluşan bu yeni yapısal sistemin davranışı izlenir. Yapı sistemindeki her bir taşıyıcı eleman, yeni durumda yeni yüklere maruz kalır. Bu nedenle, yapı elemanları, bu yeni yükleme durumunda hasar görmeyecek kadar “sağlam” olmalıdır. Alternatif yük yolu analizi için dört analitik yaklaşım mevcuttur: doğrusal statik, doğrusal olmayan statik, doğrusal dinamik ve doğrusal olmayan dinamik analiz. Alternatif yük yolu yönteminin dezavantajı, yapının yeni yük yolunun tespiti sırasında yalnızca bir yapı elemanının yapıdan çıkartılmasına dayanmasıdır. Ancak, çok katlı ve büyük açıklıklı bir yapısal sistemin sadece bir katındaki tüm taşıyıcıların hasar görmesi yerel hasar olarak değerlendirilebilir. Keza Dünya Ticaret Merkezi örneğinde de bu durumun söz konusu olduğu görülmüş ve bu yapının yeni yük yolunun ne olacağı konusunda kimse kesin bir kanaat oluşturamamıştır (Corley, 2003).

Yerel Direnç Artırma Metodu olarak bilinen bir diğer tasarım kriterinde, maruz kaldığı aşırı yükleri başka bir elemana aktaramayacak olan ya da hiçbir şekilde hasar almaması gereken kritik yapı elemanlarının ani yüklemeler karşısında hasara uğramayacak şekilde tasarlanması esas alınır. Bu tasarım metodu yapının tümünü korumayı değil yapıdaki kritik noktaları korumayı esas alır. Ancak, bu metot ile ilgili sorun, bölgesel hasarın tam olarak nerede ne zaman oluşacağını tahmin etmenin imkansız olmasıdır. Çünkü yapılar, insani faktörlere ve doğa olaylarına belli limitlere kadar dayanıklıdır. Örneğin bir konsolosluk binasının istihbarat odasının yapının en önemli kısmı olduğunu varsayarsak, bu odayı korumak, bu metodu kullanan mühendisçe en önemli tasarım kriteri haline gelir. Ancak, odayı oluşturan ve odaya komşu olan yapısal elemanlar güvenlik faktörünün yüksek olduğu sınırlar dahilinde tasarlanmış olsalar dahi, ilgili konsolosluk binasının herhangi bir odasındaki yerel bir patlamanın oluşturacağı zincirleme reaksiyon neticesinde meydana gelecek aşamalı göçme, tüm yapıyı kullanılmaz hale getirebilir, ilgili odaya erişim sağlanamayabilir, odanın içerisinde can ve mal kayıpları yaşanabilir. Dolayısıyla bu yöntem yalnızca hasar görme riski nispeten düşük olarak kabul edilen yapılarda kullanılır. Yukarıda açıklanan tüm bu tasarım kriterlerinin hepsi aşamalı göçmenin ne olduğunu anlama ve analiz etme süreçleri sonrası uygulanabilir (Byfield vd., 2014).

Ayrıca tasarım yöntemini belirlemek ve aşamalı göçme olayını anlamak için dört analitik yaklaşım mevcuttur bunlar: Doğrusal Statik, Doğrusal Olmayan Statik, Doğrusal Dinamik ve Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz şeklinde sıralanmıştır (Marjanishvili, 2004). Bu analitik yaklaşımlara dair avantaj, dezavantaj ve performans kriterleri Çizelge 1.1.'de açıklanmıştır.

Aşamalı göçme mekanizmasının doğası ve sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, bu olayın gözlemlenmesinin oldukça güç olduğu ve ne zaman ve nasıl meydana geleceğini tahmin etmenin zorluğu anlaşılmaktadır. Bu karmaşıklık nedeniyle, bazı araştırmacılar sonlu elemanlar metodunu kullanarak bilgisayar simülasyonları yapmaktadırlar, bazıları ise deneysel yöntemlerle laboratuvar ortamında çalışmalar gerçekleştirmektedirler. Bunun yanı sıra, bazı araştırmacılar her iki metodolojiyi birleştirerek kapsamlı gözlemler yapmaktadırlar. Literatüre bakıldığında, aşamalı göçme konusunda yapılan çalışmaların büyük bir kısmının betonarme sistemlere odaklandığı görülmektedir. Bu çalışmalar genellikle, bir taşıyıcı yapı elemanının sistemden çıkarılması senaryosuna dayanmaktadır. Dikkat çekici bir diğer husus ise, kafes sistemler üzerine yapılan çalışmaların sayısının nispeten az olmasıdır. Bu durum, araştırmacıların bu alanda daha fazla çalışma yapması gerektiğini göstermektedir. Aşamalı göçme konusunda yapılan çalışmaların kafes sistemlere yeterince odaklanmaması, araştırmacıların tam olarak bir yapıya ait aşamalı göçme mekanizmasını ortaya koyamamaları ve mevcut yapısal analiz programlarının aşamalı göçme analizi konusundaki yetersizlikleri nedeniyle, bu tez çalışması yapılmıştır.

Bu çalışma, Toklu'nun (2004) geliştirdiği Toplam Potansiyel Optimizasyonu (Total Potential Optimization - TPO) metodunu, Gradyan Azalma algoritması yardımıyla bir optimizasyon sürecine dönüştürerek kafes sistemlerdeki aşamalı göçme mekanizmasının analizini hedeflemektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, kafes sistemlerin aşamalı göçme mekanizmasının tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. TPO yönteminin tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri, kafes sisteminin çeşitli eğilmeler ve yer değiştirmeler sonucunda labil hale geçse dahi, aşamalı göçme sürecinin analiz edilebilmesidir. Diğer bir deyişle, bu yöntem, bir yapının çökme adımlarını izleyerek, tasarım aşamasında yapısal olarak zayıf olan noktaların belirlenmesine olanak tanır. Mevcut sonlu elemanlar metodunu kullanan yapısal analiz yazılımları, stabil sistemler için çözümler sunarken, bir yapının yıkılma mekanizmasını doğrudan gözlemlene yeteneğine sahip değildir. Bu nedenle, TPO ve Gradyan Azalma algoritması kombinasyonu, bu alandaki önemli bir eksikliği gidermektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bilim insanları, aşamalı göçme fenomenini daha derinlemesine anlamak ve bu olayın olası yıkıcı sonuçlarını önlemek amacıyla çeşitli araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmalar, aşamalı göçme konusundaki anlayışımızı genişletmiş ve bu alanda yol gösterici olmuşlardır. Özellikle, yapısal mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında yapılan bu çalışmalar, aşamalı göçmenin nedenlerini, mekanizmalarını ve önleyici stratejilerini kapsamaktadır. Bu araştırmalar, sonlu eleman analizi, deneysel testler ve matematiksel modelleme gibi çeşitli metodolojileri kullanarak, yapıların yük altında nasıl davrandığını ve çeşitli yüklemeler altında neden çöktüklerini detaylı bir şekilde inceler. Ayrıca, bu çalışmalar, yapısal tasarım ve güvenlik standartlarının geliştirilmesinde de önemli bir rol oynamıştır.

Allen ve Schriever, (1972) aşamalı göçmeyi yapının bir noktasındaki çökme sonucu çevresindeki elemanların çökmesiyle devam eden bir reaksiyon zinciri olarak tanımlamıştır.

Krauthammer, (2003) betonarme çerçeve sistemlerle yaptığı çalışmalar neticesinde yapının yüklenme kapasitesi aşıldığında veya yapıya dair sınır koşulları değiştiğinde aşamalı göçmenin meydana geldiğini analitik yöntemlerle ifade etmiştir.

Lin vd., (2022) yapılardaki aşamalı göçmenin başlangıcını oluşturan olayların genellikle bir kaza veya deprem olduğu kanısına varmışlar ve ani yük artışlarının aşamalı göçme için önemli bir unsur olduğu hususuna değinmişlerdir.

Kim ve Kim (2009), 2 boyutlu çelik çerçevelerin aşamalı çöküşünü değerlendirmek için doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analizleri kullanmışlardır. Yapıların kat sayılarını artırarak ve çelik çerçeveyi yanal yüklere göre tasarlayarak çerçevelerin aşamalı çökme potansiyelinin azaldığını fark etmişlerdir.

Marjanishvili (2004) yaptığı çalışmada aşamalı göçme olayı için bir analiz prosedürü ortaya çıkarmaya çalışmış ve sonuç olarak lineer olmayan dinamik analizin en doğru sonuçlar veren metot olduğunu ortaya koymuştur. Bir yapıya ait aşamalı göçme mekanizmasını incelemek isteyen bir araştırmacının en güvenilir sonuçları yakalayacağı analitik yaklaşım metodu Lineer Olmayan Dinamik Analizdir. Bu metot yapının malzeme özelliklerini hesaba katması ve lineer olmayan davranış üzerine bir modelleme sunması nedeniyle önemlidir.

Sasani ve Kropelnicki, (2008) sistemdeki bir kolonu kaldırılan beton bir binanın aşamalı çökme tepkisini araştırmışlardır. Kaldırılan kolon ve yapı döşemelerine bağlanan kirişlerin güçlendirilmesinin hasar genişlemesini önlemede çok etkili olduğunu bulmuşlardır.

Chen vd., (2015) kolonların kaldırılması sırasında bir binanın aşamalı çökme tepkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapısal analitik simülasyonları kullanarak binanın çatısının hasar genişlemesi üzerindeki etkisini değerlendirerek çatıların boyutlandırılmasına dair çıkarımlarda bulunmuşlardır.

Izzuddin, (2016) yaptığı çalışmada yapılarda meydana gelebilecek aşamalı göçme olayına karşı bir önlem almanın kaçınılmaz olduğuna değinmiş, bu konuda süneklik merkezli bir tasarım odağı önermiştir.

Izzuddin vd., (2008) , Vlassis., (2008) ile birbirinin devamı olarak yaptıkları çalışmalarda yapısal sağlamlık kavramını irdelemişler ve sağlamlık kavramının tasarım sırasında ölçülebilir bir kavram olmasını sağlamak üzere yeni tasarım ilkeleri önermiş ve bunu bir modelleme yaparak örneklemişlerdir.

Wibowo, (2009) depremlerden kaynaklanan aşamalı göçme olaylarını incelemiş ve depremlerin, patlama ve yerçekimi yüklerinin yanı sıra aşamalı göçmeyi başlatabilen bir diğer unsur olduğunu ortaya koymuştur.

Pachenari vd., (2013) tipik bir betonarme binanın tüm katlarındaki aşamalı göçmeyi değerlendirmek için doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz kullanmışlardır. Doğrusal olmayan statik analizin kirişlerdeki kesme kuvveti gibi bazı parametreleri, olması gerekenden daha fazla tahmin ederek çözüm yaptığını fark etmişlerdir.

Rahnavard, (2018) doğrusal olmayan dinamik analiz kullanarak çelik kompozit çerçeve yüksek binalardaki aşamalı göçme mekanizmasını ampirik incelemiş, bir çerçeve sistemde yan kolonların kaldırılmasının köşe kolonların kaldırılmasından daha hayati olduğuna dair bulguları ortaya koymuştur.

Panahi ve Zahrai, (2021) yaptıkları çalışmada bina planının betonarme binaların aşamalı göçmesinde etkili bir faktör olduğunu fark etmiş ancak planın düzgünlüğü ve düzensizliği, kat sayısı, yanal yük taşıyıcı sistemin türü ve hatta perde duvarın konumu gibi faktörlerin ilerleyen çöküşte önemli rol oynayabileceğini de belirtmişlerdir.

Erling Murtha-Smith (1989) çalışmaları kapsamında kafes sistemlerde aşırı yüklenme durumunda oluşabilecek çubuk kayıp veya hasarlarında yükün yeniden dağıtılabileceğini ifade ederek aşamalı göçme olayına değinmiştir.

Malla ve Nalluri, (2000) yaptıkları çalışmalarda kafes sistemleri incelemiş, kafes sistemin herhangi bir elemanının hasarı sonrasında yapının dinamik tepkisini hesaplamışlardır ve hasarların yapıların modunda, frekansında ve yer değiştirmesinde değişikliklere yol açacağı sonucuna varmışlardır. Bu durumun tüm yapının bir anda çökmesine yol açmasının son derece muhtemel olacağı kanaatine varmışlardır.

Yu, (2011) sonlu parçacık yöntemini kullanarak bir konsol kafes yapının tayfun felaketi altında çökmesini simüle etmiş ve yapının çökme mekanizmasını belirlemiştir. Ayrıca sonlu parçacık yönteminin uygulanabilirliğini doğrulamak için simülasyon sonuçlarını saha gözlemleriyle karşılaştırmıştır.

Wang vd., (2013) ABAQUS kullanarak malzemenin nihai şekil değiştirme oranını (ϵ_{cr}) değiştirerek sismik yük altında bir güç iletim kulesinin aşamalı çökme sürecini simüle etmişler ve yapının çökme direncinin ϵ_{cr} arttıkça önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır.

Meguro ve Tagel-Din, (2002) yaptıkları çalışmalarda bir yapının aşamalı göçmesi dahil tüm deformasyon süreçlerini analiz etmek için Uygulamalı Elemanlar Yöntemini önermişlerdir. Yöntemin gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiğini ifade etseler de her durumda kullanılabilir olmadığını, bazı kısıtların olduğunu belirtmişlerdir.

Ke ve Liu, (2022) yaptıkları çalışmada aşamalı çöküşle ilgili güncel çalışmaların çoğunun çerçeve yapılara odaklandığını ve nispeten az sayıda çalışmanın geniş açıklıklı uzay kafes yapıların üstünde durduğundan bahsetmişlerdir. Ancak uzay kafes yapıların yaygın kullanımıyla birlikte aşamalı çökme kazalarının sıklıkla meydana geldiğini, bu tür yapıların genellikle yoğun nüfuslu kamu binalarında kullanıldığını, bu nedenle geniş açıklıklı uzay kafes yapılar için aşamalı göçme çalışmasının gerekli olduğunu ifade etmişlerdir.

Toklu, (2004) yaptığı çalışmada yapılardaki deformasyonlara farklı bir teknikle yaklaşarak minimum potansiyel enerji ilkesi üzerinde durmuştur. Bu ilke: "Bir yapısal sistemin sınır koşullarını sağlayan tüm yer değiştirmeler arasında, kararlı denge konfigürasyonlarına karşılık gelenler, potansiyel enerjiyi göreceli minimum yapar" şeklinde ifade edilir. Bu prensibin genellikle bilinmesine rağmen, kullanımının yapısal problemlerde yaygın olmadığını görüşünü savunmuştur. Toklu çalışmalarında, çeşitli yapı tipleri ve yük durumları için çözümler sunmuş ve elde edilen sonuçların gerçeğe çok yakın olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca alışılmış sonlu elemanlar yöntemlerinin stabilitesini kaybeden sistemlerde başarısız olduğuna dikkat çekmiş ve TPO metodunun stabilitesini kaybetmiş

yapısal sistemlerin analizine de olanak sağladığını göstermiştir. Toklu, çalışmalarında bir yapıya ait toplam potansiyel enerjinin şu şekilde hesaplanabileceğini belirtmiştir;

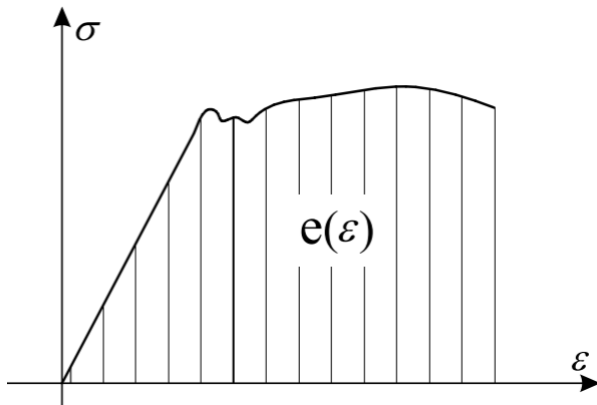
$$\Pi = U - W \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de gösterilen Π sistemdeki toplam potansiyel enerjiyi, U sistemdeki şekil değiştirme enerjisini ve W ise sistem üzerindeki dış kuvvetlerin oluşturduğu enerjiyi ifade eder (Toklu, 2004).

Denklem 2.1’deki eşitlikte U olarak ifade edilen sistemin şekil değiştirme enerjisi, Denklem 2.2’deki gibi ifade edilebilir (Toklu, 2004).

$$U = \int_0^V e(\varepsilon) dV \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de gösterilen şekil değiştirme enerjisi, bir malzemenin şeklinin değiştirilmesi sırasında depolanan enerjidir. Denklemde bulunan “ e ” ifadesi şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunu, dV yapı elemanının sınır koşullar dahilindeki birim hacmini ifade etmektedir. Bu enerji genellikle deformasyon veya gerilme sonucu oluşur. Bir malzeme için gerilme deformasyon diyagramı Şekil 2.1’deki gibidir.



Şekil 2.1. Gerilme – deformasyon diyagramı (Toklu, 2004)

Denklem 2.2’de de yer alan ve Şekil 2.1’deki taralı bölgenin alanını ifade eden $e(\varepsilon)$ ifadesi Denklem 2.3’de gösterildiği gibi hesaplanır (Toklu, 2004).

$$e(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.3)$$

Lineer elastik bir malzeme için stres gerilme ilişkisi ise Denklem 2.4’deki gibi ifade edilebileceğinden, Denklem 2.3’de yer alan integral Denklem 2.4 yardımıyla çözüldüğünde, Denklem 2.5 elde edilecektir. Ayrıca malzeme lineer elastik olmasa dahi söz konusu integralin çözümünün mümkün olduğu da önemli bir noktadır (Toklu, 2004).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.4)$$

$$e = \frac{1}{2} E\varepsilon^2 \quad (2.5)$$

Denklem 2.1’de W ile gösterilen negatif iş ise sistemin deformasyonu sırasında oluşur ve dış kuvvetlerden kaynaklanmaktadır.

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_i u_i \quad (2.6)$$

Denklem 2.6’da, N_p yapı üstündeki kuvvet sayısı olmak üzere, P_i kuvveti ve u_i deplasmanı ifade etmektedir.

Yukarıda verilen denklemler yardımıyla Denklem 2.1 en sade haliyle Denklem 2.7'deki şekilde ifade edilebilir, burada A_j yapısal elemanın deformasyon öncesi kesit alanını, L_j ise deformasyon öncesi uzunluğunu ifade etmektedir (Toklu, 2004).

$$\Pi = \sum_{j=1}^{Nm} e_j A_j L_j - \sum_{i=1}^{Np} P_i u_i \quad (2.7)$$

Toklu, (2004) yaptığı çalışmada söz konusu yöntemi kullanarak çeşitli kirişler için deformasyon hesaplamaları yapmış ve bulduğu sonuçların gerçek sonuçlara çok yakın olduğunu ifade ederek yapıların deplasman hesabı için geçerli bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yeni metodun ismini ise Toplam Potansiyel Optimizasyon Metodu olarak belirlemiştir (TPO).

Toklu vd., (2013) yaptıkları çalışmalarda biri iki boyutlu biri üç boyutlu olmak üzere iki kafes sistemi ele almış, sistemleri Toplam Potansiyel Optimizasyon Metodunu bir meta-sezgisel yöntem aracılığıyla çözmüştür. Daha sonra aynı sistemleri sonlu elemanlar yönetimiyle de çözerek, sonuçların birbirlerine çok benzer olduğunu ortaya koymuş, meta-sezgisel yöntemlerle TPO metodunu birleştirmiştir.

Bekdaş vd., (2019) ve Toklu ve Uzun, (2016) çalışmaları kapsamında TPO'yu bir optimizasyon problemi olarak görmüşler ve bu hususta yaptıkları çalışmaları meta-sezgisel yöntemlerle çözümlenmişlerdir. Sonuçların tutarlılığına değinerek TPO'nun yeni nesil bir analiz yöntemi olduğuna vurgu yapmışlardır.

Wang vd., (2021) Gradyan azalmanın, bir fonksiyonun en küçük değerini bulan iteratif bir optimizasyon algoritması olduğunu ve sürekli iterasyonlarla amaç fonksiyonunun gradyanını elde ettiğinden bahsetmiştir. Gradyanın doğrultusunda amaç fonksiyonunun en iyi çözümüne giderek, fonksiyonun ilgili parametreleri yardımıyla en küçük değere ulaştırmaya çalıştığını ortaya koymuşlardır.

3. YÖNTEM

3.1. Python Programlama Dili

Tezin konusu olan analizler için Python programlama dili kullanılmıştır. Guido van Rossum tarafından ilk sürümü geliştirilmeye başlanan bu dil, günümüze kadar güncellenerek gelmiştir. Python dilinde yazılan kodlar genellikle diğer programlama dillerine göre daha az satır içerir ve daha sadedir. Dil yapısının okunabilir ve anlaşılır olması, Python öğrenme sürecini basitleştirir. Bununla beraber, açık kaynak olması, kodların herkes tarafından erişilebilir, incelenebilir ve düzenlenebilir olduğu anlamına gelir. Bu da hataların daha hızlı giderilmesine olanak tanır ve dilin sürekli güncellenebilir olmasına imkan sağlar. Python aynı zamanda kodlama sürecini kolaylaştıran birçok kütüphaneyi içermektedir. Farklı programlama dilleriyle entegre olarak çalışabilme özelliği, Python'ı çok yönlü kılan bir başka avantajdır. Veri bilimi, makine öğrenimi, derin öğrenme, web geliştirme, doğal dil işleme, robotik kodlama, siber güvenlik gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu tez kapsamında Python'da kullanılan kütüphaneler Çizelge 3.1'de yer verilmiştir.

3.2. Kullanılan Kütüphaneler

Çizelge 3.1 Kullanılan kütüphaneler

| | |
|--------|---|
| Os | os (işletim sistemi) kütüphanesi, Python'da işletim sistemi ile etkileşimde bulunmak için kullanılan bir modüldür. Bu kütüphane, dosya ve dizin işlemleri, ortam değişkenlerine erişim, işletim sistemi ile ilgili bilgileri almak ve diğer işletim sistemi düzeyinde görevleri gerçekleştirmek için bir dizi işlev sağlar. |
| Pandas | Pandas, Python programlama dilinde veri manipülasyonu ve analizi için kullanılan güçlü bir kütüphanedir. Pandas, veri analizi ve temizleme işlemleri için kullanıcı dostu ve etkili veri yapıları ve fonksiyonlar sağlar. Pandas, CSV, Excel, SQL, JSON gibi çeşitli veri formatlarından veri okuma ve yazma işlemlerini destekler. |
| copy | copy kütüphanesi, Python'da nesnelerin kopyalanması ile ilgili işlemleri gerçekleştirmek için kullanılır. Bu kütüphane, bir nesnenin (liste, sözlük, sınıf örneği vb.) kopyasını oluşturmanın birkaç farklı yoluyla ilgilenir. Temelde iki ana türde kopyalama vardır: derin kopya (deep copy) ve sığ kopya (shallow copy). |

| | |
|------------|---|
| time | time kütüphanesi, Python'da zamanla ilgili işlemleri gerçekleştirmek için kullanılan bir standart kütüphanedir. Bu kütüphane, zaman aralıklarını ölçme, zaman bekletme, tarih ve saat işlemleri gibi çeşitli zamanla ilgili görevleri yerine getirmek için kullanılır. |
| matplotlib | matplotlib, Python dilinde veri görselleştirmesi için kullanılan popüler bir kütüphanedir. Bilgisayar grafikleri, çizgi grafikleri, scatter plot'lar, histogramlar, bar plot'lar, error bars, 3D grafikler ve daha pek çok türde görselleştirmeyi destekler. matplotlib kütüphanesi kullanıcı dostu bir arayüzle gelir ve özellikle veri analizi ve bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılır. |
| imageio | imageio, Python dilinde görüntü okuma ve yazma işlemleri için kullanılan bir kütüphanedir. Bu kütüphane, çeşitli görüntü formatlarına destek sağlar ve temel olarak görüntü işleme, bilgisayar grafikleri ve video işleme gibi uygulamalarda kullanılır. imageio kütüphanesi aynı zamanda animasyon oluşturma ve çoklu görüntüleri birleştirme gibi işlemleri de gerçekleştirebilir. |

3.3. Gradyan Azalma Algoritması

Toklu, yaptığı çalışmalarda, bir yapıya ait yer değiştirme miktarının, sonlu elemanlar yöntemleri dışında, Toplam Potansiyel Optimizasyon (TPO) adını verdiği yöntemle belirlenebileceğini bulmuştur. Bu yöntem, yapıların maruz kaldıkları yüklemeler altında gerçekleştirdikleri deformasyon durumu içinde potansiyel enerjilerini minimuma indirme davranışını temel almaktadır.

Toklu, TPO'nun bir optimizasyon problemi olduğunu ifade etmiş ve gelişen teknoloji sayesinde çeşitli meta-sezgisel tekniklerle çözülebileceklerini öne sürmüştür. Harmoni Arama Algoritmasını kullanarak, iki kafes sistemin yüklemeler altındaki yer değiştirme miktarını bulmuş ve elde ettiği sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmıştır. Toklu, sonuçların benzer olduğuna değinerek, TPO'nun yapıların deformasyonunun hesaplanmasında kullanılabilecek yeni bir yöntem olduğunu öne sürmüştür.

Daha sonra TPO'nun bir optimizasyon süreci olduğu çeşitli çalışmalarla gösterilmiş ve bu optimizasyon problemi için Meta-Sezgisel algoritmalar kullanılarak çözümler üretilmeye çalışılmıştır.

Bu tez kapsamında, çözümleri gerçekleştirecek algoritma olarak Gradyan Azalma Algoritması (Dereceli Azalma) seçilmiştir. Gradyan azalma, çözümleri gereken denklemi bir fonksiyon haline getiren, bu fonksiyonun grafiğini baz alan ve ilgili denklemin yerel minimumuna ulaşmayı amaç edinen bir optimizasyon türüdür (Haji ve Abdulazeez, 2021).

Gradyan Azalma algoritması bir fonksiyonun minimum noktasını aramak ve bu noktaya iteratif olarak yaklaşmak amacıyla kullanılır. Özellikle makine öğrenmesinde, model parametrelerini optimize etmek için sıkça kendine yer bulur. Algoritmanın çözüm adımları ise şöyle sıralanabilir:

1. Başlangıç Noktası Belirleme: Algoritma, optimizasyon sürecine başlamak için bir başlangıç noktası belirler.
2. Gradyan Hesaplama: Belirlenen başlangıç noktasında fonksiyonun gradyanını (türevi) hesaplar. Gradyan, fonksiyonun en hızlı arttığı yöndeki değişimi gösterir.
3. Yön Belirleme: Gradyanın tersi alınarak fonksiyonun azaldığı yönde ilerler. Bu adım, fonksiyonun en hızlı azaldığı yöne doğru bir adım atmayı sağlar.
4. Adım Büyüklüğünü Belirleme: Ne kadar ilerleneceğini belirlemek için bir adım büyüklüğü (learning rate) seçer. Bu, her iterasyonda gradyan vektörünün tersine ne kadar gidileceğini kontrol eder.
5. Yeni Noktaya Gitme: Seçilen adım büyüklüğü ile gradyanın tersine doğru yeni bir noktaya ilerler.
6. Yakınsama Kontrolü: Belirli bir duruma gelinip gelinmediğini kontrol eder. Örneğin, belirli bir hata eşiği veya maksimum iterasyon sayısı gibi durumlar kontrol edilir.

7. Yakınsamaya Tamamlanıncaya Kadar Tekrarla: Belirlenen yakınsama kriterlerine ulaşıncaya kadar 2-6 adımlarını tekrarlanır.

3.4. Python Betiğinin Oluşturulması

Optimizasyon, kelime anlamıyla bir problemdeki en üst düzey performansı elde etmek amacıyla kullanılan metodolojilere atıfta bulunan bir terimdir. Bir optimizasyon probleminin konusu çeşitlilik arz edebilir. Bu tezdeki optimizasyon problemi, malzeme özellikleri, koordinatları, uzunlukları ve yapı üzerindeki yük dağılımı gibi faktörleri bilinen bir kafes sistemin toplam potansiyel enerjisini minimuma indiren yer değiştirme değeridir.

Toplam potansiyel enerji, hesaplanabilecek en sade haliyle Denklem 2.7’de ifade edilmiştir. Yapının düğüm noktalarının yer değiştirme miktarının tasarım değişkeni olduğu problemde, her bir en dik iniş sonunda göçen elemanın varlığı kontrol edilmiştir. Bir sonraki iterasyonda, göçen eleman(lar)a ait terimler enerji denkleminde kullanılmamıştır. Bu çözüm sürecinde, taşıyıcı sistemin düğüm noktalarının hangi konumda olduğu ve hangi eleman(lar)ın göçtüğüne dair bilgileri içeren bir minimizasyon tarihçesi elde edilmiş olur. Ayrıca sistemin tamamının çöktüğü bilgisi ise izin verilen düğüm mesafesi aşıldığında anlaşılır ve çözüm kaydedilerek durdurulur.

Yöntemi uygulayabilmek için küçük bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Kafes sistem elemanlarının birim ağırlığı, elastisite modülü, akma gerilmesi, düğüm noktalarının koordinatları, çubukların birbirlerine göre durumları, çubuk alanları, sisteme etkileyen kuvvetler ve mesnet koşulları gibi özellikler sayısal olarak bir Excel dosyasına tanımlanmıştır. Bu dosya, Python ile geliştirilmiş bir betik tarafından okunarak enerji minimizasyonu hesabını gerçekleştirmektedir. Aynı betik, taşıyıcı sistemin her iterasyon sonundaki şekil değiştirmiş halinin çizimini yapabilme ve kaydedebilme özelliğine sahiptir.

İlk adım olarak, aşamalı göçme analizi yapılacak olan kafes yapının oluşturulması gerekmektedir. Bu kafes yapıya dair bilgiler, daha önce bahsedildiği gibi analizi

gerçekleştirecek kullanıcı tarafından Excel dosyasına veri olarak girilecektir. Kafes sisteme ait her bir özellik ilgili alt sayfada belirtilen boşluklara girilerek, analiz yapılacak sisteme ait bir kimlik tanımlama aşamasını içermektedir.

Python betiğinin ilk adımı, oluşturulan Excel sayfasındaki verilerin okunmasıdır. Bu adım, Excel sayfasındaki her bir değer sisteme dair yapılacak hesaplamalarda kullanılabilmesi için betiğe bir veri okuma kütüphanesi yardımıyla kaydedilmesini içermektedir.

Python betiğinin bir sonraki adımı, malzemenin sıfır deformasyon durumundaki birim şekil değiştirme değerini hesaplamaktır. Bu hesabı yapmak için, sistem kimliğini oluşturan ve Excel dosyasında bulunan değerlerden Elastisite Modülü (E) ve Akma Dayanım Değeri (σ) gibi malzeme özelliklerinden yararlanılır. Bu değerler, Denklem 2.4'teki eşitlik yardımıyla malzemenin akma birim şekil değiştirme değerini hesaplamak için kullanılır. Bu değer, sistemin başlangıç durumundaki toplam enerjisini hesaplamak için önemlidir. Üzerindeki gerilmeler neticesinde bir malzemenin akma birim şekil değiştirmesi değişebilmektedir. Bu durumda akma birim şekil değiştirme değeri ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'te, ΔL yapının ilk boyu ile deformasyon sonrası boyu arasındaki farkı, L_0 ise yapının sıfır durumundaki boyunu ifade etmektedir. Bu iki değer birbirine bölünmesiyle yapının o anki akma birim şekil değiştirme değerine ulaşılır. Yapının elastik deformasyonu, plastik deformasyonu ve kopma şartları belirlenerek Python betiğine tanıtılmıştır. Bu çalışma kapsamında kopma birim uzaması %20 olarak kabul edilmiş ve işlemler bu değer aşıldığı durumlarda, ilgili çubuk kopmuş kabul edildiği prensibi üzerine yapılmıştır.

Kodun devam eden kısmında ise oluşturulmuş sistemin aday vektörlerine dair sınır koşulları tanıtılmıştır. Algoritma öncelikli olarak her bir düğüm noktası için deformasyon vektörü oluşturur. Bu vektörlere “aday” denilmektedir. Bir sistemin genel çözümü için bazı sınır koşullar gereklidir. Bunlardan biri yukarıda tanıtılmış olan akma değeridir. Diğerisi ise sistemin mesnet durumudur.

Kullanıcı, Excel dosyasında oluşturduğu sistemin kaç mesneti olduğunu belirtir, mesnet koşullarını yönlerine uygun olarak 1 veya 0 olarak ifade eder. Mesnet koşulu bir yönde 1 olarak girildiyse, sistemin o yönde kuvvet alabildiği, 0 olarak girildiyse mesnetin o yönde kuvvet alamadığı anlamına gelir. Bu durum önemlidir çünkü; eğer bir düğüm noktası mesnet özelliği taşıyor ise ve bir yönde kuvvet alabiliyor ise yani tutulu durumda ise algoritma o düğüm noktası için o yönde bir aday vektör üretmemelidir. Eğer böyle bir aday vektör üretirse, bunu hemen düzelterek aday vektör listesini kendi kendine güncellemelidir.

Bu aşamada, sistemi oluşturan çubukların sıfır anındaki boylarının ve deformasyon sonrasındaki boylarının hesaplanması, Excel dosyasında girilen düğüm noktası koordinatlarına dayanmaktadır. Bu iki değer doğru hesaplanması, Denklem 3.4'te ifade edilen denklemin hesaplanması ve bir çubuk elemanın kopup kopmadığının kararının verilebilmesi açısından kritiktir. Bu hesaplamalarda düğüm noktalarının sınır koşulları göz önüne alınarak türetilen aday vektörler önemli bir rol oynamaktadır. Sistemdeki çubukların deformasyon sonrası yeni boyları baz alınarak akma gerilmeleri hesaplanır ve akma gerilmesi değerleri güncellenir. Bu değerlerin güncellenmesi, çubuk elemanlarının akma dayanımını aşması durumunda kopma olup olmadığını belirlemek için önemlidir.

Bir sonraki işlem adımı Denklem 2.7'de ifade edilen Toplam Potansiyel Enerji hesabının yapılmasıdır. Bu noktadan itibaren bu denklemi oluşturan hesap adımlarını takip ederek sistemin toplam potansiyel enerjisini hesaplayacak işlemler Python betiğine işlenmiştir. Program ilk olarak Denklem 2.7'nin ilk adımı olan sistemin şekil değiştirme potansiyel enerjisini hesaplamaktadır. Bu denklemin hesaplanması için gerekli değişkenlerden “e”, Denklem 2.5'teki eşitliğe uygun olarak gerekli değişkenleriyle işlenmiş, ardından Excel dosyasında tanımlanan çubuk alanları ve Python betiğinde hesaplanan çubuk

uzunluklarıyla çarpılarak hesaplanmıştır. Burada önemli olan husus; çubuk alanlarının Excel dosyasındaki değerleri ve çubuk uzunluklarının çubuğun başlangıç uzunluğunu ifade ettiğidir. Ezcümle bir çubuk elemana ait şekil değiştirme potansiyel enerjisi hesaplanırken şekil değiştirme yoğunluğu ile çarpılan çubuk hacmi çubuğun şekil değiştirmemiş ilk haline ait hacimdir. Bu adım, sistemin toplam potansiyel enerjisinin bir parçasını oluşturur ve ileriye dönük çözüm adımlarını etkiler (Toklu, 2004).

Denklem 2.7’de ifade edilen ve toplam potansiyelin bir diğer unsuru olan düğüm noktaları üzerindeki kuvvetlerin oluşturduğu enerji, Python betiğinde hesaplanırken iki önemli unsura dikkat edilmiştir. İlk olarak, düğüm noktası üzerinde bulunan kuvvetin kaç bileşeni olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Yani bu kuvvetin koordinat düzleminde hangi noktalarda olduğu, uzayda hangi eksenlerle açı yaptığı belirlenmiştir. İkinci husus ise yapılan yer değiştirmenin hangi düzlemde yapıldığıdır. Bu karmaşıklığı kontrol edebilmek için Python betiği içerisinde, öncül içeren bir fonksiyon oluşturulmuştur. Bu fonksiyon, çubuğun uzayda x ve y düzlemlerinde bulunup bulunmadığına göre üretilen aday vektörlerin bu bileşenleriyle ayrı ayrı çarpımlarını yapar ve toplamlarını alarak o çubuğa dair kuvvet enerjisi bulur. Bu fonksiyonun ilk öncülüdür. Eğer mevcut kuvvet bu öncülü karşılamıyor ise bu öncül devre dışı kalır ve ikinci öncül çalışır. İkinci öncüle göre kuvvet uzayda üçlü düzlemde açı yapmaktadır ve bu açı değerlerine denk gelen her değeri, aday vektörün üç koordinatlı ilgili değeriyle çarpılır ve her değer süperpoze edilerek kuvvetlerin oluşturduğu enerji hesaplanır.

Yukarıda hesaplanan bu iki enerji değerinin birbirinden çıkarılması sonucunda sisteme dair toplam potansiyel enerji değeri hesaplanmış olur. TPO metodu bir optimizasyon problemidir ve oluşturulan Python programındaki tezahürü, üretilen aday vektörü değerindeki enerjiyi hesaplayarak bunun hangi noktada minimum olacağını bulmaktır. Yani üretilen aday vektörünün hangi yönde artıp azalacağı ve ne kadar artıp azalacağını belirleyerek en düşük toplam potansiyel enerjiye gitmektir. Bu noktada Dereceli Azalma algoritması devreye girmektedir.

Eğer bir yapısal sistem sıfır anından farklı noktada bulunuyor ve o noktada stabilitesini sağlıyorsa, sistem bulunduğu konumda, mevcut dış şartlar ve yapısal malzeme özellikleri dahilinde minimum potansiyelini oluşturduğu halindedir. Ancak bir yapı bulunduğu noktada yapısal denge sağlayamayabilir. Bu noktada sistemler, toplam potansiyel enerjileri minimum yapan noktaya kadar durmadan hareket edeceklerdir. Bu hareket, enerji değişiminin sağlanamayacağı son noktaya kadar devam edecektir. Bu son noktaya gelindiğinde ise yapısal sistem tamamıyla göçmüş olacaktır.

3.5. Algoritmanın Python Betiğine Tanıtılması

Bu bilgiler ışığında matematiksel denklemleri yukarıda belirtilen TPO metodunun hesabını ve dolayısıyla yerel noktadaki minimum enerjisini hesaplayabilmek için Gradyan Descent (Aşamalı Azalma) algoritması Python betiğine aşağıda detayları açıklanacağı şekilde uygulanmıştır. Algoritmanın adımlarını şu şekilde özetlenebilir:

1. Düğüm noktalarının ilk hallerinden Gradyan Azalma algoritmasının adımlama miktarı kadar bir nokta için sistemin toplam potansiyel enerjisi hesaplanır. Bu değer bir liste içerisinde saklanır.
2. Kullanıcıya bırakılan ve değeri artırılıp azaltılabilen bir "probe" değeri kadar, yer değiştirme miktarı belirlenir. Bu değerle düğüm noktası taşınır.
3. Noktanın taşındığı yeni konum için toplam potansiyel enerji hesaplanır.
4. Hesaplanan iki toplam potansiyel enerjinin farkı alınarak, bulunan değer yer değiştirme miktarına bölünür. Bu adım, düğüm noktalarının mevcut konumlarındaki gradyanları hesaplar. Gradyan vektörü, bir fonksiyonun en hızlı artan yönde değiştiği noktayı gösterir.
5. Hesaplanan gradyan değerinin sıfıra yakınlığı ve kullanıcı tarafından belirlenen eşik değerden uzaklığı kontrol edilir.
6. Kopan çubuk kontrolü yapılır. Her bir çubuk için kopma birim uzamasının %20'yi aşıp aşmadığı kontrol edilir, kopan çubuklar bir sonraki adımda sistemden çıkartılır.
7. Sistemin tümünün çöküp çökmediğini kontrol eden bir fonksiyon çalıştırılır. Bu fonksiyon, bir düğüm noktasının kullanıcı tarafından belirlenen maksimum düğüm yer değiştirmesini aşıp aşmadığını kontrol eder. Eğer bu sınır aşıldıysa göçme olduğu kabul edilir.

Gradyan Azalma algoritmasının, Python betiğinde nasıl kodlandığı anlatıldıktan sonra bu algoritma kullanılarak nasıl çözüm üretildiği ve iterasyonların nasıl yapıldığını anlatmak yerinde olacaktır. “solve” adı verilen ve tüm sisteme dair iterasyon ve gradyan azalma çözümlerini yapan fonksiyon ise adım adım şu şekilde çalışmaktadır:

- a) İterasyon sayacı ve her iterasyon sonucu oluşan sisteme dair görüntünün kaydedileceği liste oluşturulur.
- b) Göçen çubukların indekslerinin tutulduğu liste oluşturulur ve izin verilen düğüm yer değiştirme miktarı hesaplanır.
- c) “history” listesi başlatılır. Bu liste, her bir iterasyon sonundaki yapı sistemine ait bilgileri içerir.
- d) Eğer GIF oluşturmak isteniyorsa, ilk görüntü oluşturulur ve “imageList” listesine eklenir.
- e) İlk gradyan vektörünü hesaplanır, Gradyan vektörünün toleransa göre durumu kontrol edilir.
- f) Her iterasyonda, iterasyon sayacını bir artırılır, çubuk yer değiştirmelerini güncellemek için bir döngü başlar ve her çubuğun yer değiştirmesi gradyan vektörü ve adım boyutu kullanarak güncellenir.
- g) Göçen çubukların listesi güncellenir, toplam potansiyel enerji hesaplanır.
- h) Yeni iterasyonun bilgileri history listesine eklenir.
- i) Döngü, gradyan vektörü belirli bir toleransın altına düşene kadar devam eder ve Döngü sona erdiğinde, eğer GIF oluşturmak isteniyorsa, son görüntüyü oluşturur ve imageList listesine eklenir.
- j) Eğer sistem çöktüyse fonksiyon durur döngü sona erer.

3.6. Kullanıcı Tarafından Belirlenen Değerler ve Kısıtları

Kullanıcının karar vermesi gereken noktalardan biri yapının ne zaman tamamen çökeceğinin kabulüdür. Analizi yapılan sistem için çeşitli durumlarda göçmüştür denilebilir. Bu kabul, kimi zaman minimum enerji değerinin belli bir iterasyon sayısı boyunca hiç değişmemesi şartıdır kimi zaman ise bu çalışmada da olduğu gibi, bir düğüm noktasının

kullanıcı tarafından belirlenen maksimum düğüm yer değiştirmesini aşp aşmadığıdır. Bu çalışmada söz konusu sınır değer aşıldığında göçme olduğu kabul edilmiştir.

Kullanıcının bir sınır belirlemesi beklenen bir diğer husus ise çubukların kopma şartıdır. Bu çalışma kapsamında, bir çubuk için kopma birim uzamasının %20'yi aşması çubuğun koptuğu anlamına gelmektedir. Kopan çubuklar bir sonraki adımda sistemden çıkartılmıştır.

Eşik değerin (epsGrad) belirlenmesi bir başka önemli tasarım kararıdır. Bu değer Gradyan vektörünün ne kadar küçük olduğunu ve optimizasyonun yeterli bir şekilde yaklaştığını belirlemede kritik bir rol oynar. Bu konuda kullanıcıya düşen sorumluluk, eşik değeri dikkatlice seçmek ve çözüm sürecini kontrol etmektir.

Eşik değeri küçükse:

- Daha hassas kontrol sağlanır.
- Gradyan vektörün tam olarak sıfıra yaklaşması beklenir.
- Optimizasyon süreci daha uzun sürer.

Eşik değeri büyükse:

- Hesaplama süresi kısa olur.
- Gradyan vektör sıfıra yaklaşımadan durur ve bu da verimsiz bir optimazsyon anlamına gelir.

Yine kullanıcı tarafından belirlenen başka bir değer olan “probe” ise sayısal türev hesaplamasında kullanılan küçük değişimi temsil eder. Kodda yer alan gradyan azalma fonksiyonunda “probe” kullanılarak, bir noktadaki fonksiyonun eğiminin hesaplanmasında bu küçük değişimin kat sayısı olarak kullanılmıştır. Yani, bir noktadaki fonksiyonun eğimini hesaplamak için, o noktadaki fonksiyon değerini “probe” kadar değiştirmek ve bu değişim sonucunda ortaya çıkan fonksiyon değerlerindeki farkı “probe” ile bölerek sayısal türev elde edilir. Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse;

$$f'(x) = \frac{f(x + probe) - f(x)}{probe} \quad (3.5.1)$$

Buradaki önemli husus probe değerinin doğru seçimidir. Çünkü bu değer in büyüklüğü ve küçüklüğü çözüm hassasiyetini etkilediği gibi çözüm süresini de yine yukarıda sayılan sebepler dolayısıyla oldukça etkileyecektir.

Kullanıcı tarafından tayin edilen bir diğer değer ise Step Size değişkenidir. Bu değişken gradyan azalma algoritmasında her iterasyonda düğüm yer değiştirmelerini güncellerken kullanılmaktadır. Step Size değeri, her iterasyonda yapılacak güncelleme miktarını belirler. Daha büyük bir Step Size, daha hızlı bir yakınsama elde edebilir, ancak çok büyük bir değer seçmek algoritmanın düzgün çalışmasını engelleyebilir veya daha düşük bir doğruluk elde edilmesine neden olabilir. Bu nedenle, Step Size değerini seçerken dikkatli olmak önemlidir.

Son olarak yine kullanıcı tarafından değeri belirlenen kF değeri ise kuvvet katsayısı anlamına gelmektedir. Çözüm adımları boyunca başlangıçta sistemin kimlik bilgilerinin yazdığı Excel dosyasındaki kuvvetlerin büyütülmesi/küçültülmesinde kullanılır. Buradaki amaç çözüm sürecini yönlendirmek ve sistemi daha hassas bir hale getirerek doğru sonuçlara ulaşmayı kolaylaştırmaktır.

3.7. Verilerin Kaydedilmesi

Yukarıda belirtilen tüm bu çözüm adımları, bir “history” dosyasına kaydedilir. Oluşan her durum ve enerji değeri, bu dosya içerisinde tutulur. Betikte kullanılan çeşitli kütüphanelerle oluşturulan görselleştirme kodları, bu iterasyonlara ait sistem durumlarını çözüm sonunda kaydedip kullanıcıya sunar. Kullanıcı, her adımda oluşan sistem görüntüsüne bakarak sistemin hangi adımda ve hangi yük durumunda göçmeye başladığını, toplam deformasyon miktarını gözlemleyebilir ve tüm yıkılma sürecini bu görüntüler

aracılığıyla takip edebilir. Ayrıca, her adıma ait toplam potansiyel değeri de bir grafik halinde kullanıcıya sunarak durum değerlendirmesi yapması sağlanmaktadır.

4. SAYISAL DENEYLER

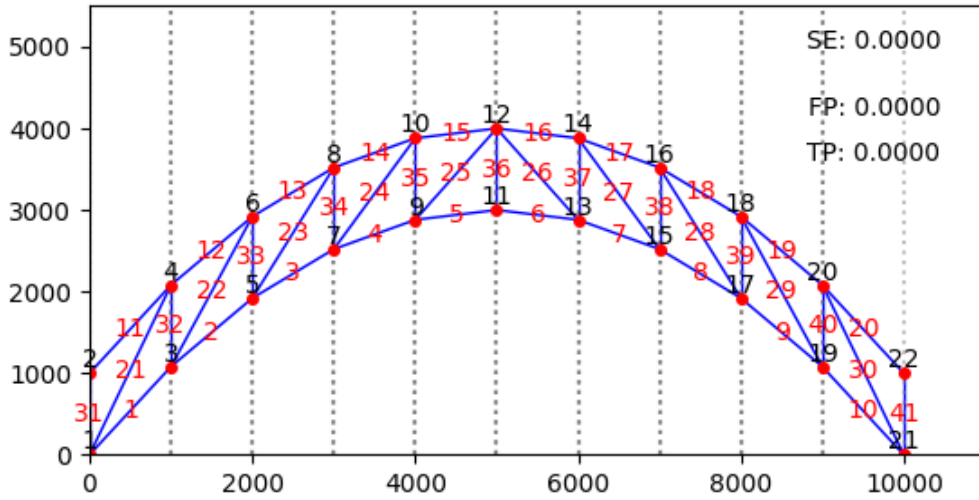
Yukarıdaki bölümlerde aşamalı göçme olayının tanımı yapılmış, yapılan çalışmaların aşamalı göçme olayını ne şekilde irdelediği ve hangi sonuçlara ulaşıldığı anlatılmıştır. Bununla beraber, bu çalışma kapsamında TPO metodu kullanarak kafes sistemlerin aşamalı göçme analizinin Python betiği üzerinden Gradyan Azalma algoritması yardımıyla yapılacağı belirtilmiştir. Oluşturulan Python betiğinin adımları anlatılarak Gradyan Azalma algoritması yardımıyla yapılacağı belirtilmiştir. Oluşturulan Python betiğinin adımları anlatılarak Gradyan Azalma algoritmasının nasıl oluşturulduğu hakkında bilgiler verilmiştir. Verilen bu bilgiler ve bu çalışmanın yapılma amacı çerçevesinde, dört farklı kafes sistem geometrisi ve yükleme durumu bir Excel dosyası üzerinde oluşturularak, hazırlanan kod yardımıyla bu sistemlerin aşamalı göçme mekanizmaları incelenmiştir. Bu kısımda, bu dört örnek ve örneğe dair çıktılar irdelenecektir. Çözüm yapılırken, tüm örneklerde “probe” değeri 10^{-8} , “epsGrad” değeri 10^{-8} , “stepSize” değeri 10^{-4} ve kuvvet artırma faktörü kF 1 olarak alınarak çözümler gerçekleştirilmiştir.

4.1. Bir Numaralı Örnek Kafes Sistem

İlk örnek, Şekil 4.1.’de gösterilen düzlem kafes sistemi içermektedir. Bu sistem, öncelikle yapının kimlik bilgilerini içeren Excel dosyasına işlenmiştir. Kafes yapıya dair genel bilgiler şu şekildedir;

- Sistem, tek tip malzeme kullanılarak oluşturulmuş ve bu malzemenin Elastisite Modülü (E) 200000 MPa olarak belirlenmiştir.
- Sistemi oluşturan çubuklara ait akma gerilmesi 235 MPa’dır.

- Şekil 4.1.'de gösterilen sistem, 22 adet düğüm noktasından oluşmaktadır ve bir kemer sistem geometrisini yansıtmaktadır. 1, 2, 21 ve 22 numaralı düğüm noktaları sabit mesnet özelliği göstermektedir. Yani, yatay ve dikey yönde kuvvet taşıma kapasitelerine sahiptirler.
- Sistem, 42 adet çubuktan oluşmaktadır. Alt yüzünde bulunanlar, alt başlık elemanı olarak nitelendirilirken, L120x120x12 tip çelik çubuklar olarak belirlenmiştir ve bu çubuklara ait kesit alanı 2754 mm²'dir. Üst kısımda bulunanlar ise üst başlık elemanı olarak nitelendirilmiş ve L150x150x15 tip çelik çubuklar olarak belirlenmiştir, bu çubuklara ait kesit alanı 4302 mm²'dir. Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere, sistemde bulunan diyagonal ve dikme çubukları ise L100x100x8 tip çelik çubuklardır ve 1551 mm² kesit alanına sahiptirler.
- Sisteme ait yükleme durumu, Çizelge 4.1.'de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bir numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm

Çizelge 4.1 Bir numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri

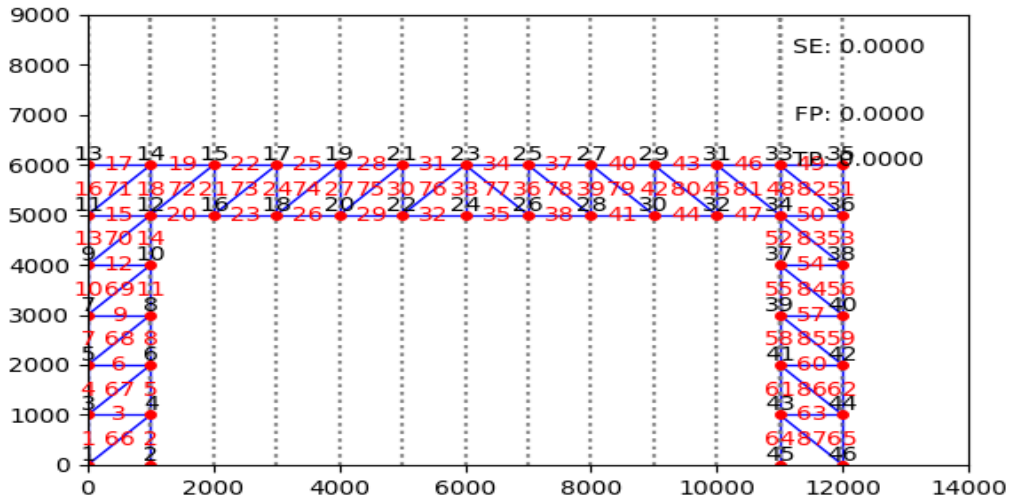
| Düğüm Numarası | X Yönündeki Kuvvetler (KN) | Y Yönündeki Kuvvetler (KN) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0 | -250 |
| 2 | 0 | -250 |
| 3 | 0 | -250 |
| 4 | 0 | -250 |
| 5 | 0 | -250 |
| 6 | 0 | -250 |
| 7 | 0 | -250 |
| 8 | 0 | -250 |
| 9 | 0 | -100000 |
| 10 | 0 | -100000 |
| 11 | 0 | -100000 |
| 12 | 0 | -100000 |
| 13 | 0 | -100000 |
| 14 | 0 | -100000 |
| 15 | 0 | -250 |
| 16 | 0 | -250 |
| 17 | 0 | -250 |
| 18 | 0 | -250 |
| 19 | 0 | -250 |
| 20 | 0 | -250 |
| 21 | 0 | -250 |
| 22 | 0 | -250 |

4.2. İki Numaralı Örnek Kafes Sistem

İkinci örnek, Şekil 4.2.'de gösterilen düzlem kafes sistemdir. Bu sisteme dair veriler, başlangıçta yapının kimlik bilgilerini içeren Excel dosyasına işlenmiştir. Kafes yapıya dair genel bilgiler ise aşağıdaki gibidir;

- Sistem tek tip malzeme kullanılarak oluşturulmuş ve bu malzemenin Elastisite Modülü (E) 200000 MPa'dır.
- Sistemi oluşturan çubuklara ait akma gerilmesi 235 MPa'dır.
- Şekil 4.2.'de de numaralandırıldığı üzere sistem, 46 düğüm noktasından oluşmaktadır. Bu düğüm noktalarından 1, 2, 45 ve 46 numaralı düğüm noktaları sabit mesnet özelliği göstermektedir. Yani yatay ve dikey yönde kuvvet taşıma kapasiteleri vardır. Yapının boyutları 12 metre uzunluğunda 6 metre genişliğindedir.
- Sistem, 87 adet çubuktan meydana gelmektedir. Alt ve üst yüzündeki başlık elemanları ile arada bulunan dikme çubuk elemanlar, L150x150x15 tip çelik çubuklardır ve bu çubuklara ait kesit alanı 4302 mm²'dir. Sistemde bulunan diyagonal durumdaki çubuklar ise L100x100x8 tip çelik çubuklardır ve 1551 mm² kesit alanına sahiptirler.

Sisteme ait yükleme durumu, Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3.'de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Yukarıda karakteristik özellikleri, geometrisi ve yükleme durumu belirtilen ikinci örnek, bu bilgilerin yer aldığı Excel dosyası doldurulduktan sonra, Python betiğinde çözüm sürecini başlatmak için kullanıcıdan sistemi çözmeden önce girmesi beklenen değerler (Probe, stepSize, kF gibi) ilgili kısımlara tanıtılarak çözüm süreci başlatılmıştır.



Şekil 4.2. İki numaralı örneğe ait genel geometrik görünümü

Çizelge 4.2 İki numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri (a)

| Düğüm Numarası | X Yönündeki Kuvvet (KN) | Y Yönündeki Kuvvet (KN) |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 150000 | -250 |
| 2 | 0 | -250 |
| 3 | 150000 | -250 |
| 4 | 0 | -250 |
| 5 | 150000 | -250 |
| 6 | 0 | -250 |
| 7 | 150000 | -250 |
| 8 | 0 | -250 |
| 9 | 150000 | -250 |
| 10 | 0 | -250 |
| 11 | 150000 | -250 |
| 12 | 0 | -250 |
| 13 | 150000 | -250 |
| 14 | 0 | -250 |
| 15 | 0 | -250 |
| 16 | 0 | -250 |
| 17 | 0 | -250 |
| 18 | 0 | -250 |
| 19 | 0 | -250 |
| 20 | 0 | -250 |
| 21 | 0 | -250 |
| 22 | 0 | -250 |
| 23 | 0 | 150000 |
| 24 | 0 | -250 |
| 25 | 0 | 150000 |
| 26 | 0 | -250 |
| 27 | 0 | 150000 |
| 28 | 0 | -250 |
| 29 | 0 | 150000 |

Çizelge 4.3 İki numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri (b)

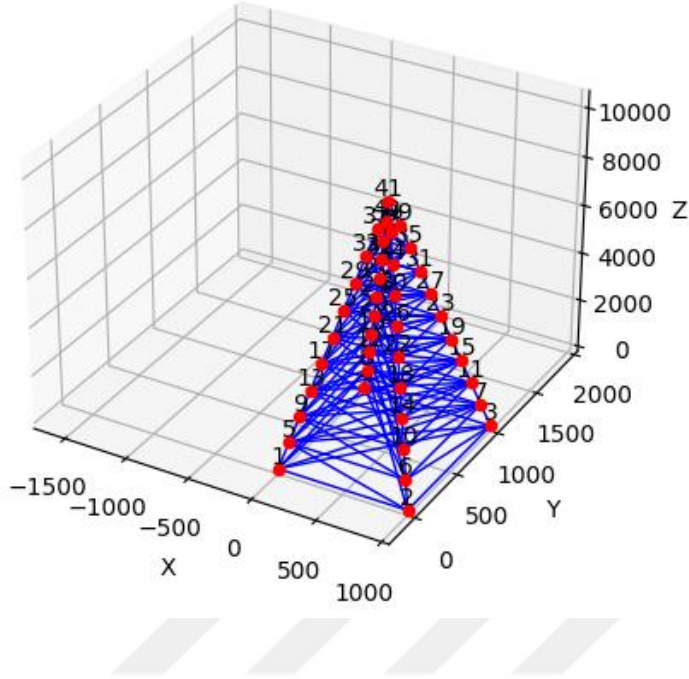
| Düğüm Numarası | X Yönündeki Kuvvet (KN) | Y Yönündeki Kuvvet (KN) |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 30 | 0 | -250 |
| 31 | 0 | 150000 |
| 32 | 0 | -250 |
| 33 | 0 | 150000 |
| 34 | 0 | -250 |
| 35 | 0 | 150000 |
| 36 | 0 | -250 |
| 37 | 0 | -250 |
| 38 | 0 | -250 |
| 39 | 0 | -250 |
| 40 | 0 | -250 |
| 41 | 0 | -250 |
| 42 | 0 | -250 |
| 43 | 0 | -250 |
| 44 | 0 | -250 |
| 45 | 0 | -250 |
| 46 | 0 | -250 |

4.3. Üç Numaralı Örnek Kafes Sistem

Üçüncü örnek, Şekil 4.3.'de gösterilen üç boyutlu kafes sistemdir. Kafes yapıyla ilgili genel bilgiler ise şu şekildedir;

- Sistem aynı tek tip malzeme kullanılarak oluşturulmuş ve bu malzemenin Elastisite Modülü (E) 200000 MPa'dır.
- Sistemi oluşturan çubuklara ait akma gerilmesi 235 MPa'dır.
- Şekil 4.3.'de numaralandırıldığı üzere, sistem 41 düğüm noktasından oluşmaktadır. Sistemin geometrisi 10 metre uzunluğunda, 1 metre genişliğinde ve 1 metre derinliğindedir 1, 2, 3 ve 4 numaralı düğüm noktaları sabit mesnet özelliği göstermektedir.
- Sistem, 158 adet çubuktan oluşmaktadır. Dikey ve yatay çubuklar, L150x150x15 tip çelik çubuklar olup bu çubuklara ait kesit alanı 4302 mm²'dir. Sistemde bulunan diyagonal durumdaki çubuklar ise L100x100x8 tip çelik çubuklardır ve 1551 mm² kesit alanına sahiptirler.

- Sisteme ait yükleme durumu, Çizelge 4.4.'de gösterildiği gibidir. Python betiğinde, kullanıcı tarafından girilmesi gereken değerler girildikten sonra sistem çözümü başlatılmıştır.



Şekil 4.3. Üç numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm

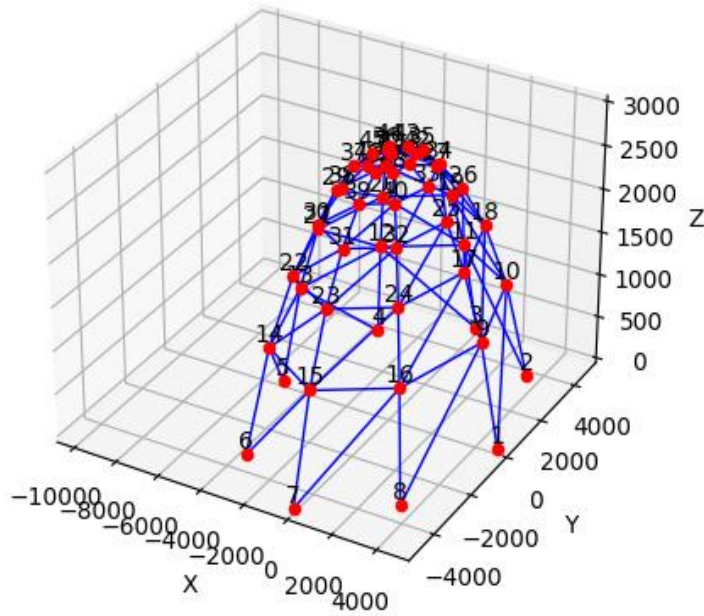
Çizelge 4.4 Üç numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri

| Düğüm Numarası | X Yönündeki Kuvvet (KN) | Y Yönündeki Kuvvet (KN) | Z Yönündeki Kuvvet (KN) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 2 | -70000 | 0 | 0 |
| 3 | -70000 | 0 | 0 |
| 6 | -70000 | 0 | 0 |
| 7 | -70000 | 0 | 0 |
| 10 | -70000 | 0 | 0 |
| 11 | -70000 | 0 | 0 |
| 14 | -70000 | 0 | 0 |
| 15 | -70000 | 0 | 0 |
| 18 | -70000 | 0 | 0 |
| 19 | -70000 | 0 | 0 |
| 22 | -70000 | 0 | 0 |
| 23 | -70000 | 0 | 0 |

4.4. Dört Numaralı Örnek Kafes Sistem

Bu çalışma kapsamında oluşturulan son örnek Şekil 4.4'te gösterilen üç boyutlu kafes sistemdir. Yapının kimlik bilgileri, önceki örneklerde olduğu gibi, Excel dosyasına işlenmiştir. Kafes yapıya dair genel bilgiler ise şu şekildedir;

- Sistem tek tip malzeme kullanılarak oluşturulmuş ve bu malzemenin Elastisite Modülü (E) 200000 MPa'dır.
- Sistemi oluşturan çubuklara ait akma gerilmesi 235 MPa'dır.
- Şekil 4.4.'te numaralandırıldığı üzere, sistem 49 düğüm noktasından oluşmaktadır ve 3 metre uzunluğunda kubbesel geometri göstermektedir. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 numaralı düğüm noktaları sabit mesnet özelliği göstermektedirler. Yani yatay ve dikey yönde kuvvet taşıma kapasiteleri vardır.
- Sistem 120 adet çubuktan oluşmaktadır. Tüm çubuklar, L150x150x15 tip çelik çubuklardır ve bu çubuklara ait kesit alanı 4302 mm^2 'dir.
- Sisteme ait yükleme durumu, Çizelge 4.5.'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.4. Dört numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm

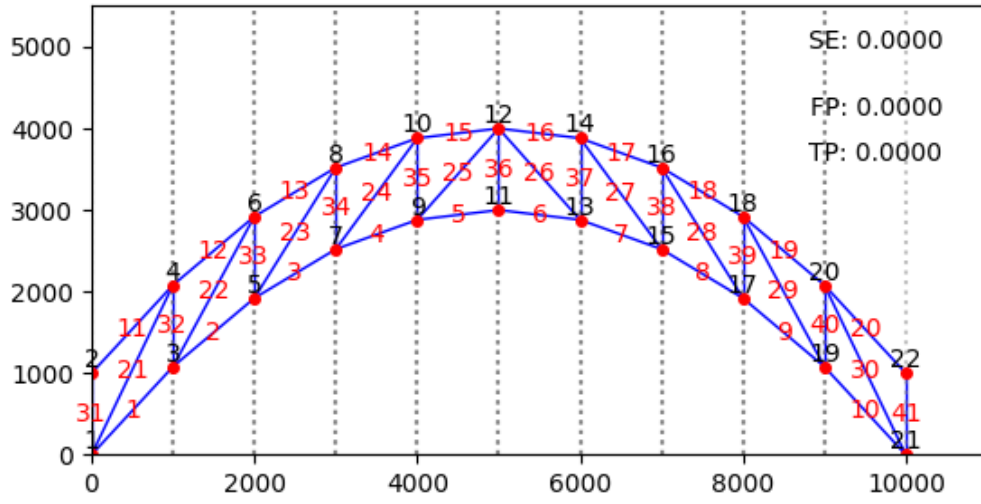
Çizelge 4.5 Dört numaralı örneğe ait düğüm numaraları ve kuvvet büyüklükleri

| Düğüm Numarası | X Yönündeki Kuvvet (KN) | Y Yönündeki Kuvvet (KN) | Z Yönündeki Kuvvet (KN) |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | -150000 | 0 | 0 |
| 9 | -150000 | 0 | 0 |
| 17 | -150000 | 0 | 0 |
| 25 | -150000 | 0 | 0 |
| 33 | -150000 | 0 | 0 |
| 41 | -150000 | 0 | 0 |
| 49 | -150000 | 0 | 0 |
| 2 | -150000 | 0 | 0 |
| 10 | -150000 | 0 | 0 |
| 18 | -150000 | 0 | 0 |
| 26 | -150000 | 0 | 0 |
| 34 | -150000 | 0 | 0 |
| 42 | -150000 | 0 | 0 |
| 8 | -150000 | 0 | 0 |
| 16 | -150000 | 0 | 0 |
| 24 | -150000 | 0 | 0 |
| 32 | -150000 | 0 | 0 |
| 40 | -150000 | 0 | 0 |
| 48 | -150000 | 0 | 0 |

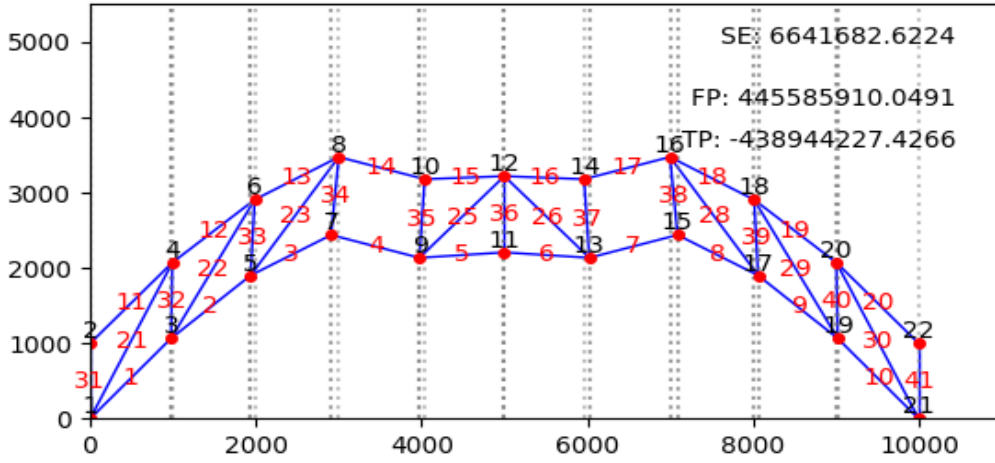
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Bir Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları

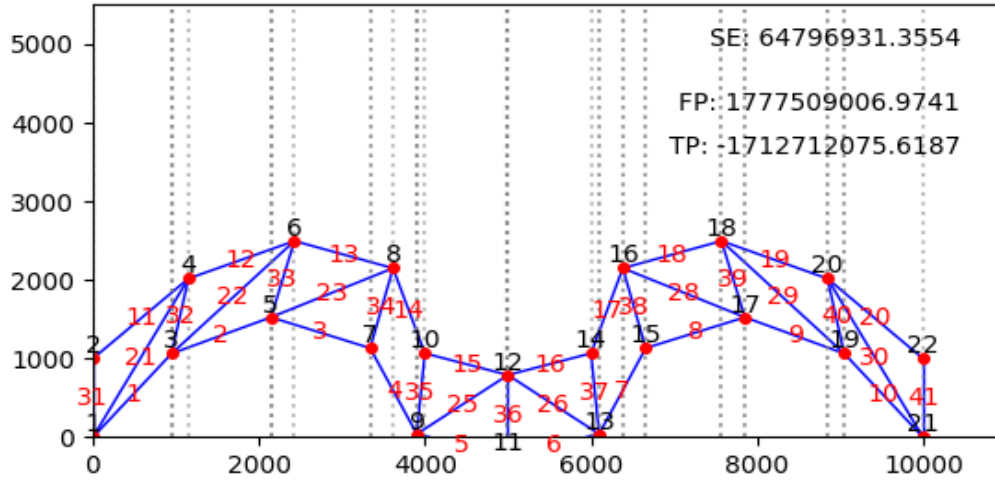
Çözüm, 180 saniye içinde tamamlanmış ve 408 iterasyon gerçekleşmiştir. 408. iterasyonun sonunda sistem, durma koşulunu sağlamıştır. İlk 80 iterasyonda sistem eğilme hareketi göstermiş olup, eğilmenin merkezi, dış yüklemelerin aşağı yönde 100000 Newton değerinde olduğu 9, 10, 11, 12, 13 ve 14 numaralı düğüm noktalarında özellikle belirginleşmiştir. Bununla beraber, 81. iterasyondan itibaren 24 ve 27 numaralı çubukların koparak sistemden çıktığı gözlemlenmiştir. Sistemin simetrik geometrisi ve yükleme durumu, birbirinin simetrisinde olan iki çubuğunun aynı anda kopmasıyla tutarlı bir mekanik davranış sergilemektedir. Çünkü kod betiğinde de belirtildiği gibi, bir çubuğun kopma koşulu, birim uzama değerinin, 0,2 değerini geçmesidir. Bu nedenle, aynı yükleme durumunda ve aynı uzunluktaki iki çubuğun aynı anda kopması olağan bir durum olarak değerlendirilmektedir. Bu iki çubuk dışında sistemde başka bir çubuk kopması gerçekleşmemiştir. 408. iterasyon sonucu sistemin göçmesinin sebebi, sistemin göçme koşul olan, herhangi bir aday vektörün, yani “cand” değişkeninin ilk durumda aralarında maksimum uzaklık bulunan iki düğüm arasındaki mesafeden büyük bir değere gelmesindedir. Bu durum, sistemdeki kritik bir durumu ifade etmektedir, çünkü göçme koşulunun sağlanması, yapısal stabilitenin kaybedildiğini gösterir. Şekil 5.2’de 81. iterasyona ait görüntüde, sistemdeki eğilme ve deformasyonlar gözlemlenebilirken, Şekil 5.3.’te ise sistemin son durumu yer almaktadır. Çıkarılan sonuçlar, sistemin dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü değerlendirmek için önemlidir.



Şekil 5.1. Bir numaralı örneğe ait genel geometrik görünüm



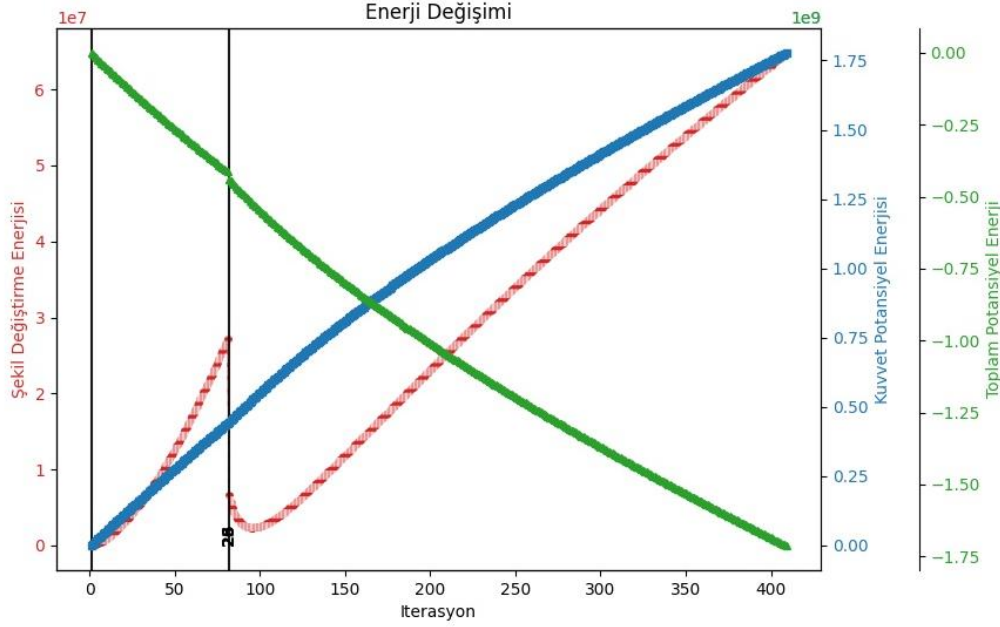
Şekil 5.2. Sistemin 81. iterasyon sonundaki görüntüsü



Şekil 5.3. Sistemin 408.iterasyon sonundaki görüntüsü

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere, çözüm sistemi temelini Total Potansiyel Enerjinin minimum hale geldiği noktaya ulaşmaktan alır. Bu nedenle, her iterasyon sonunda sistemin toplam potansiyel enerjisini oluşturan iki enerji hesaplanır. Bilindiği üzere bunlar şekil değiştirme enerjisi ve dış kuvvetlerin oluşturduğu kuvvet potansiyel enerjisidir. Şekil 5.4.'te çözümü yapılan sistemin enerji değişim grafiği görülmektedir. Kırmızı renk şekil değiştirme enerjisini, mavi renk kuvvet potansiyel enerjisini ve yeşil renk toplam potansiyel enerjiyi temsil etmektedir. Grafikte dikkat çeken noktalar şunlardır;

- İki çubuğun koptuğu 80. iterasyonda şekil değiştirme enerjisi ani bir düşüş yaşamıştır. Bu durum, şekil değiştirme enerjisinin hesabının bir süperpozisyon işlemi olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla denklemden iki çubuğun çıkması sonucu bu düşüş yaşanmıştır.
- Kuvvet potansiyel enerjisinin artış gösterdiği görülmektedir. Denklem 2.6 incelendiğinde, kuvvetin sabit olduğu bir durumda deformasyon çarpanının artmasıyla bu artışın gözlemlenebileceği anlaşılmaktadır. Bu durum sistemin çökme davranışını kanıtlar niteliktedir.
- Son olarak, toplam potansiyel enerjinin her adımda azaldığı ve yıkılma durumu olarak nitelendirilen anda en küçük değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, teorik bilgiyle tutarlılık göstererek sistemin çökme noktasının doğru bir şekilde belirlendiğini göstermektedir.



Şekil 5.4. Bir numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği

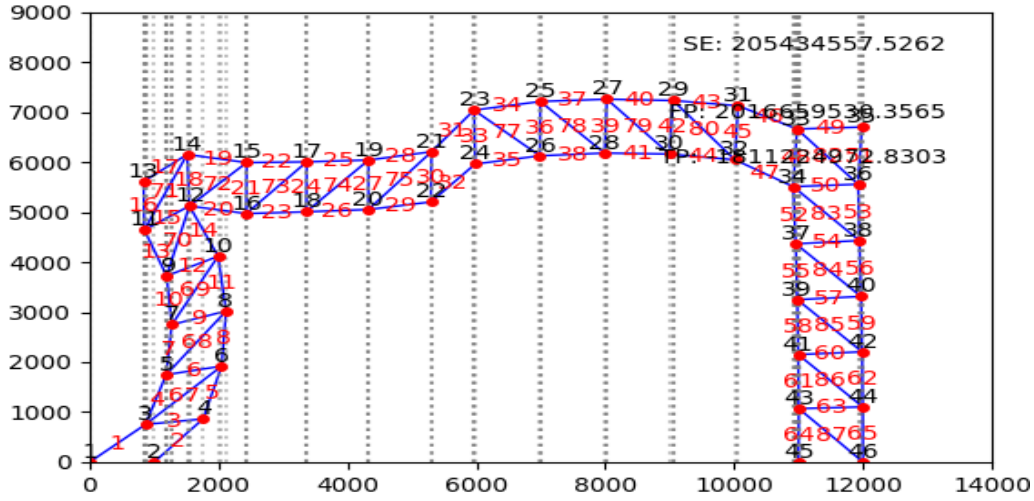
5.2. İki Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları

Çözüm, 218 saniye içinde tamamlanmış olup 330 iterasyon gerçekleşmiştir. Sistem, 330. iterasyonun sonunda sistem durma koşulunu sağlamıştır. Çözüm süreci boyunca toplamda 13 çubüğün koptuğu gözlemlenmiştir. Bu çubuklara dair bilgiler Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

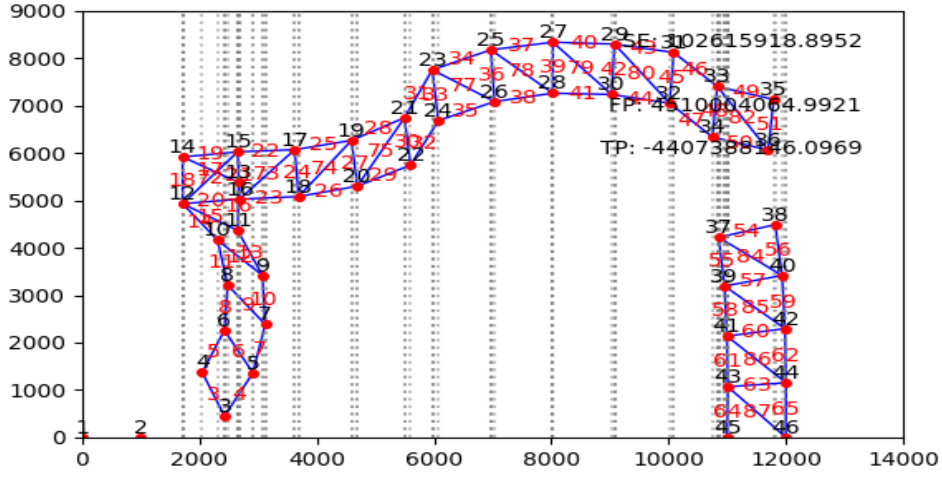
Kopan çubukların yerleri ve sistemin deformasyon hareketi incelendiğinde, oluşan görüntünün sistemin yükleme durumuyla paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir. 330. iterasyon sonucunda sistemin göçme koşulu, “cand” değişkeninin ilk durumda aralarında maksimum uzaklık bulunan iki düğüm arasındaki mesafeden büyük bir değere ulaşmasıyla sağlanmıştır. Şekil 5.5., 165. iterasyona ait görüntüyü, Şekil 5.6. ise sistemin son haline ait görüntüleri içermektedir.

İlk örnekte geçerli olan hesap adımları bu örnek için de geçerlidir. Şekil 5.7'de sistemin enerji değişim grafiği gösterilmektedir. Kırmızı renk, şekil değiştirme enerjisini; mavi renk, kuvvet potansiyel enerjisini ve yeşil renk ise toplam potansiyel enerjiyi temsil etmektedir. Grafikte dikkat çeken noktalar şunlardır;

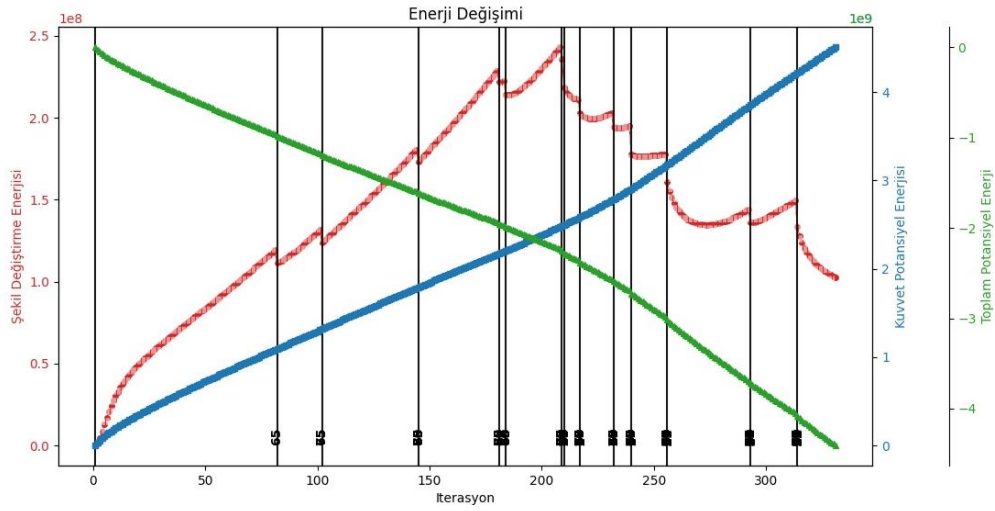
- İlk örnekte olduğu gibi bu örnekte de çubuk kopma anlarında sistemin şekil değiştirme enerjisinde ani düşüşler gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi, bir numaralı örnekte açıklandığı gibi, kopan çubukların hesaptan çıkarılmasıdır.
- Aynı şekilde, her iterasyon sonunda kuvvet potansiyel enerjisi bu örnekte de artış göstermiştir. Bu durum, birinci örnekte olduğu gibi, sistemde sürekli bir deformasyonun meydana geldiğini ve bu davranışın teorik açıklamalarla uyum gösterdiğini göstermektedir.
- Bu örnekte de sistemin toplam potansiyel enerjisi, her adımda azalarak, sistemin çıktığı farz edilen 360. iterasyonda en düşük haline gelmiştir.



Şekil 5.5. Sistemin 165.iterasyon sonundaki görüntüsü



Şekil 5.6. Sistemin 330. iterasyon sonundaki görüntüsü



Şekil 5.7. İki numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği

Çizelge 5.1 İki numaralı örnek kopan çubuk listesi

| Çubuk No. | İterasyon No. |
|------------------|----------------------|
| 66 | 83 |
| 76 | 103 |
| 81 | 146 |
| 67 | 182 |
| 71 | 185 |
| 68 | 210 |
| 2 | 211 |
| 1 | 241 |
| 69 | 218 |
| 83 | 294 |
| 52 | 257 |
| 83 | 294 |
| 53 | 315 |

5.3. Üç Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları

Çözüm, 947 iterasyon süresince devam etmiş ve 1327 saniye sürmüştür. Çözüm esnasında, 9 adet çubuğun koptuğu belirlenmiş ve kopan çubuklarla ilgili bilgiler Çizelge 5.2.'de sunulmuştur.

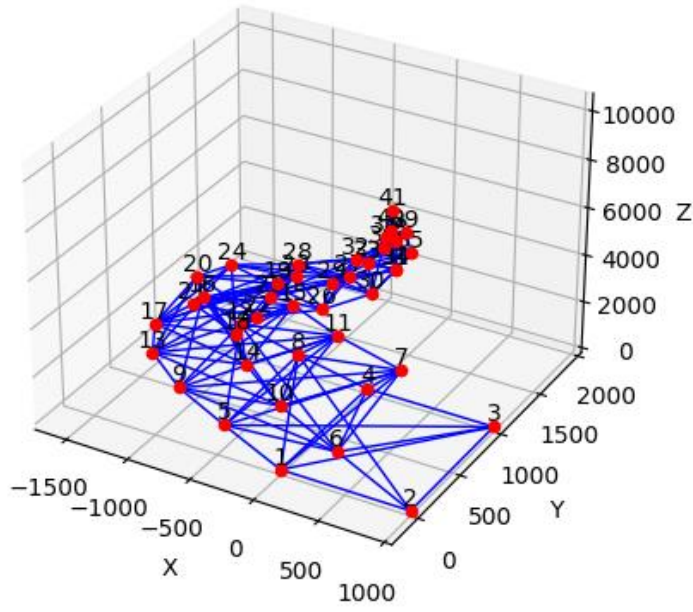
Sistemin çözüm boyunca hareketi, yükleme durumuyla paralellik gösterecek şekilde -x yönünde gerçekleşmiştir.

Şekil 5.8.'de 470. iterasyona ait görüntü, Şekil 5.9.'da ise sistemin son haline ait görüntüler yer almaktadır.

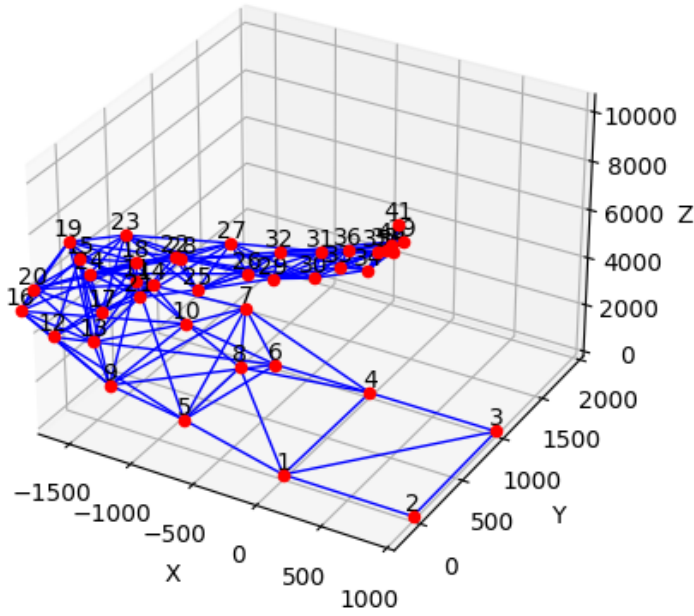


Çizelge 5.2 Üç numaralı örnek kopan çubuk listesi

| Çubuk No. | İterasyon No. |
|-----------|---------------|
| 21 | 434 |
| 77 | 439 |
| 11 | 490 |
| 132 | 531 |
| 141 | 532 |
| 80 | 552 |
| 32 | 816 |
| 83 | 901 |
| 123 | 947 |



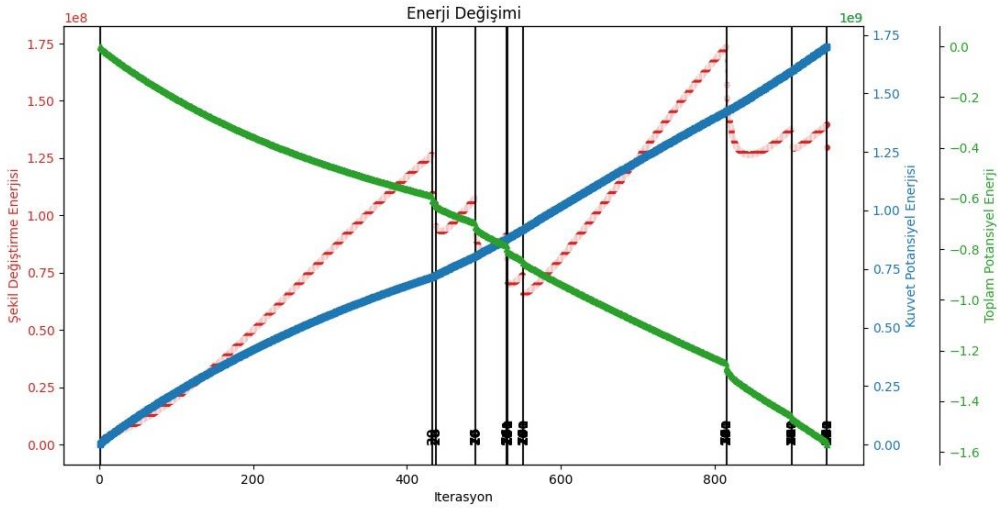
Şekil 5.8. Sistemin 470.iterasyon sonundaki görüntüsü



Şekil 5.9. Sistemin 945.iterasyon sonundaki görüntüsü

Sistem, üç boyutlu bir yapıya sahip olmasına rağmen, çözüm süreci, tıpkı birinci ve ikinci örnekteki iki boyutlu kafes sistemlerin çözüm adımlarıyla tamamen aynıdır. Dolayısıyla, diğer örneklerde geçerli olan hesap adımları bu örnek için de geçerlidir. Şekil 5.10'da çözümü yapılan sistemin enerji değişim grafiği görülmektedir. Kırmızı renk şekil değiştirme enerjisini, mavi renk kuvvet potansiyel enerjisini ve yeşil renk ise toplam potansiyel enerjiyi temsil etmektedir.

Sistemin geometrik özellikleri farklı olmasına rağmen, üçüncü örnek için oluşan enerji değişim grafiğine ait yorumlar, önceki ilk iki örnekle aynıdır. Çubuklar koptuğunda sistemin şekil değiştirme enerjisi azalırken, sürekli deformasyon nedeniyle kuvvetlerin oluşturduğu kuvvet potansiyel enerjisi artar. Bu çalışmanın amaç fonksiyonunu oluşturan minimum potansiyel enerjiye ait değişkenin, sistemin tamamen çöktüğü son iterasyonda en küçük değerde olduğu gözlemlenmiştir. Üç boyutlu bir sistem olmasına rağmen, aynı metodolojiyle çözümlenerek teorik bilgiyle tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.10. Üç numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği

5.4. Dört Numaralı Örnek Analiz ve Bulguları

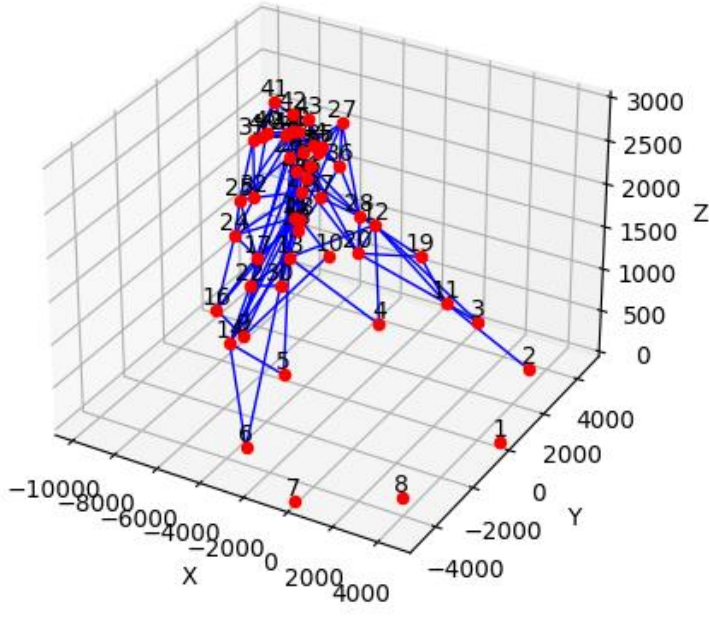
Çözüm, 1642 iterasyon süresince devam ederek 1275 saniye sürmüştür. Çözüm sürecinde, 28 adet çubuğun koptuğu belirlenmiş ve bu çubuklara ait bilgiler Çizelge 5.3'de sunulmuştur.

Sistemin çözüm boyunca hareketi, yükleme durumuyla paralellik göstererek -x yönünde gerçekleşmiştir. Kopan çubukların tamamı ise yükleme yapılan düğüm noktalarına bağlı ya da bu düğüm noktalarıyla çubuk bağı ilişkisi olan çubuklardır.

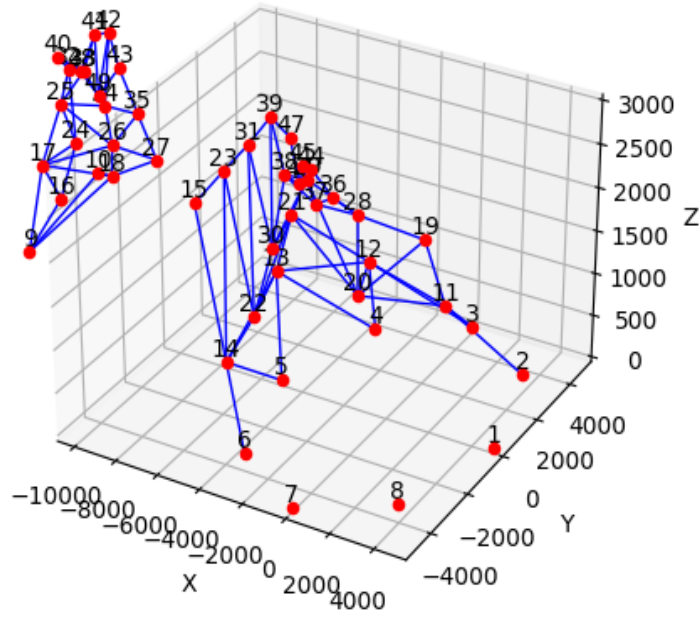
Sistemin çökmesinin nedeni, 1642. iterasyon sonucunda düğüm noktaları arasındaki mesafenin izin verilen maksimum değeri aşmasıdır. Şekil 5.11.'de 820. iterasyona ait bir görüntüyü, Şekil 5.12.'de ise sistemin son haline ait görüntüler yer almaktadır.

Çizelge 5.3 Dört numaralı örnek kopan çubuk listesi

| Çubuk No. | İterasyon No. |
|------------------|----------------------|
| 1 | 69 |
| 42 | 87 |
| 43 | 121 |
| 7 | 156 |
| 87 | 217 |
| 89 | 257 |
| 96 | 359 |
| 37 | 557 |
| 15 | 561 |
| 58 | 647 |
| 36 | 716 |
| 95 | 731 |
| 50 | 742 |
| 98 | 822 |
| 30 | 836 |
| 24 | 873 |
| 79 | 928 |
| 83 | 946 |
| 75 | 1018 |
| 119 | 1081 |
| 67 | 1114 |
| 71 | 1143 |
| 115 | 1157 |
| 111 | 1286 |
| 63 | 1329 |
| 94 | 1437 |
| 103 | 1496 |
| 55 | 1523 |

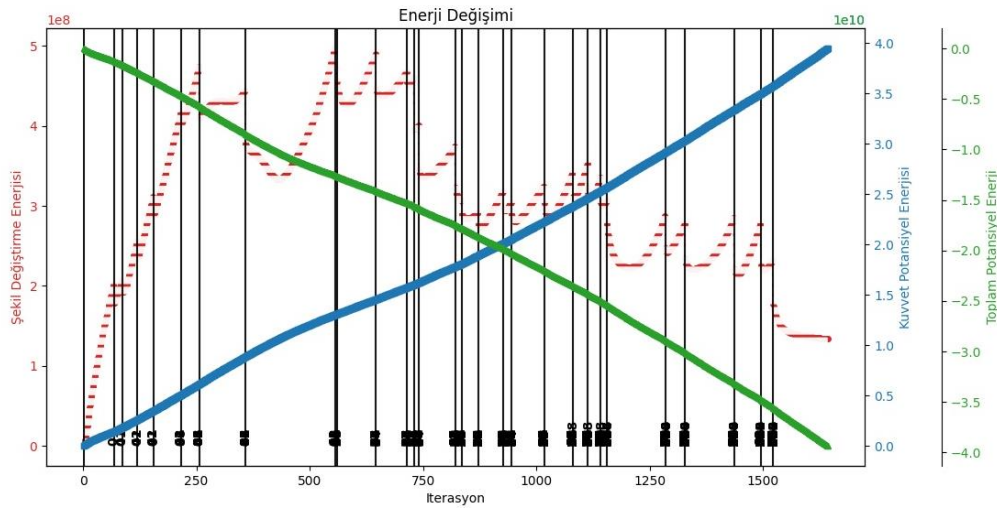


Şekil 5.11. Sistemin 820.iterasyon sonundaki görüntüsü



Şekil 5.12. Sistemin 1642.iterasyon sonundaki görüntüsü

Söz konusu örnek, önceki örneklerden farklı bir geometriye ve malzeme özelliklerine sahip olmasına rağmen, diğer örneklerde geçerli olan hesap adımları bu örneğe de uygundur. Şekil 5.13'te çözümü yapılan sistemin enerji değişim grafiği görülmektedir. Kırmızı renk, şekil değiştirme enerjisini; mavi renk, kuvvet potansiyel enerjisini ve yeşil renk ise toplam potansiyel enerjiyi temsil etmektedir. Bu sistem için oluşan enerji değişim grafiğine ait yorumların, önceki üç örnekle aynı olduğu Şekil 5.13'e bakıldığında anlaşılacaktır. Çubukların koptukları anda, sistemin şekil değiştirme enerjisi azalırken, sürekli bir deformasyon nedeniyle kuvvetlerin oluşturduğu kuvvet potansiyel enerjisi artar. Çalışmanın amaç fonksiyonunu oluşturan minimum potansiyel enerjiye ait değişkenin, sistemin tamamen çöktüğü iterasyonda en küçük değerde olduğu gözlemlenmiştir. Üç boyutlu bir sistem olmasına rağmen, aynı metodoloji kullanılarak teorik bilgiyle tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.13. Dört numaralı örneğe ait enerji değişim grafiği

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Aşamalı göçme fenomeni, önceki bölümlerde tanımlanmıştır ve bu fenomen, bir yapının küçük bir bölümünde başlayan hasarın, zincirleme etkilerle yapının tamamında hasara yol açması olarak anlatılmıştır. Dünya çapında yaşanan çeşitli aşamalı göçme vakaları, bilim insanlarını bu fenomeni daha detaylı incelemeye ve mücadele yöntemleri geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu çalışma, aşamalı göçme fenomenine karşı geliştirilen stratejileri ve müdahale yöntemlerini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiş ve amacına ulaşmıştır.

Literatür incelendiğinde aşamalı göçme olayının etkilerini azaltmayı ve önlem almayı amaçlayan çeşitli yöntemler belirlenmiş, bu yöntemler aracılığıyla tasarım aşamasında yapının sağlaması gereken kriterler oluşturulmuş ve bu kriterlerin karşılığı olarak “sağlamlık” kavramı yapısal tasarımda kendine yer bulmuştur. Bu kavramın temelinde, yapının taşıyıcı elemanlarının bir hasar sonrası oluşan yeni kuvvetleri mevcut taşıyıcılara dağıtabilme ve sünek bir davranış gösterebilme kabiliyeti yatmaktadır. Aşamalı göçme olayının gerçekleştiği gerçek hayat örneklerine bakıldığında, Ronan Point Apartmanı kazası 11 Eylül İkiz Kuleler Saldırıları gibi, yapının yerel bir hasar sonucu oluşan yeni kuvvetleri ve ölü yükleri taşıyıcı elemanlara dağıtamadığını veya dağıtsa dahi taşıyıcı elemanların bu ekstrem yüklemeler karşısında taşıma kapasitelerinin yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Bunun sonucu olarak yapıların aşamalı şekilde yıkıldığı görülmüştür. Bu yeni yükleme durumlarında veya ekstrem yüklemelerle karşılaşıldığında, bu çalışmanın çıktısı olan bilgisayar programı, yapı elemanlarının davranışlarını ve deformasyonlarını incelemek için yeterlilik sağlamaktadır.

Can ve mal güvenliği ile doğrudan ilgili olan konu, bilim adamlarının bu alanda çalışmalar yapmalarına neden olmuş ve aşamalı göçme olayını laboratuvar ortamında incelemek için ampirik çalışmalar yapmalarına yol açmıştır. Ancak, bu tür çalışmaların maliyetli ve zaman alan çalışmalar olduğu, ayrıca gözlemlenmesi zor mekanik durumların yeterince incelenemediği ve deneysel çalışmaların sürdürülebilirlikten uzak olduğu

anlaşılmiştir. Bu nedenle, bu çalışmanın çıktısı olan program, araştırmacıların mekanik analizleri maliyet ve fiziksel zahmet olmadan gerçekleştirmelerine büyük kolaylık sağlayacaktır.

Süregelen deneysel çalışmaların genellikle betonarme veya çelik çerçeve sistemlere odaklandığı, ancak kafes sistemler üzerine yapılan çalışmaların literatürde görece az olduğu dikkat çekici bir durumdur. Bu çalışma, bu eksikliği gidermek amacıyla kafes sistemler odaklanarak, kafes sistemlerin bir aşamalı göçme anındaki davranışlarını detaylı bir şekilde incelemiş ve mekanik davranışlarını ortaya koymuştur. Bu tez, literatürdeki mevcut boşluğu doldurmak amacıyla atılmış bir adım olarak değerlendirilebilir.

Yapısal tasarım, yapısal analiz ve türlü yapısal çözümler, genellikle elastisite teorisinin sayısal çözümleriyle, örneğin sonlu elemanlar, sonlu farklar veya sonlu hacimler gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Ancak, bu tür yöntemlerle çalışılabilmesi için kullanıcı tarafından oluşturulan modellerin kinematik stabilite ve süreklilik göstermesi gerekmektedir. Model üzerindeki düğümlerin süreklilik göstermediği veya bu sürekliliği kaybettiği durumlarda, bu yöntemleri kullanan yazılımların analizi yapamayacağı bilinmektedir. Bu nedenle, yapının sürekliliğini kaybettiği sayısal problemlerin çözümlerinde bu yöntemleri kullanan bilgisayar yazılımlarının kullanılmayacağı anlaşılmaktadır. Deneysel yöntemlerin sürdürülebilir olmaması ve mevcut yapısal analiz yazılımlarının, doğası gereği bir yapıya ait aşamalı göçme analizini çözümleyememesi, yapıların aşamalı göçmesine dair analizlerin yapılabilmesi için yeni bir yaklaşımın geliştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır.

Bu çalışma kapsamında kafes sistemlerin aşamalı göçme analizi için TPO metodunun kullanıldığı ve bu metodun bir optimizasyon probleminden ileri geldiği bilinmektedir. Python betiğinde, optimizasyon problemini çözmek için Gradient Descent (Dereceli Azalma, Gradyan İniş ya da Gradyan Azalma olarak çevrilebilir) algoritmasının kullanıldığı belirtilmiştir. Bu algoritmanın amacı, bir eğri üzerindeki minimum noktaları bulana kadar her bir çözüm adımında (iterasyon) eğimin azalan yönüne doğru denklemin değişkenine (bu çalışmada toplam potansiyel enerjiyi minimum yapan yer değiştirme noktaları) aday

noktalar üretmektir. Dolayısıyla seçilen algoritmanın aşamalı göçme analizinde kullanılabilecek yegâne algoritmalarından biri olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte ilgili optimizasyon probleminin diğer meta-sezgisel yöntemlerle de çözümlenerek sonuçların kıyaslanması isabetli olacaktır. Bu konuda daha fazla ayrıntı ve kıyaslama, gelecek çalışmalarda ele alınacaktır.

Oluşturulan yazılım, Python programlama dili üzerinden geliştirilmiş olup Gradyan Azalma algoritması kullanılarak, sürekli deformasyon yapan bir yapının hareket analizi hususunda (aşamalı göçme analizi) çözüm üretmektedir. Oluşturulan bu yazılım kullanılarak dört farklı yapının analizi yapılmıştır. Bu örneklerden ikisi iki boyutlu ikisi ise üç boyutlu örneklerdir. Program, birbirinden farklı malzeme özelliklerine, geometriye ve yükleme durumuna sahip bu dört yapı için, aşamalı göçme analizini oldukça makul süreler içerisinde yapmış ve görsel çıktılar üretmiştir. Oluşturulan yazılım, yapının geometrisine ve malzeme özelliklerine bağlı olmaksızın çözüm üretebilmesi açısından benzersizdir.

Çalışmada her ne kadar kafes sistemlerin çözümlerine yer verilse de oluşturulan program sayesinde malzeme özellikleri bilinen her türlü yapının aşamalı göçmesinin analizi yapılabilir. Betonarme çerçeve sistemler gibi sistemlerin analizleri bundan sonraki çalışmalarda irdelenecektir. Ayrıca yöntem, akışkanlar mekaniği ve zemin mekaniği gibi sonlu elemanlar yöntemleriyle çözümler yapılan her konu için genelleştirilebilir.

Oluşturulan yazılımın, çözümde kullanılan Excel sayfaları ile birlikte boyutu 200 KB (0.2 MB)'dır. Bu, piyasada kullanılan bazı yapısal analiz programlarının oluşturulan geometriye ve çözüm hassasiyet derecesine bağlı olarak devasa boyutlarda dosyalar oluşturduğu göz önüne alındığında, yazılımın bilgisayarda daha küçük hafıza kaplamasını sağlama konusunda başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Mevcut simülasyon çalışmalarının kafes sistemlerin aşamalı göçme davranışının incelenmesi noktasında araştırmacılara yol gösterdiği anlaşılrsa da, söz konusu çalışmaların hepsinin sonlu elemanlar yöntemleri kullanan paket programlar yardımıyla gerçekleştirildiği

de bir diğerk dikkat çeken nokta olmuştur. Yapılan bu çalışma literatüre çeşitlik kazandırması ve tasarımcılara yeni ve sürdürülebilir bir çözüm yolu sunması nedeniyle önemlidir. Bir numaralı örneğın analizi 180 saniye, iki numaralı örneğın analizi 218 saniye, üç numaralı örneğın analizi 1327 saniye ve dört numaralı örneğın analizi 1275 saniye sürmüştür. Tüm örneğın analizi art arda yapıldığında toplam 50 dakika sürmüş ve dört farklı geometrideki yapının aşamalı göçme analizi tamamlanmıştır. Oluşturulan program, piyasadaki yapısal analiz programlarının yalnızca tek bir yapı için çözüm ürettiğı sürenin yarısı kadar zamanda dört farklı yapı için çözüm üretmiştir. Üstelik, her iterasyona ait görüntüler, göçme sürecinin bir video çıktısı, enerji değışim grafiğı ve hangi çubuğın hangi iterasyonda koptuğı bilgisinin raporlandığı detaylı bir analiz sunmuştur.

Program çıktı olarak sunduğı görüntülerde, çözüm sürecinde kopan yapısal elemanların hangi iterasyonda koptuğunu göstermektedir. Kullanıcı tarafından belirlenen yükleme durumu altında yapılan bu yapısal çözümlerinde, yapının deformasyon davranışları kolaylıkla izlenebilmektedir. Bu özellik, tasarımcıya yapının taşıyıcı elemanlarının malzemesini istediğı gibi değıştirerek yapısal davranışlar arasındaki farkı gösterme imkanı sağlar. Aynı zamanda yükleme durumunu değıştirerek ya da her adımda artırarak yapısal tasarım önemli safhalarında karşılaştırmalı tasarım yapma olanağı sunmaktadır. Bu sayede tasarımcı farklı senaryoları değıerlendirme olanağı bularak en uygun tasarımı belirleme şansına sahip olabilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Adam, J. M., Parisi, F., Sagaseta, J., ve Lu, X. (2018). Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. In *Engineering Structures* (Vol. 173, pp. 122–149). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>
- Allen, D. E., and Schriever, W. R., “Progressive Collapse, Abnormal Loads, and Building Codes,” Structural Failures: Modes, Causes, Responsibilities, ASCE National Meeting on Structural Engineering, Cleveland, Ohio, Apr., 1972, pp. 21–47.
- Bekdaş, G., Kayabekir, A. E., Nigdeli, S. M., ve Toklu, Y. C. (2019). Advanced energy based analyses of trusses employing hybrid metaheuristics. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(9), e1609.
- Byfield, M., Mudalige, W., Morison, C., ve Stoddart, E. (2014). A review of Progressive Collapse research and regulations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 167(8), 447–456. <https://doi.org/10.1680/stbu.12.00023>
- Chen, Y., Wang, L., Yan, S., ve Zhao, X. (2015, February). Study on the progressive collapse of large span truss-beam structures induced by initial member break. In *IABSE Symposium Report* (Vol. 103, No. 6, pp. 112-119). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- Corley, G. (2003). *Structural Investigation Of The Newyork World Trade Center Collapse*
- Derseh, S. A., ve Mohammed, T. A. (2023). Bridge structures under progressive collapse: A comprehensive state-of-the-art-review. In *Results in Engineering* (Vol. 18). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101090>
- Murtha-Smith, E. (1988). Alternate path analysis of space trusses for progressive collapse. *Journal of Structural Engineering*, 114(9), 1978-1999.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Haji, S. H., ve Abdulazeez, A. M. (2021). Comparison of optimization techniques based on gradient descent algorithm: A review. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*, 18(4), 2715-2743.
- Izzuddin, B. A., Vlassis, A. G., Elghazouli, A. Y., ve Nethercot, D. A. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework. *Engineering structures*, 30(5), 1308-1318.
- Ke, C., ve Liu, Q. (2022). Application of Sensitivity Analysis to Progressive Collapse Resistance of Planar Truss Structures. *Applied Sciences*, 12(12), 6273.
- Kim, J., ve Kim, T. (2009). Assessment of progressive collapse-resisting capacity of steel moment frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1), 169-179.
- Krauthammer, T. (2003, December). AISC research on structural steel to resist blast and progressive collapse. In *Proceedings of AISC Steel Building Symposium: Blast and Progressive Collapse Resistance* (pp. 67-81).
- Lin, K., Chen, Z., Li, Y., ve Lu, X. (2022). Uncertainty analysis on progressive collapse of RC frame structures under dynamic column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*, 46, 103811.
- Malla, R. B., ve Nalluri, B. B. (2000). Dynamic nonlinear member failure propagation in truss structures. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 9(2), 111-126.
- Marjanishvili, S. M. (2004). Progressive analysis procedure for progressive collapse. *Journal of performance of constructed facilities*, 18(2), 79-85.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Meguro, K., ve Tagel-Din, H. S. (2002). Applied element method used for large displacement structural analysis. *Journal of Natural Disaster Science*, 24(1), 25-34.
- Pachenari, A., Keramati, A., ve Pachenari, Z. (2013). Investigation of progressive collapse in intermediate RC frame structures. *The structural design of tall and special buildings*, 22(2), 116-125.
- Panahi, S., ve Zahrai, S. M. (2021, June). Performance of typical plan concrete buildings under progressive collapse. In *Structures* (Vol. 31, pp. 1163-1172). Elsevier.
- Rahnavard, R., Fard, F. F. Z., Hosseini, A., ve Suleiman, M. (2018). Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings. *Case studies in construction materials*, 8, 359-379.
- Sasani, M., ve Kropelnicki, J. (2008). Progressive collapse analysis of an RC structure. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(4), 757-771.
- Stylianidis, P. M., Nethercot, D. A., Izzuddin, B. A., ve Elghazouli, A. Y. (2016). Study of the mechanics of progressive collapse with simplified beam models. *Engineering Structures*, 117, 287-304.
- Stylianidis, P. M., Nethercot, D. A., Izzuddin, B. A., ve Elghazouli, A. Y. (2016). Study of the mechanics of progressive collapse with simplified beam models. *Engineering Structures*, 117, 287-304.
- Toklu, Y. C. (2004). Application of optimization techniques to structural analyses: truss example. In *Structures 2004: Building on the Past, Securing the Future* (pp. 1-12).
- Toklu, Y. C. (2004). Nonlinear analysis of trusses through energy minimization. *Computers ve structures*, 82(20-21), 1581-1589.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Toklu, Y. C., Bekdaş, G., ve Temur, R. (2013). Analysis of trusses by total potential optimization method coupled with harmony search. *Structural Engineering and Mechanics*, 45(2), 183-199.
- Toklu, Y. C., ve Uzun, F. (2016). Analysis of tensegric structures by total potential , optimization using metaheuristic algorithms. *Journal of Aerospace Engineering*, 29(5), 04016023.
- Wang, W. M., Li, H. N., ve Tian, L. (2013). Progressive collapse analysis of transmission tower-line system under earthquake. *Advanced Steel Construction*, 9(2), 161-172.
- Wibowo, H. (2009). Progressive collapse analysis of reinforced concrete bridges during earthquakes (Doctoral dissertation, Carleton University).
- Yu, Y., Paulino, G. H., ve Luo, Y. (2011). Finite particle method for progressive failure simulation of truss structures. *Journal of Structural Engineering*, 137(10), 1168-1181.