

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UZAY KAFES SİSTEMLERİN ARTAN DÜŞEY YÜKLER ALTINDA
DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Haluk Emre ALÇİÇEK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UZAY KAFES SİSTEMLERİN ARTAN DÜŞEY YÜKLER ALTINDA
DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Haluk Emre ALÇİÇEK
(501121024)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER

Mayıs 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Haluk Emre ALÇİÇEK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**UZAY KAFES SİSTEMLERİN ARTAN DÜŞEY YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Barlas Özden ÇAĞLAYAN**.....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Güven KIYMAZ
Uluslararası Antalya Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi: **29 Mayıs 2015**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresince benden yardımlarını esirgemeyen, karşılaştığım her türlü problemde bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana yol gösteren ve çalışma disiplini öğreten danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER'e,

Örnek yapıların piyasa şartlarında tasarımını yapmak amacıyla destek aldığım ve bu kapsamda her türlü teknik imkanlarını ve deneyimlerini benim için kullanmaktan çekinmeyen, başta İnş. Yük. Müh. Tuncay KAYA olmak üzere USKON Uzay Sistem Konstrüksiyonları San. ve Tic. A.Ş. çalışanlarına,

Sadece tez çalışmam boyunca değil hayatımın her anında bana maddi ve manevi konularda destek olan aileme,

Lisansüstü eğitimim süresince Lisansüstü Burs Programı kapsamında bana maddi olarak destek veren "TÜBİTAK" Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na,

sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2015

Haluk Emre ALÇİÇEK
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Çalışma Kapsamı.....	2
1.3. Literatür Araştırması	3
1.3.1. Collins (1981)	3
1.3.2. El-Sheikh ve McConnel (1993).....	3
1.3.3. Huybrechts ve Tsai (1996).....	4
1.3.4. Fülöp ve Ivanyi (2004)	4
1.3.5. Uriz ve diğ. (2008).....	4
1.3.6. Lee ve Noh (2010)	4
2. UZAY KAFES SİSTEMLER.....	7
2.1. Genel Bilgiler	7
2.2. MERO Düğüm Noktası Sistemi	8
3. MODEL UZAY KAFES ÇATI SİSTEMLERİNİN TASARIMI.....	11
3.1. FrameCAD Yazılımının İncelenmesi.....	11
3.2. FrameCAD Yazılımı ile UKS Boyutlandırma Esasları.....	12
3.2.1. Tasarımda kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri	13
3.2.2. Çekme etkisi altındaki elemanlarda boyutlandırma esasları	14
3.2.3. Basınç etkisi altındaki elemanlarda boyutlandırma esasları	15
3.3. 5x5 Modüle Sahip Uzay Kafes Sistem (Model A).....	18
3.3.1. Sistem tasarımı için bilgiler	18
3.3.2. Sistem elemanlarının tasarımı.....	19
3.4. Basınç Çubuklarının Narinlikleri Sınırlandırılmış 5x5 Modüle Sahip Uzay Kafes Sistem (Model B).....	21
3.4.1. Sistem tasarımı için bilgiler	21
3.4.2. Sistem elemanlarının tasarımı.....	21
4. UZAY KAFES ÇATI SİSTEMLERİN ANALİTİK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI VE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZLERİ	23
4.1. Çubuk Eleman Analizleri	23
4.1.1. Analiz varsayımları.....	24
4.1.2. Yükleme protokolünün oluşturulması	25
4.1.3. Basit çubuk modeli	26
4.1.4. Küre ve bulonlu çubuk modeli	28

4.1.5. Analizlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi.....	29
4.1.5.1. FEMA-356 plastik mafsal tanımıyla sonuçların doğrulanması.....	32
4.2. Model Yapıların OpenSEES Modellerinin Hazırlanması	34
4.2.1. Çubuk elemanlar	34
4.2.2. Birleşim noktaları.....	35
4.2.3. Malzeme modelleri	35
4.2.4. Yükleme durumları	36
4.2.5. Çözüm akış şemasının ve OpenSEES veri dosyalarının hazırlanması	37
4.2.6. OpenSEES modelinin doğrulanması.....	39
4.3. Yapıların Düşey Yükler Altında Statik İtme Analizi	39
4.3.1. Model A analizleri	40
4.3.2. Model B analizleri.....	47
4.4. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	53
4.5. Maksimum Deplasman Yapan Düğüm Noktaları Dikkate Alınarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları.....	55
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	63

KISALTMALAR

AISC	: American Institute of Steel Construction
ATC	: American Technology Council
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
MATLAB	: Matrix Laboratory
MERO	: Mengerlinghausen Rohrbauweise
OpenSEES	: Open System for Earthquake Engineering Simulation
SAP	: Structural Analysis Program
TS	: Türk Standartları
UKS	: Uzay Kafes Sistem

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : UKS elemanlarının mekanik özellikleri.	13
Çizelge 3.2 : Model A'da kullanılan eleman bilgileri.	20
Çizelge 3.3 : Model A'da çubuklara gelen maksimum kuvvet ve gerilmeler.	20
Çizelge 3.4 : Model B'de kullanılan eleman bilgileri.	22
Çizelge 3.5 : Model B'de çubuklara gelen maksimum kuvvet ve gerilmeler.	22
Çizelge 4.1 : Örnek profil bilgileri.	25
Çizelge 4.2 : FEMA356 plastik mafsal modeli verileri [22].	33
Çizelge 4.3 : Analiz Modelleri	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : MERO düğüm noktası.....	8
Şekil 2.2 : Küre eleman kesiti.....	9
Şekil 2.3 : Boru enkesitli profil.....	10
Şekil 2.4 : Bulon, somun ve pim.	10
Şekil 3.1 : Kritik bulon kesitleri.	14
Şekil 3.2 : Kritik burkulma gerilmesi - narinlik oranı diyagramı.	16
Şekil 3.3 : Kritik somun kesiti.	17
Şekil 3.4 : 5x5 Modüllü sistemin üç boyutlu görünümü.	18
Şekil 3.5 : 5x5 modüllü sistemin plan ve kesit görünüşü.	19
Şekil 3.6 : Örnek modelde kesitleri değiştirilen çubuk elemanlar.	21
Şekil 4.1 : Çevrimsel yükleme protokolü [19].	25
Şekil 4.2 : Başlangıç kusuruna sahip basit çubuk eleman modeli.	26
Şekil 4.3 : (3.1) için başlangıç kusuru modeli.	26
Şekil 4.4 : Tüp Enkesit sonlu eleman modeli.	27
Şekil 4.5 : “Steel02” Materyali için Gerilme Şekil Değiştirme Diyagramı [21].	27
Şekil 4.6 : Bulon ve küre ile tanımlı çubuk eleman modeli.....	28
Şekil 4.7 : Bulon-Somun malzeme modeli.	29
Şekil 4.8 : 1, 2, 3 ve 4 nolu çubukların çevrimsel yükleme altında yük-yerdeğiştirme grafikleri.	30
Şekil 4.9 : 1, 2, 3 ve 4 nolu çubuklar için çevrimsel yükleme zarf eğrileri.	30
Şekil 4.10 : 1 ve 1a çubukları.	31
Şekil 4.11 : 2 ve 2a çubukları.	31
Şekil 4.12 : 3 ve 3a çubukları.	32
Şekil 4.13 : 4 ve 4a çubukları.	32
Şekil 4.14 : FEMA356 plastik mafsalsal modeli [22]......	33
Şekil 4.15 : 1,2,3 ve 4 nolu çubuklar için FEMA356 plastik mafsalsal tanımı ile elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri.	34
Şekil 4.16 : Çubuk eleman boykesiti ve enkesiti.	35
Şekil 4.17 : “Hysteretic” malzeme modeli.	36
Şekil 4.18 : Yükleme durumları (a) tam yükleme, (b) yarım yükleme, (c) çeyrek yükleme.	37
Şekil 4.19 : OpenSEES akış şeması.....	38
Şekil 4.20 : OpenSEES ve FrameCad çubuk kuvvetleri.	39
Şekil 4.21 : A5BT ve A5NT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	41
Şekil 4.22 : A5BT ve A5NT durumlarında kritik elemanlar.	41
Şekil 4.23 : A5BY ve A5NY durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	42
Şekil 4.24 : A5BY ve A5NY durumlarında kritik elemanlar.	42
Şekil 4.25 : A5BC ve A5NC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	43
Şekil 4.26 : A5BC ve A5NC durumlarında kritik elemanlar.....	43
Şekil 4.27 : A3BT ve A3NT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	44
Şekil 4.28 : A3BT ve A3NT durumlarında kritik elemanlar.	44

Şekil 4.29 : A3BY ve A3NY durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	45
Şekil 4.30 : A3BY ve A3NY durumlarında kritik elemanlar.	45
Şekil 4.31 : A3BC ve A3NC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	46
Şekil 4.32 : A3BC ve A3NC durumlarında kritik elemanlar.	46
Şekil 4.33 : B5NT ve B3NT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	47
Şekil 4.34 : B5NT ve B3NT durumlarında kritik elemanlar.	47
Şekil 4.35 : B5NY ve B3NY durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	48
Şekil 4.36 : B5NY ve B3NY durumlarında kritik elemanlar.	48
Şekil 4.37 : B5NC ve B3NC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	49
Şekil 4.38 : B5NC ve B3NC durumlarında kritik elemanlar.	49
Şekil 4.39 : B5BT ve B3BT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	50
Şekil 4.40 : B5BT ve B3BT durumlarında kritik elemanlar.	50
Şekil 4.41 : B5BY ve B3BY durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	51
Şekil 4.42 : B5BY ve B3BY durumlarında kritik elemanlar.	51
Şekil 4.43 : B5BC ve B3BC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.	52
Şekil 4.44 : B5BC ve B3BC durumlarında kritik elemanlar.	52
Şekil 4.45 : Tüm durumlar için Model A yük-yerdeğiştirme eğrileri.	53
Şekil 4.46 : Model A taşıma kapasitesi değerleri.	54
Şekil 4.47 : Tüm durumlar için Model B yük-yerdeğiştirme eğrileri.	54
Şekil 4.48 : Model B taşıma kapasitesi değerleri.	55
Şekil 4.49 : Yükleme durumları için kontrol düğüm noktaları (a) yarım yükleme, (b) çeyrek yükleme.	56
Şekil 4.50 : Maksimum deplasman yapan düğüm noktalarına göre Model A yük- yerdeğiştirme eğrileri.	56
Şekil 4.51 : Maksimum deplasman yapan düğüm noktalarına göre Model B yük- yerdeğiştirme eğrileri.	57

SEMBOL LİSTESİ

- A_b : Bulonun dış açılmamış enkesit alanı
 A_{cr} : Somunun kritik enkesit alanı.
 A_g : Çekme elemanının brüt enkesit alanı
 D : Küre çapı
 d_1, d_2 : Bulon çapları
 d : Boru çapı
 d_b : Bulon çapı
 d_d : Somunun dış çapı
 d_i : Somunun iç çapı
 d_p : Pim deliği çapı
 E : Elastisite modülü
 F_{bul-em} : Bulon çekme emniyet gerilmesi
 F_{cr} : Kritik burkulma gerilmesi
 $F_{çem}$: Çelik malzeme çekme emniyet gerilmesi
 F_{som-em} : Somun emniyet gerilmesi
 F_u : Çelik malzeme çekme gerilmesi
 F_{ub} : Bulon çekme gerilmesi
 F_y : Çelik malzeme akma gerilmesi
 F_{yb} : Bulon akma gerilmesi
 F_{ys} : Somun akma gerilmesi
 K : Burkulma boyu katsayısı
 L : Eleman uzunluğu
 P_d : Çubuk eleman güvenli basınç dayanımı
 P_s : Somunda güvenli basınç dayanımı
 r : Kesit atalet yarıçapı
 t : Boru kesit et kalınlığı
 T_b : Bulonda güvenli çekme dayanımı
 T_d : Güvenli çekme dayanımı
 Δ : Eksenel boy değişimi
 Δ_C : Burkulma şekildeğiştirme

- Δ_T : Akma ŐekildeġiŐtirmesi
 e_0 : Maksimum baŐlangıć kusuru
 ε_{yb} : Bulon akma ŐekildeġiŐtirmesi
 ε_{ub} : Bulon kopma ŐekildeġiŐtirmesi
 ξ : Bulon-küreye birleşim uzunluġunun bulon çapına oranı
 η : Bulon birleşim yüzeyi çapının bulon çapına oranı
 θ : Küreye baġlanan bulonlar arasındaki en küçük açı
 λ : Narinlik oranı
 λ_p : Elastik-Plastik burkulma sınır narinlik deġeri
 π : Pi sayısı
 Ω : Basınç elemanında güvenlik katsayısı
 ϑ_0 : BaŐlangıć kusuru

UZAY KAFES SİSTEMLERİN ARTAN DÜŞEY YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

ÖZET

Çelik uzay kafes sistemler çubuk elemanların birbirlerine mafsallı bağlandığı, büyük açıklıkların geçilmesi için yaygın olarak kullanılan üç boyutlu sistemlerdir. Yapı zati ağırlığının hafif olması, estetik formların kolayca verilebilmesi, düşük maliyetli olması, imalat ve montajının kolay olması bu sistemleri tercih edilebilir hale getirmektedir. Ancak bu tip yapıların büyük açıklıklara sahip olması yapının yük yığılmalarına karşı hassas olmasını da beraberinde getirmektedir. Yağmur yükü, kar yükü gibi yüklerin tahliye edilememesi ve belli bölgelerde birikmesi sistemlerin göçmesine neden olabilmektedir. Ayrıca çubuk eleman narinlikleri ve çubuk eleman başlangıç kusuru da çubuk eksenel basınç dayanımlarının belirlenmesinde etkin olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, plan boyutu 15mx15m olan bir uzay kafes çatı sistemi iki farklı durum dikkate alınarak tasarlanmış ve düşey doğrultuda artan düşey yükler altında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için sistem modelleri üç boyutlu olarak OpenSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) yazılımı ile geliştirilmiştir. Çatı sistemlerinden biri uzay kafes sistemlerin projelendirilmesinde kullanılan FrameCAD yazılımı ile optimum enkesitler kullanılarak boyutlandırılırken, diğeri basınç elemanlarının narinlikleri belirli düzeyde sınırlandırılarak tasarlanmıştır. Her iki modelde de bulonların ve başlangıç kusurlarının etkileri dikkate alınmaktadır. Ayrıca düşey yüklerin çatı yüzeyinin 1/4'ünde 1/2'sinde ve tamamında yayılı bir biçimde artması da karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Birinci bölümde tezin amacı ve kapsamı belirtilerek konu ile ilgili mevcut çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir.

İkinci bölümde uzay kafes çatı sistemler hakkında genel bilgiler yer almaktadır. Uzay kafes sistemi oluşturan elemanlardan ve bu elemanların özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir.

Örnek yapıların tasarlandığı üçüncü bölümde statik analiz ve boyutlandırma için kullanılan FrameCAD programı ile bu program tarafından esas alınan genel prensipler tanıtılmıştır. Çekme ve basınç etkisindeki elemanlarda sınır durumlar belirtilmiştir. Programın boyutlandırma esasları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Model yapı olarak incelenecek olan dört köşe noktasından basit mafsallı, her iki yönde 15m açıklığa ve 1.5m yüksekliğe sahip uzay kafes çatı sistemi bu program kullanılarak boyutlandırılmıştır. Daha sonra aynı sistem üzerinde basınç çubuklarının narinlikleri belirli bir değerle sınırlandırılarak yeni bir sistem daha oluşturulmuştur. Tasarımda yapılan varsayımlar ve boyutlandırma sonucunda sistemlerde kullanılan eleman bilgileri bu bölümde verilmiştir.

Dördüncü bölümde uzay kafes çatı sistemlerinin OpenSEES programında modellenmesi anlatılmıştır. Burada ilk olarak, kafes sistem çubuk elemanı, sadece boru enkesitli eleman dikkate alınarak ve bu elemanla birlikte küre ve bulon da temsil edilerek iki ayrı şekilde modellenmektedir. Çubuk elemanların tersinir çevrimsel yükleme altında davranışları, ATC-24 (Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures)'te belirtilen yöntem esas alınarak oluşturulan yükleme protokolü uygulanarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar FEMA356'da öngörülen plastik mafsal tanımı ile karşılaştırılarak çubuk elemanların davranış modelleri oluşturulmuştur.

Bu bölümde, örnek uzay kafes çatı sisteminin OpenSEES modeli, çubuk elemanlar için belirlenen davranış modelleri esas alınarak hazırlanmıştır. Çatı üzerinde meydana gelebilecek yük yığılmalarının (kar veya yağmuş suyu birikmesi) çatı taşıyıcı sistemi üzerine etkisini araştırmak amacıyla, çatı yüzeyinin tamamının, yarısının ve çeyreğinin yük etkisinde olması durumu geliştirilen analitik modellerde ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Analitik modellerin doğrusal olmayan analizleri artan düşey yükler altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çubuk elemanlarda oluşabilecek olası başlangıç kusurunun sistem davranışına etkisini göz önüne almak üzere, farklı eğrilik sınır değerleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen yük-yerdeğiştirme grafikleri bu bölümde verilmiştir.

Son bölümde çalışma kapsamında yapılan analiz sonuçları, çubuk eleman narinliklerinin, yük yığılmalarının, başlangıç kusurunun ve bulonların etkileri açısından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerin sonucunda uzay kafes çatı sistemlerin tasarımında dikkate alınması önerilen hususlar belirtilmiştir.

NONLINEAR ANALYSIS OF SPACE ROOF TRUSSES UNDER MONOTONICALLY INCREASING VERTICAL LOADING

SUMMARY

Space grid trusses, especially with MERO joint systems, are widely used systems for roof structures that have large areas and aesthetic forms, by the help of their light self-weight, high stiffness, lower cost and flexibility. Moreover, easy manufacture and assembly of these systems makes them preferred systems as well. However, space grid trusses are very sensitive to load accumulation conditions and manufacture and design faults.

The main objective of these thesis is to investigate the behaviour of space roof trusses for the cases which are fourfold: load accumulation, initial imperfection, slenderness ratio and bolt effect. To observe the effect of slenderness ratio, two sample roof structures were taken into consideration, which have different tube sections while their shapes are totally same. Also, initial imperfection and bolt effects were introduced into the material models of tube elements rather than explicitly taking into account.

Space trusses were modeled by using OpenSEES (**O**pen **S**ystem for **E**arthquake **E**ngineering **S**imulation) Software and they were subjected to nonlinear pushover analysis in vertical direction under three load accumulation forms which are covering a full, a half and a quarter of the roof area. According to the results of analyses, load-displacement curves were discussed and some inferences and recommendations were given.

This thesis which its outline is given above, consists of five main parts.

In the first chapter of this study, the topic and aim of the thesis are given, following methodology is defined briefly. Afterwards, literature review about the subject is appended.

The second chapter of the thesis contains general definition of the space grid trusses and using elements. Frame elements and MERO joint which includes bolt, nut, pin, and sphere, are introduced briefly.

In the third chapter of this study, two space roof trusses, denoted Model A and Model B, were modeled. The considered double layer grid systems span is 15m x 15m and have 5 square modules in both X and Y direction. Module of size is 3m x 3m while height of the roof 1.5m. The roof was simply supported at four corner nodes of the bottom layer. Truss members were round hollow structural section. All bottom layer, top layer and diagonal members were connected with MERO system at joint nodes.

Design of the Model A was carried out with FrameCad software used for space grid system design in the industry. According to the TS648 "Building Code for Steel Structures" and FrameCAD Software assumptions, design of the truss members are explained for two case; under tension loading and under compression loading. Bolts

are designed only for tension loading while nuts are designed only for compression loading.

FramedCad initially assigns random truss members and performs elastic analysis by using matrix displacement methods iteratively under design criteria such as load carrying capacity of the members. All members were reassigned at each step until attaining optimum design taking lightweight and serviceability limitations into consideration. Deflection of the system is checked manually. After that, Model B was designed by restricting slenderness ratio of compression members with 80. New members were reassigned manually and system was checked by SAP2000 software under strength and serviceability conditions.

In the fourth section, initially, tube elements were modeled with OpenSEES and reversal cyclic loading applied on tube members to obtain the behavior of the brace members. Brace elements was modeled using nonlinear beam-column element which is defined in OpenSEES manual. Fiber sections with uniaxial Menegotto-Pinto steel material were used to characterize cross sections of the elements. Initial imperfection was introduced at mid and quarter spans of the tubes.

Spheres and bolts were located at the ends of the braces. Bolt material was defined with hysteretic material definition which reflects the bolt characteristics in tension and the nut characteristics in compression simultaneously, depending on the assumption that there is no compression failure in nut elements before buckling of tube elements. Furthermore, corotational transformation was used to take the second-order geometry effects into account.

Members which have tube, bolt and nut combinations were analyzed under reversal cyclic loading to obtain force-displacement relations of the members. Cyclic loading analysis were performed in according to the ATC-24 (Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures) loading protocols, correspondingly target displacements of each step were evaluated depending on ATC-24. After all, utility of this model was checked by comparing force-displacement curves of elements with plastic hinge description given in FEMA356 (Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings).

Space grid systems were modeled in OpenSEES to perform pushover analysis in vertical direction. Brace member was modeled by nonlinearBeamcolumn element is well suited for spread plasticity along the element with five integration points along length of the element. Cross sections of braces were modeled using fiber sections and dimensions of the cross sections were assigned depending on elastic analysis results. All members were assumed to have pinned connection at their ends. To account for the rotational releases at the ends of the braces, zeroLengthelement was used at the ends. Rotations were characterized by elastic material with low young modulus to allow rotational movements, while translational movements were constrained by using equalDOF command. Behavioral models of tube members were derived from result of the cyclic analyses performed in the previous subchapter, for each individual tube including, nut and bolts.

By following to analysis flowchart for OpenSEES, which is prepared in this section, OpenSEES data files were generated by the help of Matlab (Matrix Laboratory) Software.

To conduct pushover analyses in vertical direction, an incremental concentrated vertical loads were applied on top layer nodes in accordance with three load patterns,

which represent the load accumulation conditions. Initial imperfection ratios of $L/300$ and $L/500$ and bolt effects were also introduced into the material models.

Pushover analyses were performed for 24 cases using displacement-control procedure at middle joint node of the system. Then, force-displacement curves were obtained for each cases.

In the last section, some inferences obtained from comparison of the analysis' results were mentioned. According to these, in Model A which was designed by using optimum tube sections, member failure due to the buckling was resulted in a sudden collapse, while in Model B collapse behaviour was determined by yielding of tension members. Hence, Model A is more brittle than Model B which had limited slenderness ratio on its elements. Also, results were discussed in terms of initial imperfection, bolt definition and load accumulation effects.

1. GİRİŞ

Uzay kafes sistemler, birbirlerine mafsallı düğüm noktalarıyla bağlı, sadece eksenel kuvvet (çekme ve/veya basınç) aktaran doğrusal çubukların oluşturduğu üç boyutlu sistemlerdir [1]. Bu tür sistemler, geometrisine bağlı olarak düzgün dörtyüzlü, kare piramit gibi birim elemanlardan oluşmakta ve bu elemanlara eklenecek çubuklarla istenilen boyuta ve forma getirilmektedir.

Uzay kafes sistemler yüksek hiperstatiklik derecesine sahip olmakla beraber aynı zamanda çok hafiftirler. Sistemin hafif olması nedeniyle taşıyıcı sistem zati yükü azalmakta, dolayısıyla taşınması gereken zati yükün geçilen açıklığa oranı çok küçük seviyelerde kalmaktadır [2]. Ayrıca sistemin farklı geometrik şekillerin uygulanmasına olanak sağlaması, geniş açıklıkların geçilmesinde ve estetik formların oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır. Bu sayede stadyumlar, hava alanları, alışveriş merkezleri, sergi ve fuar salonları gibi geniş hacimlere ve mimari formların uygulanmasına ihtiyaç duyulan yapılar, uzay kafes sistemler kullanılarak ekonomik ve hızlı bir şekilde inşa edilebilmektedir [3].

1.1. Tezin Amacı

Uzay kafes sistemler yapı itibari ile çok hafif sistemlerdir ve kullanılan her bir elemandan maksimum verim alınabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu durumun doğal sonucu olarak yüksek dereceden hiperstatik olmalarına rağmen, kafes sistemde bir bölgedeki çubukların dayanımının aşılması sistemin tamamının göçmesine yol açabilmektedir.

Uzay kafes sistemlere bakıldığında diğer betonarme ve çelik yapıların aksine herhangi bir afet duruma maruz kalmadan, doğal şartlar altında göçme olayına daha fazla rastlanmaktadır. Bu durum iki sebepten meydana gelebilmektedir. Birincisi her ne kadar fabrika ortamında kontrollü bir şekilde üretim yapılabilseyse de üretim ve montaj hataları, diğeri ise tasarım aşamasında yapılan yük varsayımlarının gerçekleşen durumdan farklı olmasıdır. Çatı parapetleri, sifon sisteminin tıkanması,

gibi etkenler yük yığılmalarına neden olmakta ve çatı sistemini tasarımda dikkate alınan yük seviyesinin üzerinde bir yük seviyesi etkisinde bırakmaktadır. Gerek uzay kafes sistemlerin çok büyük açıklıkları kaplaması nedeniyle çevre koşullarına fazlaca maruz kalması, gerekse projede yük yığılmalarına ortam hazırlayacak detayların olması, tasarım aşamasında öngörülen yükleme durumlarının dışında farklı durumların oluşmasına ortam hazırlamaktadır.

Bunların yanında üretim koşullarından dolayı çubuk tamamen doğrusal olarak üretilmemekte, bir miktar başlangıç kusuruna sahip olmaktadır [4]. Çubuk boyunun %0.5'i düzeylerine kadar kabul edilebilen başlangıç kusurları, her ne kadar ihmal edilebilecek düzeyde olsa da burkulma dayanımının belirlenmesinde etkin olması nedeniyle, sistem davranışını da etkileyeceği açıktır. Ayrıca bir çubuk elemanı oluşturan, boru enkesitli eleman ile uçlardaki bulon ve somunlar, analitik modellerde sadece boru enkesitli eleman esas alınarak elastik hesap sonucu elde edilen kuvvetlere göre boyutlandırılmaktadır. Ancak, çubuk elemanların eksenel çekme etkisinde dayanımları incelendiğinde, bazı elemanlarda bulon kopma dayanımının boru enkesitli elemanın akma dayanımından küçük olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada

- a) çubuk narinliklerinin sistem davranışına etkisi,
- b) üretim sırasında çubuklarda oluşan başlangıç kusurlarının sistem üzerinde oluşturdukları etkiler,
- c) bulonların dikkate alınması durumunda sistem davranışına etkisi,
- d) yerel yük yığılmalarının meydana geldiği durumlarda, sistemin taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir.

1.2. Çalışma Kapsamı

Kafes sistemlerde çubuk elemanların ve düğüm noktalarının teşkili için birçok alternatif bulunmaktadır. Ancak bu tez kapsamında çubuk elemanların boru profillerden oluştuğu, düğüm noktalarının ise dolu kürelerden oluştuğu MERO (Mengeringhausen Rohrbauweise) sistemler ele alınacaktır. Bu sistemlerde boru profiller, somun ve bulon yardımıyla düğüm noktası kürelerine bağlanmaktadır.

Çalışma kapsamında öncelikle mevcut çalışmalar incelenmiştir. Elde edilen bilgi birikiminden yararlanılarak, sistemin bir parçası olan çubuklar için, daha sonra örnek modeller üzerinde genel sistem için OpenSEES [5] modelleri oluşturulmuştur. Sistemler üzerinde, incelenecek durumları yansıtacak şekilde düzenlemeler yapılarak düşey doğrultuda statik itme analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.3. Literatür Araştırması

1.3.1. Collins (1981)

Doktora tezi olarak yapılan çalışmada, altı adet deney gerçekleştirerek uzay kafes sistemlerde göçme davranışını incelenmiştir. Deneyler sonucunda, tamamen simetrik tasarlanan ve simetrik yüklenen sistemlerde plastik şekil değiştirmeye geçildiğinde çubukların farklı yönlerde burkuldukları, sistemin artık simetrik davranmadığı görülmüştür. Araştırmacı bu duruma çubuklardaki başlangıç kusurlarının sebep olduğunu, dolayısıyla çubuk başlangıç kusurlarının sistemde önemli derecede etkisi olduğunu vurgulamıştır [6].

1.3.2. El-Sheikh ve McConnel (1993)

El-Sheikh ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada uzay kafes sistemlerin yüksek hiperstatiklik derecesine sahip olduğuna, ancak sistemde kullanılan çubukların bir kısmının sadece stabilite açısından konulduğuna ve taşıyıcılık görevi olmadığına dikkat çekmişlerdir. Bu durumun sistemin fazla bağlı olmasından dolayı güvenli olduğu izlenimi oluşturmalarına rağmen, aslında sistemde herhangi bir çubuğun göçmesi durumunda yeniden dağılım yapılamamasına ve sistemin aniden göçmesine yol açtığını belirtmişlerdir. Sistemde görülen ani göçme davranışını gözlemlemek ve çözüm önerileri geliştirmek üzere üç örnek sistem üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Üst başlık kısmında beton olan ve düğüm noktaları ile beton döşeme arasında kayma kaması yardımıyla bağlantı sağlanarak elde edilen kompozit kafes sistemde, basınç çubuklarının burkulması önlenerek bir miktar süneklik sağlanmıştır [7].

1.3.3. Huybrechts ve Tsai (1996)

Huybrechts ve Tsai çalışmalarında kafes sistemlerin belirli etkiler altında nonlineer davranışlarını modellemeye çalışmışlar ve bu kapsamda bir bilgisayar kodu hazırlayarak sonlu elemanlar yöntemiyle parametrik çalışmalarını yapmışlardır. Analizlerde kafes sistemlerde görülen düzensiz rijitlik dağılımı etkilerini, sistemde bırakılan boşluk etkilerini, çubuk kayıplarından kaynaklanan etkileri ve lokal göçme etkilerini incelemeye çalışmışlardır [8].

1.3.4. Fülöp ve Ivanyi (2004)

Fülöp ve Ivanyi, 3.6mx3.6mx0.85m boyutlarında hazırladıkları bir model üzerinde deneysel çalışmalar yaparak uzay kafes sistemlerin stabilitesini ve sünekliğini incelemeye çalışmışlardır. Sisteme eksantrik ve merkezi yüklemeler yaparak bu yüklemeler altında davranışını incelemiştir. Ayrıca yüklemeyi elastik bölgenin dışına çıkacak şekilde arttırarak sistemin elastik ötesi davranışını gözlemlemeye çalışmışlardır [9].

1.3.5. Uriz ve diğ. (2008)

Uriz ve diğ. çevrimsel yük altındaki çubuk elemanların burkulma davranışını modellemek üzere bir yaklaşım ortaya koymaya çalışmışlardır. OpenSEES programında kullanılmak üzere öne sürdükleri modelde çubuk elemanların orta noktasında %0.01-%3 arasında başlangıç kusuru olacak şekilde iki parça olarak tanımlanmasını, eleman boyunca yayılı plastik davranış görülmesi için integrasyon noktaları belirlenmesini ve kesitlerde de sonlu eleman ağı oluşturulmasını önermişlerdir. Bu sayede çubuk boyunca kesitlerde eksenel kuvvet-eğilme momenti etkileşimi olacağını ve küçük şekildeğişikliklerin dikkate alınacağını belirtmişlerdir. Büyük yerdeğişikliklerin hesaba katılması için ise corotational transformation kullanılmasını öngörmüşlerdir [10].

1.3.6. Lee ve Noh (2010)

Lee ve Noh çalışmalarında çelik elemanların çevrimsel tersinir yükler altında inelastik burkulma davranışını araştırmışlardır. Narinlik oranları 20 ile 160 arasında değişen çubuk elemanların, sonlu eleman modellerini hazırlayarak yükleme protokollerini uygulamışlar ve çevrimsel yükleme altındaki çelik profillerin narinliklerine bağlı olarak davranışlarının nasıl değiştiğini ortaya koymaya

alışmışlardır. Çalışma sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırarak değerlerin kabul edilebilir yakınlıkta çıktığını göstermişler ve hazırladıkları modelin uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir [11].

2. UZAY KAFES SİSTEMLER

2.1. Genel Bilgiler

Uzay Kafes Sistemler temel olarak aksel yük taşıyan çubuk elemanlardan ve bu elemanları birleştirmek amacıyla kullanılan düğüm noktası elemanlarından oluşmaktadır. Çubuk elemanlar boru enkesitli profil, kutu kesitli profil, çift korniyer gibi elemanlardan teşkil edilmektedir.

Düğüm noktalarının teşkilinde ise birçok çalışma yapılmıştır ve uzay kafes sistemlerde kullanılmak üzere çok geniş yelpazede birleşim sistemi mevcuttur [12]. Bu sistemlerde küre, disk, çelik plaka gibi elemanlar kullanılabilir ve bu elemanların yardımıyla profiller bulonlu, kaynaklı, pinli birleşimlerle düğüm noktalarında birleştirilebilmektedir.

Hem imalat ve montaj aşamasında sağladığı kolaylıklar hem de hesap varsayımlarını pratiğe daha gerçekçi yansıtma özelliği MERO sistemleri en çok tercih edilen sistemler haline getirmiştir [13].

MERO sistemlerde çubuk elemanlar boru enkesitli profillerden ve boru enkesitli profillerin uç noktalarına kaynakla birleştirilmiş koniklerden oluşmaktadır. Düğüm noktaları ise küre birleşim noktası, bulonlar, somunlar ve pimlerden meydana gelmektedir [14].

Taşıyıcı sistem teşkilinde alüminyum, ahşap veya çelik malzemeler kullanılabilirken de ekonomik bakımdan daha avantajlı olan çelik malzeme günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

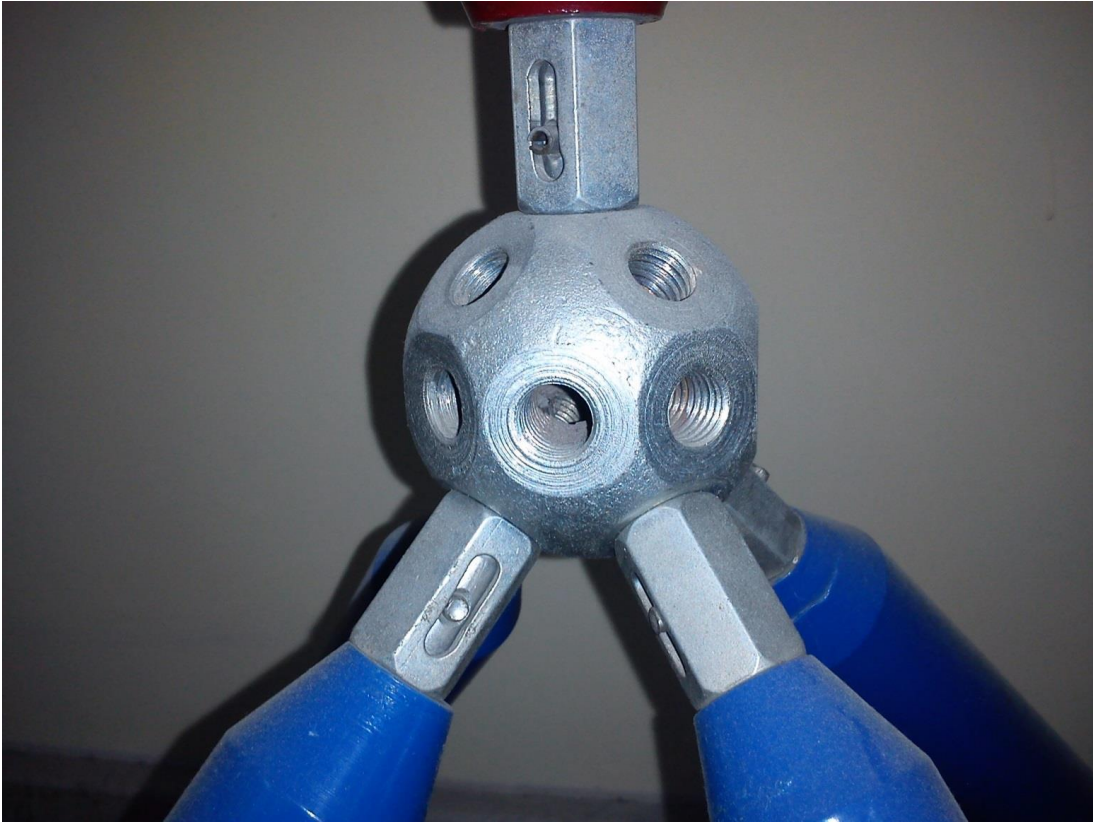
Taşıyıcı elemanlarla birlikte aşıklar ve dikmeler, çatı yüzeyini kaplamak amacıyla örtü elemanları, uzay kafes yükünü alt sisteme aktaran mesnetler ve suyun tahliyesi amacıyla dereler de kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında MERO birleşim sistemi kullanılarak oluşturulan çelik uzay kafes çatı sistemler incelenecektir.

2.2. MERO Dügüm Noktası Sistemi

İçi dolu çelik küre elemandan oluşan MERO düğüm noktası sisteminde, boru enkesitli elemanlar somunlar ve bulonlar vasıtasıyla eksenleri çakışacak şekilde bağlantı elemanına birleştirilmektedir [15]. Bu sayede düğüm noktalarının mafsallı olması sağlanmaktadır. Küre eleman üzerinde 18 adete kadar bulon deliği açılabilmekte ve bu sayıda boru enkesitli elemanın bağlantısı yapılabilmektedir [16].

Şekil 2.1’de gösterilen MERO düğüm noktası sisteminde çekme kuvvetleri bulonlar tarafından, basınç kuvvetleri ise somunlar tarafından aktarılmaktadır. Dolayısıyla çekme etkisi altında bulon, basınç etkisi altında ise somun tasarımı yapılmaktadır.



Şekil 2.1 : MERO düğüm noktası.

Yüksek mukavemetli C45 çelik malzemeden üretilen küre elemanların çapları geometrik koşullar altında konstrüktif olarak belirlenmektedir. Boyutlandırma sonucunda seçilen küre çapı, düzleştirilmiş küre yüzeyi ve somun yüzeyi arasında tam temasın sağlanmasına izin vermeli ve bulon delikleri arasındaki açı ise birleşen boru enkesitli elemanların montajına imkan verecek şekilde olmalıdır.

Düzleştirilmiş küre yüzeyi ve bulon delikleri arasındaki açının sınır durum olduğu küre çapının belirlenmesinde, (2.1) ve (2.2) denklemlerinden elde edilen çap değerlerinden büyük olanı kullanılmaktadır.

$$D \geq \sqrt{\left(\frac{d_2}{\sin\theta} + (d_1 \text{ctg}\theta + 2\xi d_1)\right)^2 + \eta^2 d_1^2} \quad (2.1)$$

$$D \geq \sqrt{\left(\frac{\eta d_2}{\sin\theta} + \eta d_1 \text{ctg}\theta\right)^2 + \eta^2 d_1^2} \quad (2.2)$$

D : Küre çapı

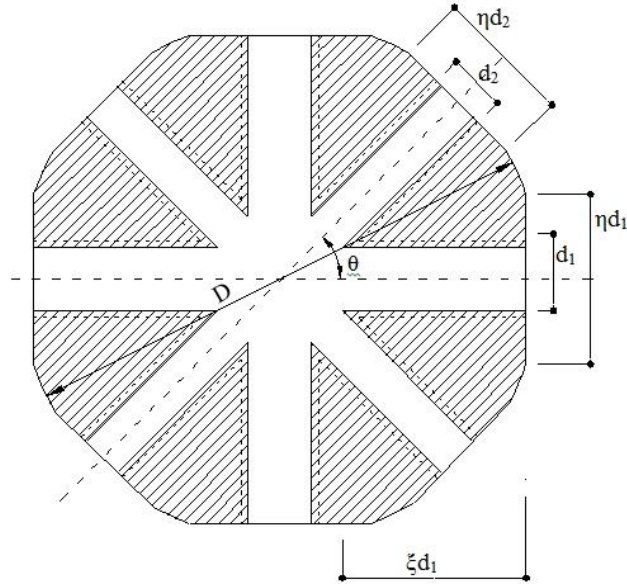
θ : Küreye bağlanan bulonlar arasındaki en küçük açı

d_1, d_2 : Bulon çapları

ξ : Bulon-küre birleşim uzunluğunun bulon çapına oranı

η : Bulon birleşim yüzeyi çapının bulon çapına oranı

(2.1) ve (2.2) ifadelerinde yer alan terimler Şekil 2.2'de küre eleman kesiti üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Küre eleman kesiti.

Boru enkesitli çubuk elemanlar uzay kafes sistemi oluşturan ana bileşenlerdir ve sistemde ana taşıyıcı görevini yüklenmekle beraber sistemin zati yükünün de büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Şekil 2.3). Boru enkesitli profiller (çubuk elemanlar)

analiz sonucunda üzerlerine gelen aksel yükü göre belirlenmektedir. Boyutlandırma çubuk eleman üzerindeki yükü göre çekme etkisi altında veya basınç etkisi altında tasarım yapılmaktadır.



Şekil 2.3 : Boru enkesitli profil.

Bulonlar, boru enkesitli elemanlarla küreler arasında bağlantı elemanı görevini görmektedirler ve çekme kuvvetine karşı çalışmaktadırlar. Somun kısmı konik vasıtasıyla boru enkesitli eleman ile birleştirilirken, dış açılmış kısım küreye vidalanmak suretiyle bağlanmaktadır. Üretimde kullanılan malzeme TS 2525-1 EN 10083-1 standardına uygun olarak seçilmektedir. ISO metrik dişler ise TS 61-2 / DIN 13-1 standardına uygun olarak açılmaktadır. Bulon, somun ve pimden oluşan bağlantı elemanı **Şekil 2.4**'te görülmektedir.



Şekil 2.4 : Bulon, somun ve pim.

Somunlar bulonlarla birlikte bağlantı elemanı olarak kullanılmaktadırlar, birleşimde basınç kuvvetini aktarmaktadırlar. Ayrıca somunun ve bulonun içinden geçen pim sayesinde sadece somun çevrilerek bulonların küreye vidalanması sağlanmaktadır. St52 veya AISI/SAE 1030 kalite çelikten altı köşeli olarak üretilen çelik malzeme, talaşlı imalat tekniğiyle somun haline getirilmektedir. 16-125 mm arasında dış çapa sahip olarak üretilen somunların iç çapı, birlikte kullanıldığı bulona göre seçilirken dış çapı üzerine gelen kuvveti karşılayacak şekilde seçilmektedir.

3. MODEL UZAY KAFES ÇATI SİSTEMLERİNİN TASARIMI

Parametrik çalışmalarda kullanılmak üzere x ve y doğrultularında 15'er metre açıklığa ve 5x5 modül sayısına sahip iki adet çift katmanlı düz uzay kafes çatı sistemi tasarlanmıştır. Model sistem, öncelikle uzay kafes sistemlerin tasarımında kullanılan FrameCAD yazılımı kullanılarak boyutlandırılmıştır, daha sonra sistem geometrisi aynı kalmak koşuluyla basınç çubuklarının narinlikleri belirli bir değerle sınırlandırılacak şekilde boyutlandırılmış ve yeni sistem SAP2000 [17] programında analiz edilerek kesitlerin uygunluğu kontrol edilmiştir. Bu şekilde biri optimum enkesitler kullanılarak boyutlandırılmış (Model A), diğeri ise basınç çubuklarının narinlikleri sınırlandırılarak boyutlandırılmış (Model B) iki model sistem elde edilmiştir.

3.1. FrameCAD Yazılımının İncelenmesi

FrameCAD yazılımı uzay kafes sistemlerin analizi, boyutlandırılması, projelendirilmesi ve imalat iş emirlerinin hazırlanması amacıyla piyasada yaygınca kullanılmaktadır.

Mimari tasarıma uygun bir şekilde oluşturulan sistemlerin analizi aşamasında, matris deplasman yöntemini kullanılmaktadır. Elemanların sadece aksenal yük alması sayesinde, matrislerde bant genişliği çok dar olmakta ve çok kısa sürelerde analizler gerçekleştirilmektedir.

Boru enkesitli çubuk elemanlar daha önce tanımlanmadığından program öncelikle çubuk enkesitlerini otomatik olarak atamaktadır ve sistemin zati ağırlığını atanan çubuklara göre hesaplayarak analiz yapmaktadır. Daha sonraki her adımda enkesiti yetersiz çubuk elemanların enkesitlerini büyütürken, gereğinden büyük enkesitli çubukların enkesitlerini ise küçülterek sistem zati ağırlığı yeni sisteme göre hesaplamaktadır. Aynı şekilde sistem rijitlik matrisini ve yük matrisini tekrar oluşturarak analizi yeni sisteme göre tekrarlamaktadır. Bu şekilde boru enkesitli elemanlar, bulonlar ve somunlarda emniyet gerilme sınırı şartları altında en

optimum boyutlandırmayı yapacak şekilde iteratif analizler yapmaktadır ve sistem ağırlığını en az tutacak şekilde optimum tasarıma ulaşmaktadır.

Programda boyutlandırma işlemi TS648 “Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” [18] baz alınarak yapılmaktadır. İmalatta kullanılan her bir çubuk eleman, bulon ve somun tipi için taşıyabileceği maksimum yükler daha önceden hesaplanarak programın kütüphanesine girilmiştir ve analiz sırasında elemanlara gelen yükler belirlendikten sonra, elemanların güvenli olarak taşıyabileceği maksimum yüklerle karşılaştırılarak çubuk enkesitleri bir üst enkesite veya bir alt enkesite dönüştürülmektedir. Nihai sonuç elde edildiğinde tüm elemanlardaki gerilmelerin emniyet gerilmesinden düşük olduğu doğrulanmaktadır.

Analiz ve boyutlandırma işlemi tamamlandıktan sonra sistemdeki;

- Boru enkesitli profillerin özelliklerini
- Yük değerlerini ve yükleme kombinasyonlarını
- Düğüm Noktası deplasmanlarını
- Mesnet reaksiyonlarını
- Boru enkesitli profil, bulon ve somun taşıma kapasitelerini
- Elemanların üzerlerine gelen kuvvetleri ve gerilmeleri

içeren hesap raporu alınabilmektedir. Ayrıca imalat için kullanılacak çizimler ve veriler, iş emri şeklinde atölye birimine gönderilmekte ve sistematik bir şekilde üretim yapılabilmektedir.

3.2. FrameCAD Yazılımı ile UKS Boyutlandırma Esasları

Model yapı olarak ele alınan sistemlerden Model A etiketi ile adlandırılan sistem FrameCAD programı ile standart ayarlar kullanılarak boyutlandırılmıştır. Analiz sonucunda elemanlarda sadece aksenal kuvvet oluşmaktadır. Aksenal çekme ve basınç etkisinde tasarım için uzay kafes sistem elemanları “TS648-Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” [18] standardına uygun bir şekilde aşağıdaki sınır durumlar dikkate alınarak boyutlandırılmaktadır.

Çekme etkisinde,

- Boru enkesitli çubuk elemanlarda akma sınır durumu

- Boru enkesitli çubuk elemanlarda kopma (kırılma) sınır durumu
- Bulonlarda kopma sınır durumu

Basınç etkisinde,

- Boru enkesitli çubuk elemanlarda eğilmeli burkulma sınır durumu
- Somunlarda ezilme sınır durumu.

Birleşim elemanı boyutlandırmasında küre çapları, kesik yüzeylerinde somun yüzeyi ile tam temas sağlanacak şekilde ve küreye bağlanan elemanların montajlarının rahatlıkla gerçekleştirilebileceği şekilde konstrüktif olarak belirlenmektedir.

Program tarafından düğüm noktalarında maksimum yerdeğiştirme koşulu ile ilgili herhangi bir kontrol yapılmamaktadır. Belirlenen maksimum yerdeğiştirme değeri analiz sonucu elde edilen değerlerle karşılaştırılarak kontrol edilmektedir. Ele alınan sistemde maksimum orta nokta yerdeğiştirmesi açıklığın 1/200'ü ile sınırlandırılmıştır.

Sistemde kullanılmayan tüm boru enkesitli profillerin narinlik değerleri $\lambda=200$ ile sınırlandırılmıştır.

3.2.1. Tasarımda kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri

Model yapıların tasarımında kullanılan malzemeler ve mekanik özellikleri **Çizelge 3.1**'de verilmiştir. Boru enkesitli profil-konik birleşimlerinde yüksek mukavemetli elektrotlar kullanılarak tam penetrasyonlu kaynak uygulaması yapıldığından kaynak mekanik özellikleri boru enkesitli profil özellikleri ile aynı alınmaktadır.

Çizelge 3.1 : UKS elemanlarının mekanik özellikleri.

Eleman	Kalite	Akma Gerilmesi [N/mm ²]	Kopma Gerilmesi [N/mm ²]
Boru Profil	St37 (S235)	235	360
Konik	St37 (S235)	235	360
Bulon	10.9	900	1000
Somun	St52 (S355)	355	520
Küre	C45	430	750

3.2.2. Çekme etkisi altındaki elemanlarda boyutlandırma esasları

Çekme etkisi altında boyutlandırma yapılırken boru enkesitli elemanlarda akma sınır durumu gözönüne alınmaktadır, ancak elemanda enkesit kaybı varsa kırılma sınır durumu da dikkate alınarak güvenli tarafta kalınacak şekilde tasarım yapılmaktadır. Çalışma kapsamında ele alınan boru enkesitli elemanlarda enkesit kaybı olmadığından sadece akma sınır durumu dikkate alınacaktır. boru enkesitli eleman için çekme etkisi altında sınır gerilme değeri (3.1) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$F_{\text{çem}} = 0.6F_y \quad (3.1)$$

$F_{\text{çem}}$: Çelik malzeme çekme emniyet gerilmesi

F_y : Çelik malzeme akma gerilmesi

Boru enkesitli elemanın güvenli çekme dayanımı ise (3.2) ile hesaplanmaktadır.

$$T_d = F_{\text{çem}} A_g \quad (3.2)$$

T_d : Güvenli çekme dayanımı

A_g : Çekme elemanının brüt enkesit alanı.

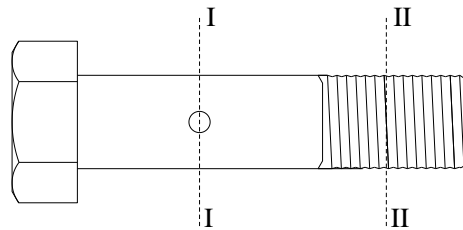
Bulonlarda kopma sınır durumu için emniyet gerilmesi (3.3) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$F_{\text{bul-em}} = \frac{F_{\text{ub}}}{2.5} \quad (3.3)$$

$F_{\text{bul-em}}$: Bulon çekme emniyet gerilmesi

F_{ub} : Bulon kopma gerilmesi

Bulon taşıma kapasitesi hesabında dış açılmış enkesit alanı ile pim deliği kaybı dikkate alınarak hesaplanan enkesit alanları ayrı ayrı değerlendirilerek dikkate alınmaktadır. Şekil 3.1'de görünüşü verilen bulonda, I-I enkesiti pim deliği bulunan enkesiti, II-II enkesiti dış açılmış enkesiti göstermektedir.



Şekil 3.1 : Kritik bulon kesitleri.

Çekme kuvveti etkisi altında bulonun güvenli çekme dayanımı (3.4) ile hesaplanmaktadır. Burada, dış açılmış enkesit alanı yaklaşık $0.75A_b$ 'ye eşit alınmaktadır.

$$T_b = \min [0.75F_{bul-em}A_b ; F_{bul-em}(A_b - d_p d_b)] \quad (3.4)$$

T_b : Bulonda güvenli çekme dayanımı

A_b : Bulonun dış açılmamış enkesit alanı

d_p : Pim deliği çapı

d_b : Bulon çapı

Boru enkesitli profil -konik birleşimi imalatında minimum kaynak kalınlığı, konik ve boru enkesitli profil et kalınlıklarının ince olanına eşit veya daha kalın olarak alınmaktadır. Aynı şekilde kaynak emniyet gerilmesi de boru enkesitli profille aynı veya daha yüksek değerde olduğundan kaynaklı birleşim güvenli tarafta kalmaktadır.

3.2.3. Basınç etkisi altındaki elemanlarda boyutlandırma esasları

Basınç etkisi altında boyutlandırma yapılırken boru enkesitli elemanlarda eğilmeli burkulma sınır durumu gözönüne alınmaktadır. Kritik burkulma gerilmesi hesabında λ (3.5) eleman narinlik değeri, λ_p (3.6) elastik burkulma ile inelastik burkulma arasındaki plastik narinlik sınırı(kritik narinlik) olmak üzere,

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (3.5)$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (3.6)$$

- $\lambda \leq \lambda_p$ durumunda, burkulma inelastik bölgede meydana gelmekte ve (3.7) kullanılmakta,
- $\lambda > \lambda_p$ durumunda ise burkulma elastik bölgede meydana gelmekte ve (3.8) kullanılmaktadır (Şekil 3.2).

$$F_{cr} = \left[1 - 0.5 \left(\frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^2 \right] F_y \quad (3.7)$$

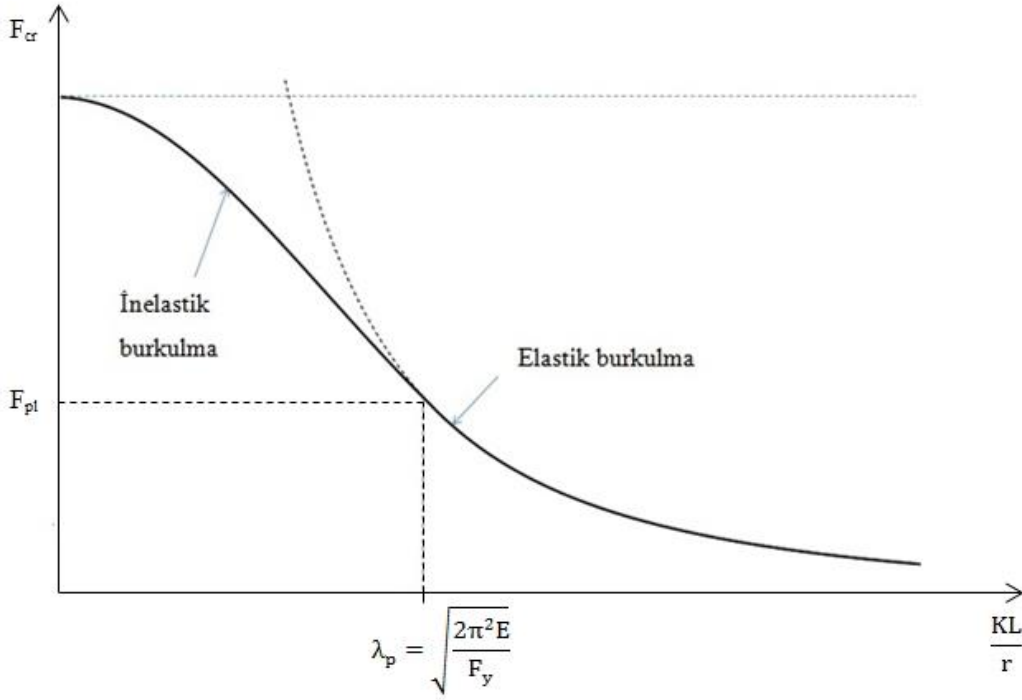
$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (3.8)$$

F_{cr} : Kritik burkulma gerilmesi

r : Kesit atalet yarıçapı

E : Elastisite modülü

K : Burkulma boyu katsayısı (İki ucu mafsallı çubuk için $K=1.00$)



Şekil 3.2 : Kritik burkulma gerilmesi - narinlik oranı diyagramı.

Basınç çubuğunun güvenli tarafta kalması için kritik burkulma yükü belirli bir güvenlik katsayısı ile bölünmektedir. Güvenlik katsayısı Ω (3.9) olmak üzere, basınç etkisi altındaki boru enkesitli eleman için emniyet gerilmesi (3.10) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$\Omega = \begin{cases} 1.67 & \lambda < 20 \\ 1.5 + 1.2 \frac{\lambda}{\lambda_p} - 0.2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^3 & 20 \leq \lambda < \lambda_p \\ 2.5 & \lambda_p \leq \lambda \end{cases} \quad (3.9)$$

$$F_{bem} = F_{cr} / \Omega \quad (3.10)$$

Boru enkesitli elemanın güvenli basınç dayanımı P_d ise (3.11) ifadesi ile bulunmaktadır.

$$P_d = F_{bem} A_g \quad (3.11)$$

Basınç kuvveti etkisi altında yapılan tasarımda, somun boyu çok kısa olduğundan kısalma deformasyonu (ezilme) sınır durum olmakta ve malzeme akma gerilmesine kadar ulaşabilmektedir. Bu durumda somun için emniyet gerilmesi (3.12) ile belirlenmektedir.

$$F_{som-em} = 0.6F_{ys} \quad (3.12)$$

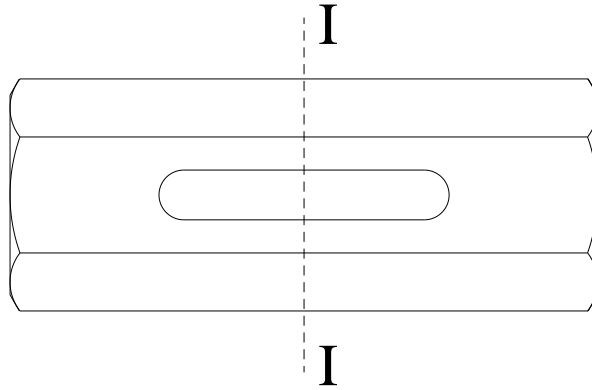
F_{som-em} : Somun emniyet gerilmesi

F_{ys} : Somun akma gerilmesi

Somun için taşıma kapasitesi hesaplanırken Şekil 3.3'te I-I kesiti ile verilen, pim deliğinin bulunduğu orta bölgedeki enkesit alanı kritik alan olarak dikkate alınmaktadır. Kritik enkesit alanı (3.13) ile hesaplanmaktadır.

$$A_{cr} = 0.866d_d^2 - \frac{\pi d_i^2}{4} - 2(d_d - d_i)d_p \quad (3.13)$$

Burada A_{cr} , somunun kritik enkesit alanını, d_d somunun dış çapını ve d_i somunun iç çapını göstermektedir



Şekil 3.3 : Kritik somun kesiti.

Somunun güvenli basınç dayanımı P_s ise (3.14) ifadesi ile belirlenmektedir.

$$P_s = F_{som-em} A_{cr} \quad (3.14)$$

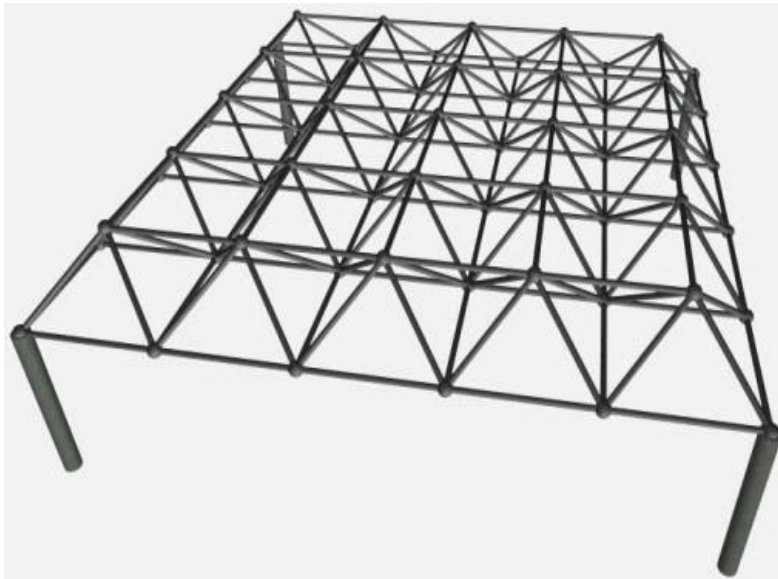
3.3. 5x5 Modüle Sahip Uzay Kafes Sistem (Model A)

3.3.1. Sistem tasarımı için bilgiler

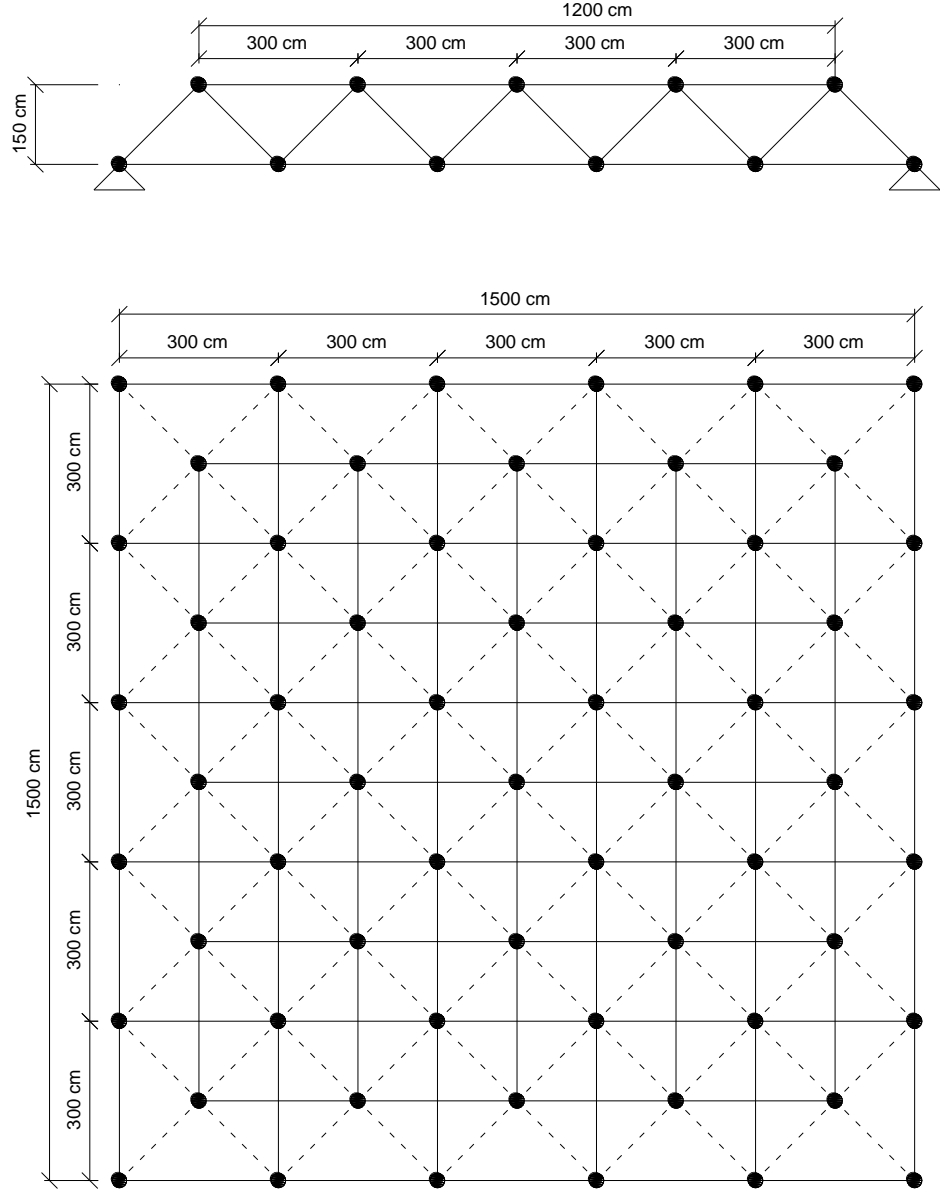
Düğüm Noktası Sayısı	: 61
Çubuk Eleman Sayısı	: 200
Modül Sayısı	: 25
Kaplama Yüğü [kN/m ²]	: 0.80
Kar Yüğü [kN/m ²]	: 0.20
Zati Yüğü [kN/m ²]	: 0.109
Elastisite Modülü [N/mm ²]	: 210000

Oluşturulan uzay kafes sistem, x doğrultusunda 5 modül ve y doğrultusunda da 5 modül olmak üzere 3mx3mx1.5m boyutlarına sahip toplam 25 modülden oluşmaktadır. Dört köşe noktasından kolonlara basit mafsallı olarak bağlanan sistem her iki doğrultuda 15'er metre açıklığa ve 1.5 metre yüksekliğe sahiptir. Yapının 3 boyutlu gösterimi Şekil 3.4'te, plan ve kesit görünüşü Şekil 3.5'te verilmiştir.

Düşey yükler altında analizi yapılacak sisteme 1.00 kN/m² düşey yük etkilmesi uygun görülmüştür. Yapının zati ağırlığı ise analiz sonucunda atanacak eleman boyutlarına göre belirlenecektir.



Şekil 3.4 : 5x5 Modüllü sistemin üç boyutlu görünümü.



Şekil 3.5 : 5x5 modüllü sistemin plan ve kesit görünüşü.

3.3.2. Sistem elemanlarının tasarımı

Optimum enkesitler kullanılacak şekilde yapılan boyutlandırmada atanan boru enkesitli profillerden ve diğer bağlantı elemanlarından oluşan sistem zati yükü 25.5 kN olarak bulunmuştur. Çift yönlü simetrik olan sistemde tüm yükler altında her bir mesnetin düşey reaksiyonu 62.0 kN, mesnet reaksiyonları toplamı 248.0 kN olarak hesaplanmıştır. Sistemin maksimum yer değiştirmeye ulaşan orta noktasındaki düğüm noktası deplasmanı 19.2 mm'dir. Analiz sonucunda belirlenen boru enkesitli profillerin ve bağlantı elemanlarının özellikleri Çizelge 3.2'de, elemanlara gelen maksimum kuvvetler ve gerilmeler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Model A'da kullanılan eleman bilgileri.

Çubuk Tipi	Dış Çap	Et Kalınlığı	Boy	Adet	Narinlik	Kalite	Bulon Tipi	Somun Tipi
	d(mm)	t(mm)	L(m)		λ			
13	42.4	3	2.59	76	186	235	M12-10.9	19AA
14	42.4	3	2.59	8	186	235	M16-10.9	24AA
18	48.3	3	3	52	186	235	M12-10.9	19AA
25a	60.3	3	3	12	148	235	M16-10.9	24AA
25b	60.3	3	2.59	4	128	235	M16-10.9	24AA
28a	76.1	3	3	12	116	235	M16-10.9	24AA
28b	76.1	3	2.59	8	100	235	M16-10.9	24AA
32	88.9	3	3	8	99	235	M20-10.9	32AA
36	88.9	4	3	8	100	235	M20-10.9	30AA
41	88.9	5	2.59	4	87	235	M24-10.9	38AA
50	114.3	4	3	8	77	235	M24-10.9	38AA

Çizelge 3.3 : Model A'da çubuklara gelen maksimum kuvvet ve gerilmeler.

Çubuk Tipi	Çubuk Kuvvetleri (kN)		Gerilme (N/mm ²)	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
13	16.4	8.4	44.3	13.6
14	39.4	0	106.1	0
18	24.1	2.6	56.4	36.4
25a	0	18.2	0	128.4
25b	0	16.9	0	88.9
28a	0	30.7	0	106.2
28b	0	34.9	0	99.2
32	0	34.7	0	83.2
36	0	70.0	0	128.7
41	0	104.9	0	136.9
50	0	102.3	0	115.9

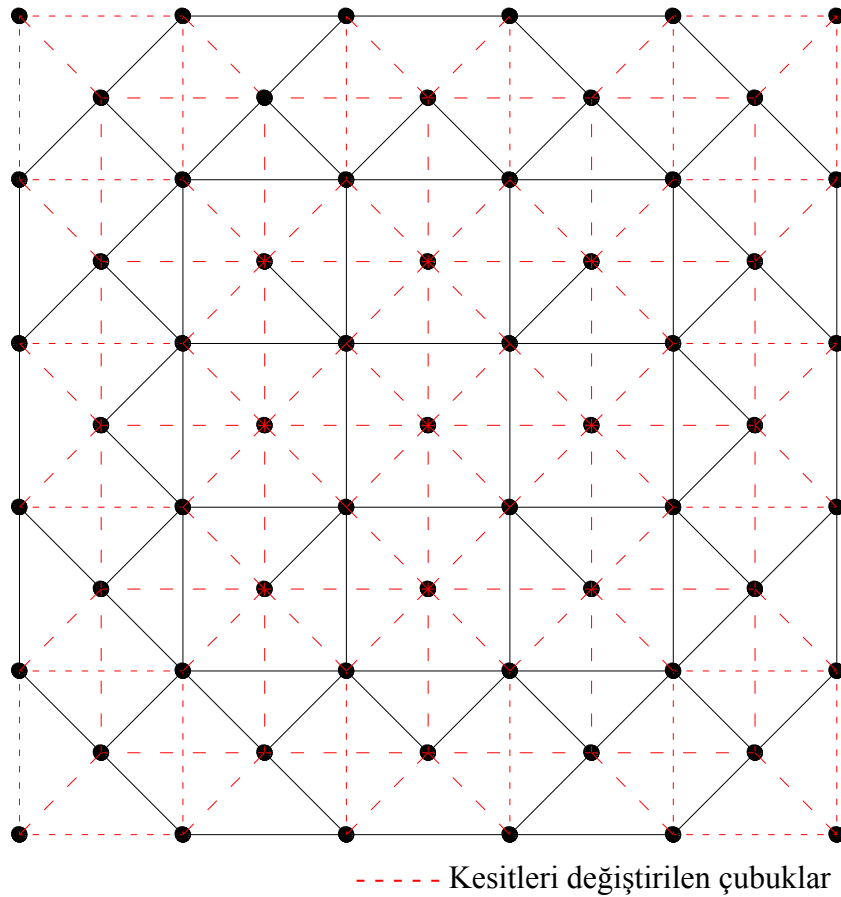
3.4. Basınç Çubuklarının Narinlikleri Sınırlandırılmış 5x5 Modüle Sahip Uzay Kafes Sistem (Model B)

3.4.1. Sistem tasarımı için bilgiler

Bu bölümde, bir önceki başlıkta bahsedilen sistemle aynı geometriye sahip sistem ele alınmıştır. Yapının boyutları, çubuk boyları, yükleme durumları ve mesnet koşulları aynı kalmak kaydıyla sadece basınç yükü etkisindeki elemanların narinlikleri 80 değeri ile sınırlandırılmıştır. Çubuk kesitlerindeki değişim nedeniyle sistem zati yükünde de değişiklikler olacaktır. Bundan dolayı sistem, çubuk kesitleri ve sistem zati yükü değişmiş haliyle SAP2000 [17] programında çözümlenerek kontrol edilmiştir.

3.4.2. Sistem elemanlarının tasarımı

Yeni oluşturulan basınç etkisi altındaki çubuk eleman narinlikleri sınırlanmış sistemde, narinlik değeri 80'in altında olan basınç çubuklarının enkesitleri büyütülmüştür. Değiştirilen çubuklar Şekil 3.6'da, çubuk bilgileri ise Çizelge 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.6 : Örnek modelde kesitleri değiştirilen çubuk elemanlar.

Değiştirilen çubuk elemanlar nedeniyle sistemin zati yükünde 18.7 kN'luk artış meydana gelmiştir ve sistem zati yükü 44.2 kN olarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda her bir düşey mesnet reaksiyonu 66.7 kN olmak üzere, mesnet reaksiyonları toplamı 267.0 kN olarak hesaplanmıştır. Sistemin orta noktasındaki maksimum yer değiştirmesi 15.5 mm olarak bulunmuştur. Çubuk eleman tiplerine göre maksimum iç kuvvetler **Çizelge 3.5**'te verilmiştir. Buna göre yeni sistemde kullanılan çubuk enkesitleri yeterli olmaktadır ve değiştirilen çubuk tipleri sistem güvenliği açısından bir sorun oluşturmamaktadır.

Çizelge 3.4 : Model B'de kullanılan eleman bilgileri.

Çubuk Tipi	Dış Çap	Et Kalınlığı	Boy	Adet	Narinlik	Kalite	Bulon Tipi	Somun Tipi
	d(mm)	t(mm)	L(m)		λ			
13	42.4	3	2.598	40	186	235	M12-10.9	19AA
14	42.4	3	2.598	8	186	235	M16-10.9	24AA
18	48.3	3	3	36	186	235	M12-10.9	19AA
50a	114.3	4	2.598	48	67	235	M24-10.9	38AA
50b	114.3	4	3	56	77	235	M24-10.9	38AA
67a	139.7	4	2.598	4	55	235	M24-10.9	38AA
67b	139.7	4	3	8	62	235	M24-10.9	38AA

Çizelge 3.5 : Model B'de çubuklara gelen maksimum kuvvet ve gerilmeler.

Çubuk Tipi	Çubuk Kuvvetleri (kN)		Gerilme (N/mm ²)	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
13	8.1	0	22.0	0
14	26.4	0	71.2	0
18	24.6	0	57.6	0
50a	0	23.6	0	26.8
50b	0	71.7	0	74.5
67a	0	65.1	0	50.0
67b	0	104.9	0	84.4

4. UZAY KAFES ÇATI SİSTEMLERİN ANALİTİK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI VE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZLERİ

Bu bölümde öncelikle model uzay kafes çatı sistemlerde kullanılan boru enkesitli elemanların OpenSEES programında detaylı modelleri hazırlanarak davranışları incelenecektir. Daha sonra biri piyasa koşullarında uygulanan optimum boyutlandırma esaslarına göre hazırlanmış (Model A), diğeri basınç çubuklarının narinlik değerleri sınırlandırılarak hazırlanmış (Model B), aynı geometriye sahip iki sistem üzerinde, artan düşey yükler altında statik itme analizi uygulanarak, çatı sistemlerin davranışları ve performansları incelenecektir.

Bulon etkileri ve başlangıç kusuru etkileri çubuk eleman analizlerinden elde edilen çubuk eleman davranışlarının malzeme modelleri içinde tanımlanması ile dikkate alınmıştır. Yük yığılmalarını yansıtmak içinse her bir analiz, çatının tam yüklü olması hali, yarım yüklü olması hali ve çeyrek yüklü olması hali için üç farklı durum için gerçekleştirilmiştir.

4.1. Çubuk Eleman Analizleri

Uzay kafes sistemlerde her bir eleman davranışının tüm yapı davranışını etkileyeceği açıktır. Bu bağlamda sistemde kullanılan elemanların yük-yerdeğiştirme özelliklerinin bilinmesi son derece önemlidir. Elemanların çekme altında plastik davranışı bilindiğinden bu bölgede eleman karakteristiklerini ortaya koymak kolayken, basınç etkisi altında stabilite problemi ortaya çıktığından dolayı bu bölgede eleman davranışını yansıtmak oldukça zor olmaktadır [6]. Bundan dolayı sistemlerde kullanılan boru enkesitli çubuk elemanların davranışlarının incelenmesi amacıyla çubuk elemanlar OpenSEES programında modellenerek üzerlerinde tersinir çevrimsel yükleme analizleri yapılmıştır.

Bu kısımda öncelikle sadece boru enkesitli çubuk elemandan oluşan model üzerinde çevrimsel tersinir yükleme uygulanarak elemanın davranışı incelenmiştir. Sonraki adımda boru enkesitli eleman, sistemde kullanılan bulon ve küre ile birlikte

tanımlanarak çevrimsel tersinir yükleme altında yük-yerdeğiştirme (uç nokta yerdeğiştirme) grafikleri çizdirilerek detaylı çubuk modelinin davranışı elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan analizlerde kullanılan OpenSEES (**O**pen **S**ystem for **E**arthquake **E**ngineering **S**imulation) [5] programında çubuk elemanlarda burkulma davranışını tanımlak için iki yol mevcuttur. Bunlardan birincisinde çubuk eleman, orta noktasında başlangıç kusuruna (eğriliğine) sahip olacak şekilde tanımlanarak basınç yükü altında burkulmanın başlaması sağlanmaktadır, ikincisinde ise çubuk eleman doğrusal bir şekilde tanımlanarak elemana burkulma davranışını yansıtacak özelliklere sahip malzeme modeli atanmasıyla burkulma davranışı elde edilmektedir.

Sistem üzerinde yapılacak analizlerde her bir elemana başlangıç kusuru tanımlanması yöntemi kullanıldığında bulon ve küre etkileri dikkate alınamayacağından çubuk elemanlar doğrusal bir şekilde tanımlanacaktır.

Bu bölümde başlangıç kusuru, bulon ve küre etkileri dikkate alınarak detaylı bir şekilde hazırlanan çubuk eleman modellerinden elde edilen çubuk eleman davranışları, sistem üzerinde doğrusal bir şekilde tanımlanan boru enkesitli elemanlara malzeme modelleri olarak tanımlanacaktır.

4.1.1. Analiz varsayımları

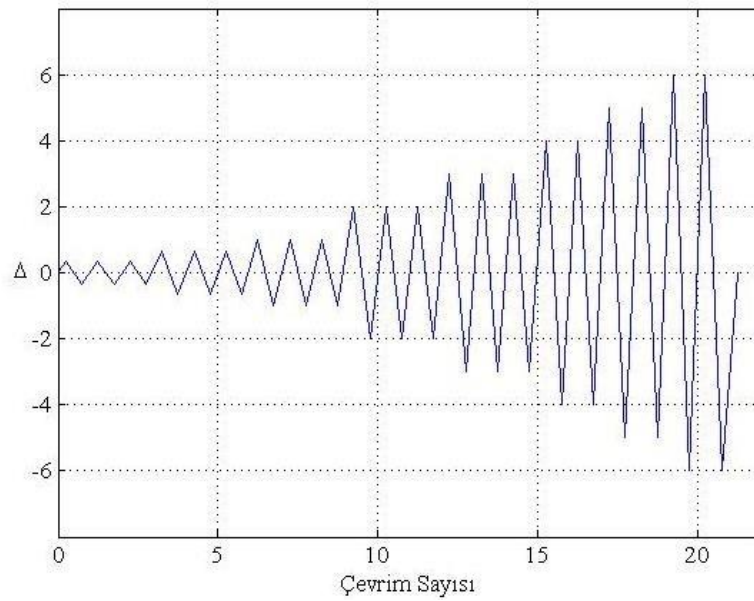
Bu bölümde gerçekleştirilecek analizler için uzay kafes sistemlerde kullanılmakta olan boru enkesitli profillerden 42.4 mm, 60.3 mm, 88.9 mm ve 114.3 mm dış çaplara sahip örnek boru enkesitli profil-bulon kombinasyonları seçilmiştir. Bulon etkilerini gözlemlemek amacıyla aynı enkesite sahip ikişer çubuk seçilmiş, bu çubuklarda kullanılan en büyük ve en küçük çapa sahip bulonlar örnekleme dahil edilmiştir. **Çizelge 4.1**'de seçilen örnek çubuk elemanların özellikleri görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Örnek profil bilgileri.

Çubuk No	Dış Çap	Et Kalınlığı	Malzeme	E (N/mm ²)	Uzunluk	Bulon Tipi	Bulon Kalitesi	Narinlik λ
	d(mm)	t(mm)			L(m)			
1	42.4	3			2	M16	10.9	143
1a	42.4	3			2	M12	10.9	143
2	60.3	3			2	M20	10.9	99
2a	60.3	3	S235	210000	2	M12	10.9	99
3	88.9	4			3	M27	10.9	100
3a	88.9	4			3	M16	10.9	100
4	114.3	4			3	M33	10.9	77
4a	114.3	4			3	M20	10.9	77

4.1.2. Yükleme protokolünün oluşturulması

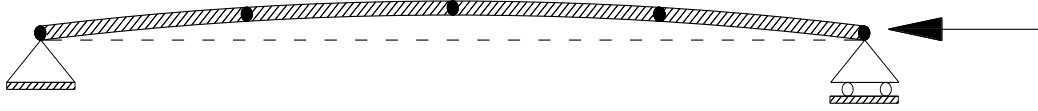
Çevrimsel yükleme analizinde çevrimler ATC-24 (Applied Technology Council) [19] yükleme protokolü baz alınarak hazırlanmıştır. Burada Δ elemanın akma anındaki boy değişimini göstermek üzere ilk adımda $1/3\Delta$, ikinci adımda $2/3\Delta$, üçüncü adımda Δ deformasyonları kullanılmış, sonraki her adımda deformasyon Δ kadar arttırılacak şekilde takip etmiştir. İlk 5 deformasyon adımı için üçer, sonraki adımlar için ise ikişer çevrim olmak üzere 20 çevrimde analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil4.1).



Şekil 4.1 : Çevrimsel yükleme protokolü [19].

4.1.3. Basit çubuk modeli

Basit çubuk eleman modelinde Şekil 4.2’te görüldüğü gibi bir ucu basit mesnetli diğer ucu ise boyuna doğrultuda yerdeğiştirmeye izin verecek şekilde kayıcı mesnetli ve sadece boru enkesitli profilden oluşan eleman modellenmiştir. Analizde burkulma davranışının başlamasını sağlamak amacıyla çubukta yarım sinüs dalgası formunda başlangıç kusuru tanımlanmıştır.



Şekil 4.2 : Başlangıç kusuruna sahip basit çubuk eleman modeli.

Rosen ve Schmit [20] tarafından ortaya konulan yarım sinüs dalgası şeklindeki başlangıç kusuru formunda, çubuğun herhangi bir noktasındaki başlangıç kusuru (4.1)’e göre hesaplanmaktadır.

$$v_0 = e_0 \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (4.1)$$

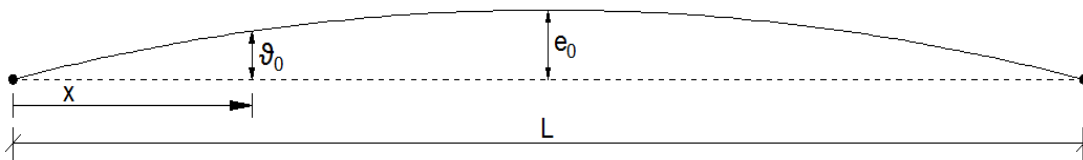
Burada,

ϑ_0 istenen noktadaki başlangıç kusuru değerini,

e_0 çubuk orta noktasındaki başlangıç kusuru değerini,

L çubuk boyunu,

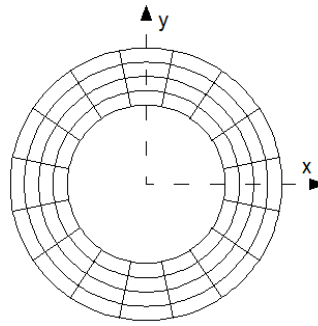
x ise çubuk başlangıç noktası ile eğrilik değeri aranan nokta arasındaki mesafeyi belirtmektedir (Şekil 4.3)



Şekil 4.3 : (3.1) için başlangıç kusuru modeli.

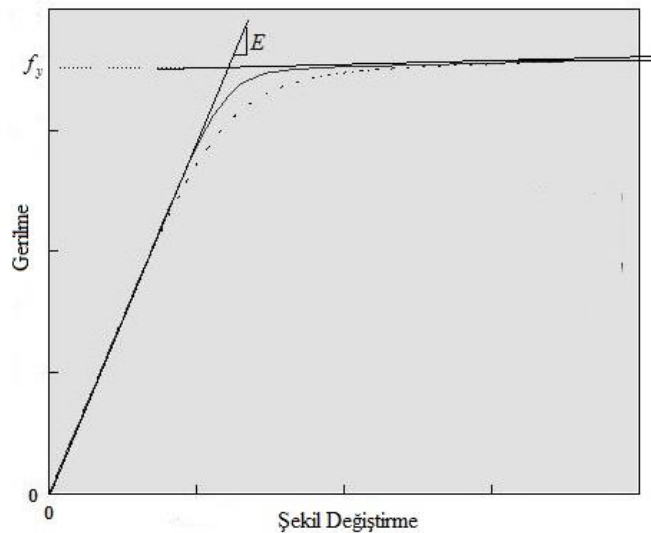
Dört eşit parçaya ayrılarak başlangıç kusuru tanımlanan çubuk elemanda her bir parça eleman OpenSEES kütüphanesindeki “nonlinearBeamColumn” komutuyla tanımlanmıştır. “nonlinearBeamColumn” ifadesiyle tanımlanan elemanlarda sonlu eleman modeli oluşturularak plastik davranışın eleman uzunluğu boyunca yayılı

olarak görülmesi sağlanmaktadır, sonlu eleman modeli oluşturulurken tanımlanan her bir eleman için boyuna doğrultuda integrasyon nokta sayısı ve kesit ağ modeli girilmesi gerekmektedir. OpenSEES programı bu şekilde daha detaylı sonlu eleman ağları kurulduğu takdirde daha tutarlı ve hassas analizler yapılmasına imkan vermektedir. Çalışma kapsamında “nonlinearBeamColumn” ile tanımlanan çubuk parçalarının her birinde 5 integrasyon noktası olması ve kesitlerde oluşturulan ağ modelinde radyal doğrultuda 4 parça, çembersel doğrultuda 16 parça olmak üzere 64 parça olması öngörülmüştür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Tüp Enkesit sonlu eleman modeli.

Kesitlerde malzeme modeli olarak OpenSEES kütüphanesinde “Steel02” etiketiyle yer alan pekleşme etkilerinin de dikkate alındığı Giuffre-Menegotto-Pinto çelik malzeme modeli kullanılmıştır. Şekil 4.5’te gerilme-şekil değiştirme davranışı görülen bu modelde, F_y malzemenin akma dayanımını, E elastik bölge için elastisite modülünü belirtmektedir, ayrıca pekleşme katsayısı ve inelastik bölgeye geçiş eğriliği bilgilerinin de girilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.5 : “Steel02” Materyali için Gerilme Şekil Değiştirme Diyagramı [21].

Analiz adımları sırasında çubuk elemandaki büyük deplasmanlardan oluşan ikincil merteye etkileri dikkate almak amacıyla “corotational transformation” kullanılmıştır, bu komut sayesinde rijitlik matrisi şekil değiştirmiş sisteme uygun olarak yeniden oluşturulmakta ve her iterasyonda matris yeniden düzenlenmektedir. Bu sayede büyük yer değiştirmelerden kaynaklanan ikincil merteye etkiler de dikkate alınmış olmaktadır.

4.1.4. Küre ve bulonlu çubuk modeli

Sistem analizlerinde kullanılmak amacıyla hazırlanan malzeme modellerinde daha hassas veriler elde etmek amacıyla **Şekil 4.6**'da görüldüğü gibi çubuk eleman, bulon ve küre ile birlikte tanımlanarak, yapılan analizlerle eleman davranışı incelenecektir. Burada basınç etkisi altında kritik elemanın boru enkesitli profil olduğu, somunda ezilme görülmeden önce çubuk elemanda burkulmanın başlayacağı varsayımı yapılmış ve somunlar dikkate alınmamıştır.

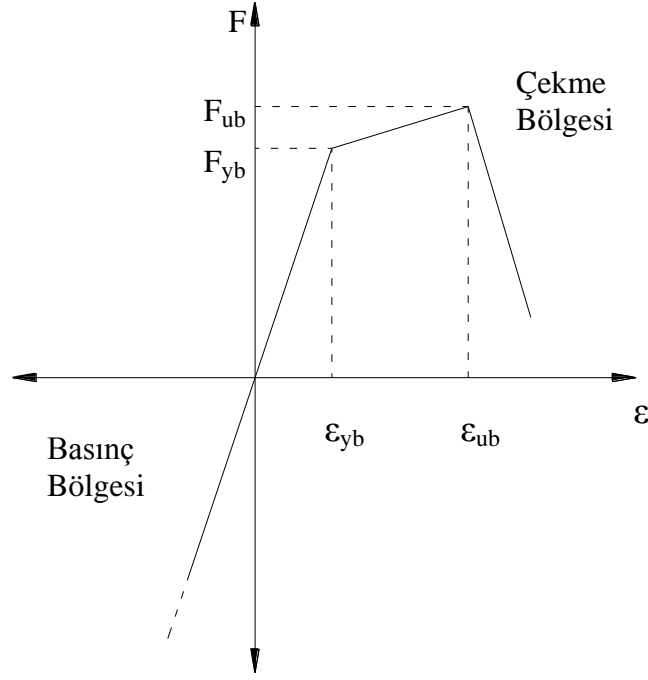


Şekil 4.6 : Bulon ve küre ile tanımlı çubuk eleman modeli.

Detaylı çubuk modelinde boru enkesitli profil **bölüm 4.1.3**'te kullanılan yaklaşımla tanımlanmıştır.

Çubuğun her iki tarafında bulunan bulon elemanlar “nonlinearBeamColumn” olarak tanımlanmış, kesit olarak daire kesit kullanılmıştır. Enkesit sonlu eleman modeli yine 64 elemandan oluşacak şekilde bölünmüştür. Eleman uzunluğunun çok kısa olmasından dolayı boyuna doğrultuda iki integrasyon noktası belirlenmesi uygun görülmüştür. Malzeme modeli, kullanılan bulonun mekanik özelliklerine uygun olarak “uniaxialMaterial Hysteretic” komutu ile hazırlanarak belirlenmiştir.

Şekil 4.7'de gerilme-şekildeğiştirme özelliği verilen birleşim bölgesi malzeme modelinde, çekme bölgesi bulonu tanımlayacak şekilde belirlenmiştir. Burada bulon akma ve kopma noktaları kritik değerler olarak hysteretic malzeme modelinde tanımlanmıştır. Basınç bölgesinde ise somun davranışı esas alınmıştır, basınç etkisi altında birleşimde göçme olmadığı kabulü yapıldığından, burada herhangi bir akma veya kopma davranışı tanımlanmamıştır.



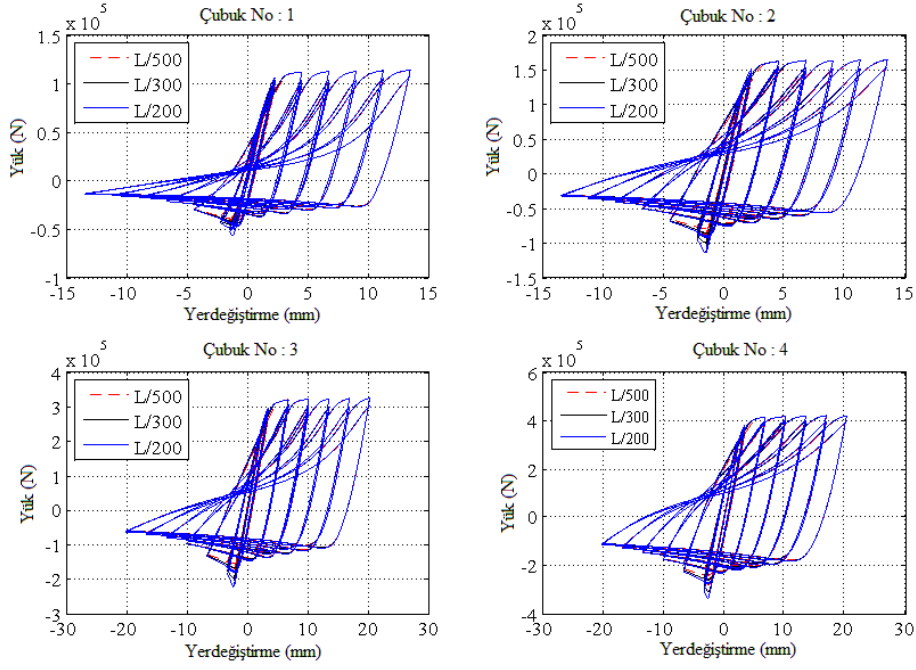
Şekil 4.7 : Bulon-Somun malzeme modeli.

Çubuk elemanın her iki ucunda bulunan kürelerin rijit eleman olarak davranacağı düşünülmüş, sonlu eleman modeli bulonla aynı şekilde oluşturulmakla birlikte rijit eleman davranışını yansıtmak amacıyla “uniaxialMaterial Elastic” komutu ile elastisite modülü diğer elemanlara göre görece olarak yüksek bir değer girilerek elastik materyal tanımı yapılmıştır.

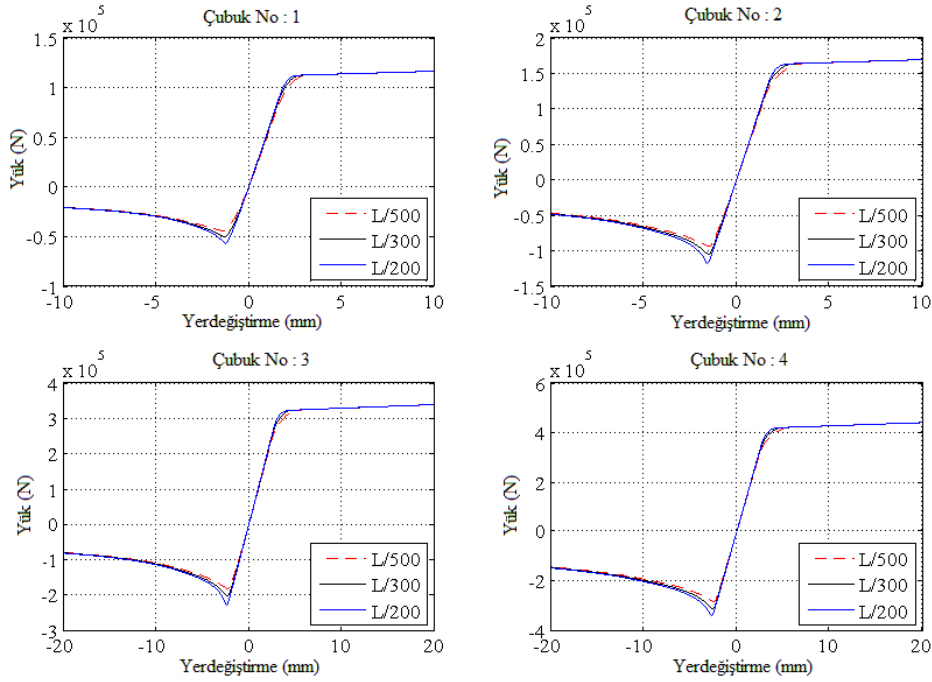
4.1.5. Analizlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi

Genel sistemde kullanılacak çubuk eleman malzeme modellerinin oluşturulması için hazırlanan tersinir çevrimsel yükleme altındaki analiz modelinde, Çizelge 3.1’de görülen örnek boru enkesitli profil-bulon kombinasyonları hem sadece boru enkesitli doğrusal çubuk eleman olarak, hem de bulon ve kürelerle tanımlanmış olarak incelenmiştir. Her bir boru enkesitli eleman, orta noktalarında L/200, L/300, L/500 oranlarında başlangıç kusuruna sahip olacak şekilde 3 ayrı formda tanımlanarak üç durum için çevrimsel yükleme altında yük-yerdeğiştirme grafikleri elde edilmiştir.

Şekil 4.8’de sadece boru enkesitli profillerle tanımlanan 1, 2, 3 ve 4 nolu çubukların L/200, L/300 ve L/500 başlangıç kusuru oranlarına sahip oldukları durumlar için çevrimsel tersinir yükleme altındaki yük-yerdeğiştirme grafikleri görülmektedir. Şekil 4.9’da ise grafiklerin daha rahat anlaşılabilmesi açısından yaklaşık zarf eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.8 : 1, 2, 3 ve 4 nolu çubukların çevrimsel yükleme altında yük-yerdeğiştirme grafikleri.

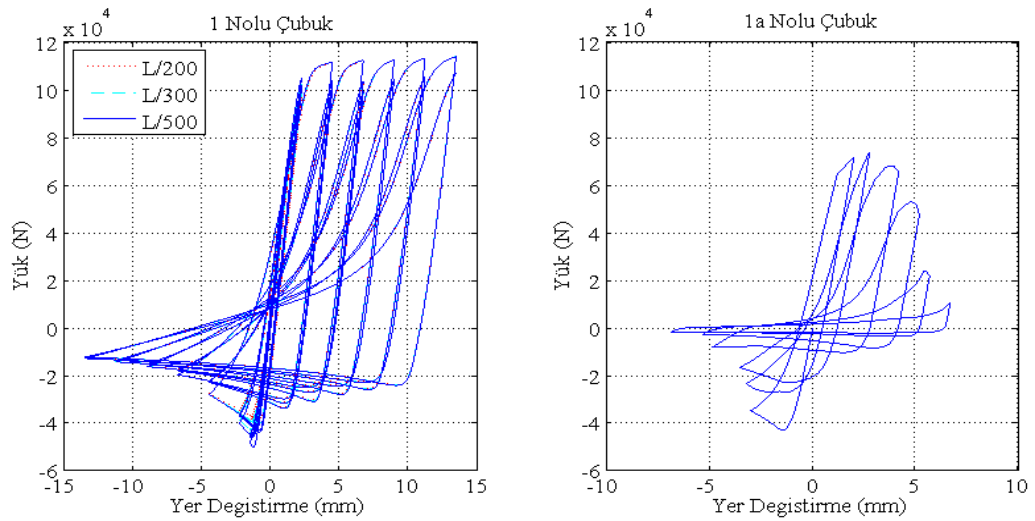


Şekil 4.9 : 1, 2, 3 ve 4 nolu çubuklar için çevrimsel yükleme zarf eğrileri.

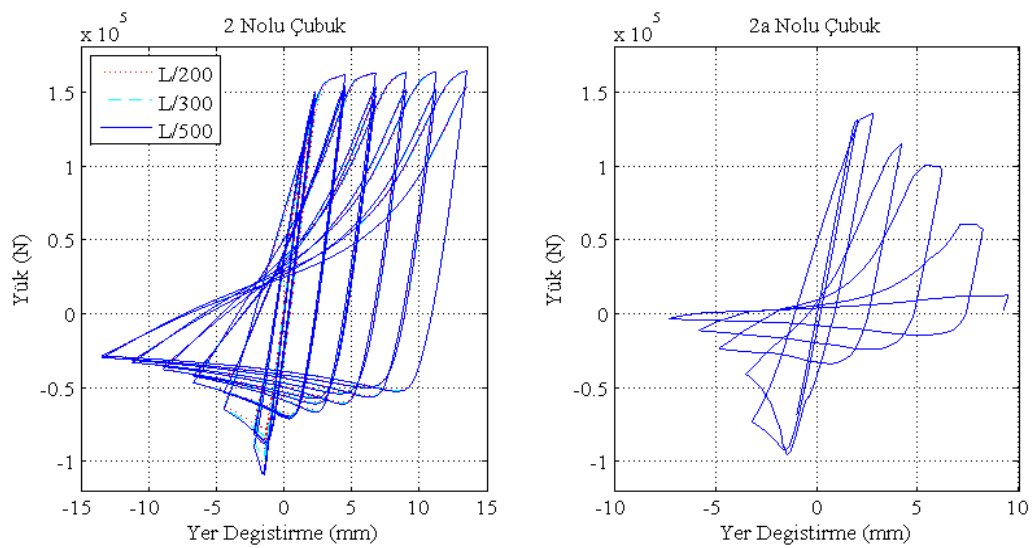
Şekil 4.8'de ve Şekil 4.9'da görüldüğü üzere sadece boru enkesitli profilden oluşan çubuk eleman analizlerinde ilk çevrimlerde başlangıç kusuru etkin olmaktadır. Başlangıç kusuru arttıkça elemanın burkulma yükünde azalma olduğu görülmektedir. İlerleyen çevrimlerde ise her üç başlangıç kusuru oranı için artık gerilme seviyeleri aynı şekilde devam etmektedir.

Bulon ve küre ile birlikte detaylı şekilde tanımlanmış çubuk eleman analizleri sonucunda elde edilen yük-yerdeğiştirme grafikleri Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir. Çizelge 4.1'de özellikleri verilen 1, 2, 3 ve 4 nolu çubuklarda bulon kopma dayanımı, çubuk akma dayanımından yüksekken, 1a, 2a, 3a ve 4a nolu çubuklarda bulonların kopma dayanımı çubuk akma dayanımından düşük olacak şekilde endüstride kullanılan boru enkesitli profil-bulon kombinasyonlarından seçilmiştir.

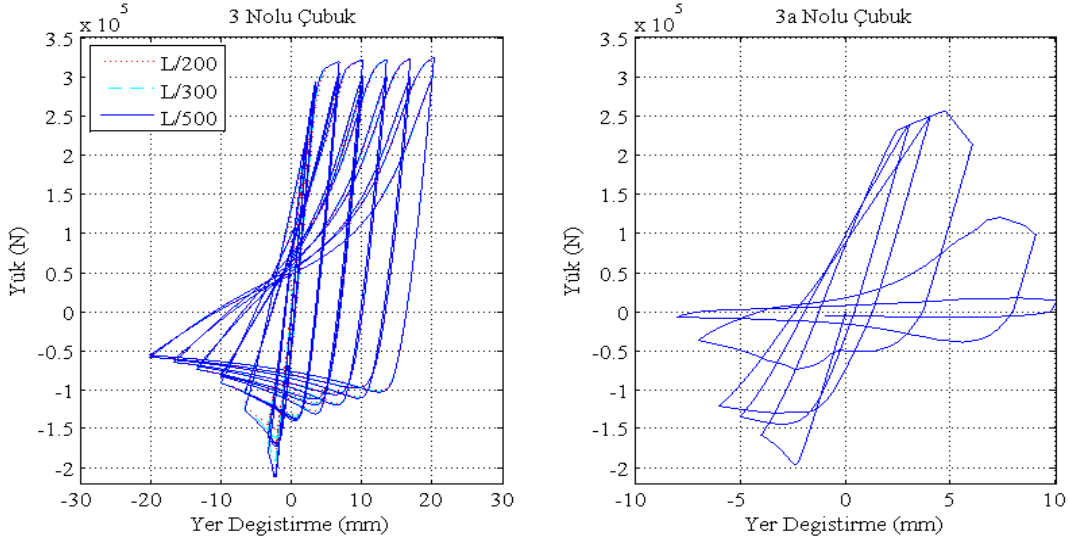
Şekillerde de görüldüğü gibi düşük kapasiteli bulon kullanılması durumunda boru enkesitli eleman akma kapasitesine ulaşmadan bulonlarda göçme meydana gelmektedir. Ayrıca göçme ani bir şekilde gerçekleşmekte ve sünek bir göçme söz konusu olamamaktadır.



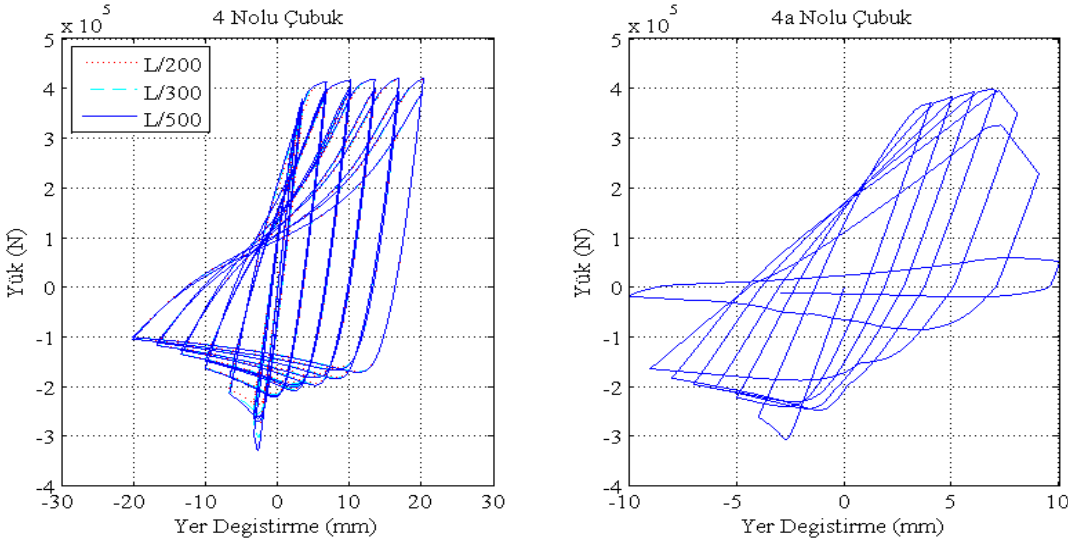
Şekil 4.10 : 1 ve 1a çubukları.



Şekil 4.11 : 2 ve 2a çubukları.



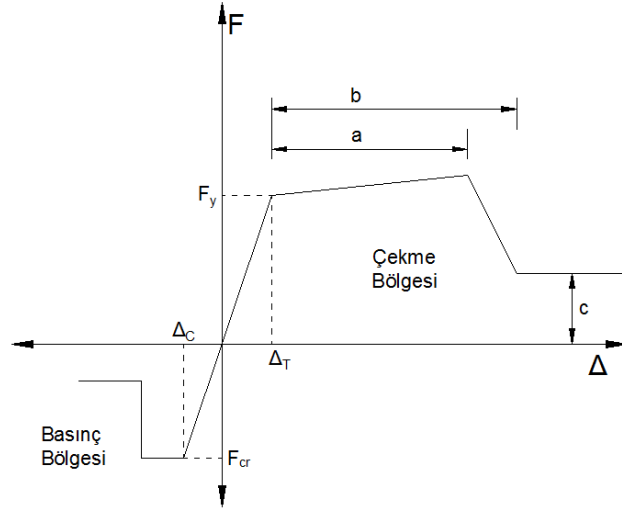
Şekil 4.12 : 3 ve 3a çubukları.



Şekil 4.13 : 4 ve 4a çubukları.

4.1.5.1. FEMA-356 plastik mafsal tanımıyla sonuçların doğrulanması

Oluşturulan modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla analiz sonuçları FEMA356 (Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings) [22] standardında, aksel yük altındaki elemanlar için verilen plastik mafsal verileriyle karşılaştırılmıştır. İlgili standartta aksel yük altındaki boru enkesitli çubuklar için belirtilen plastik mafsal modeli Şekil 4.14'te, bu modeli kullanmak için gerekli veriler ise Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Burada F_y çubuk elemanın akma dayanımını, F_{cr} kritik burkulma dayanımını, Δ_T akma anındaki şekildeğiştirmeyi, Δ_C burkulma anındaki şekildeğiştirmeyi göstermektedir.



Şekil 4.14 : FEMA356 plastik mafsalsal modeli [22].

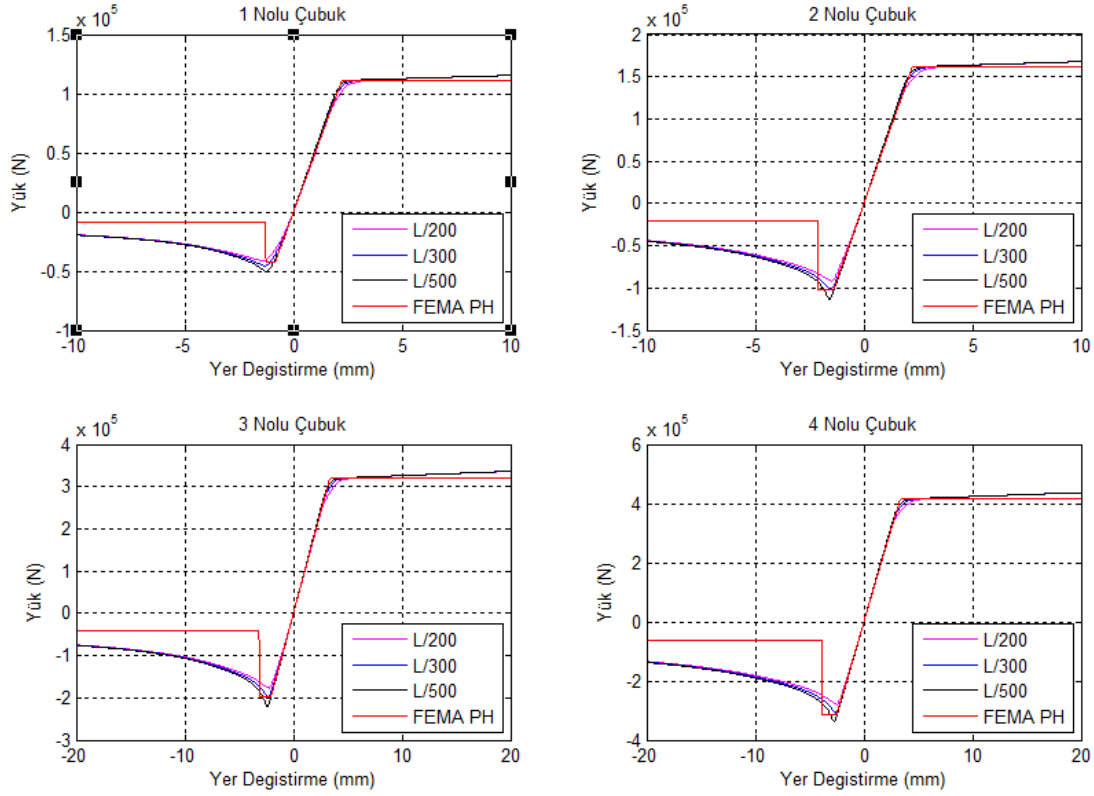
Çizelge 4.2 : FEMA356 plastik mafsalsal modeli verileri [22].

Eleman Tipi	Durum	Plastik Deformasyon Değerleri		Artık Gerilme
		a	b	
Çekme etkisindeki Elemanlar		$11\Delta_T$	$14\Delta_T$	0.8
Basınç Etkisindeki Elemanlar	$\frac{d}{t} \leq \frac{1500}{F_y}$	$0.5\Delta_C$	$9\Delta_C$	0.4
	$\frac{d}{t} \geq \frac{6000}{F_y}$	$0.5\Delta_C$	$3\Delta_C$	0.2
	$\frac{1500}{F_y} \leq \frac{d}{t} \leq \frac{6000}{F_y}$	Lineer Enterpolasyon Kullanılmalı		

Karşılaştırma modelinde iki ucu mafsallı doğrusal çubuk kullanılmış, plastik mafsalsal tanımındaki kritik noktalar malzeme modelinde girilerek bu malzeme modeli çubuğa atanmıştır. Kritik noktaların hesaplanmasında gerekli olan referans değerlerden çubuk akma dayanımı ve bu andaki şekildeğiştirme, malzeme özelliklerine göre belirlenmiş, kritik burkulma dayanımı ve bu andaki şekildeğiştirme ise AISC360-10 standardının E5 (basınç altındaki elemanların tasarımı) bölümünde açıklandığı şekilde hesaplanmıştır [23].

Şekil 4.15'te bulon ve küre ile birlikte tanımlanmış çubuk eleman modellerinin L/200, L/300 ve L/500 başlangıç kusuru oranlarına ve FEMA356 [22] plastik mafsalsal tanımına göre analiz sonuçlarından elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri verilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere hazırlanan modelden elde edilen sonuçlar, FEMA356'da belirtilen aksenal yük altında plastik mafsalsal tanımıyla elde edilen

sonuçlarla yaklaşık olarak örtüşmektedir. Özellikle L/300 başlangıç kusuru için aynı burkulma yükleri elde edilmiştir. Sonuç olarak oluşturulan çubuk eleman modelinin tutarlı sonuçlar verdiği görülmüş ve sistem analizlerinde kullanılacak çubuk eleman davranış modellerinin bu şekilde elde edilmesinin uygun olacağı görülmüştür.



Şekil 4.15 : 1,2,3 ve 4 nolu çubuklar için FEMA356 plastik mafsal tanımı ile elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri

4.2. Model Yapıların OpenSEES Modellerinin Hazırlanması

4.2.1. Çubuk elemanlar

Üç boyutlu olarak modellenen uzay kafes çatı sisteminde çubuk elemanlar doğrusal olarak modellenmiştir. OpenSEES kütüphanesindeki “nonlinearBeamcolumn” komutu ile tanımlanan çubuk elemanlarda, eleman uzunluğu boyunca beş adet integrasyon noktası girilmiştir. Çubuk kesitlerinde oluşturulan sonlu eleman ağında ise radyal ve çembersel doğrultuda toplam 64 adet sonlu eleman tanımlanmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 : Çubuk eleman boykesiti ve enkesiti.

Analiz adımlarında sistemde meydana gelecek şekildeğişirmelerden kaynaklanacak ikincil mertebe etkilerin dikkate alınması amacıyla çubuk elemanlarda corotational transformation kullanılmıştır.

4.2.2. Birleşim noktaları

OpenSEES programında düğüm noktalarında mafsallı davranışı verebilecek olan direkt bir komut bulunmamaktadır, bundan dolayı “Zero-Length Element” eleman tanımı yardımıyla benzeştirme yapılarak düğüm noktalarının mafsallı olması sağlanmıştır.

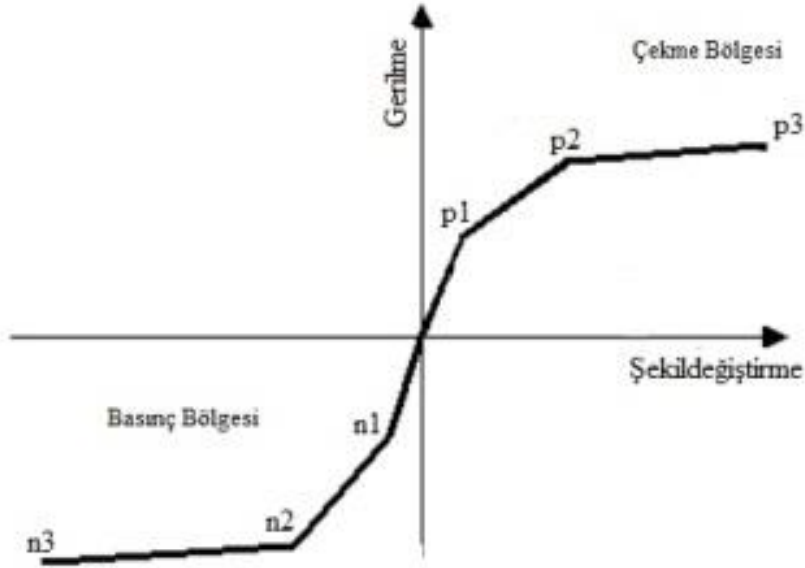
“Zero-Length Element” eleman modelinde aynı koordinatlara sahip iki nokta tanımlanarak, bu noktanın üç yerdeğiştirme doğrultusu ve üç dönme eksenini olmak üzere altı serbestlik derecesi için malzeme tanımı girilebilmektedir (üç boyutlu modellerde). Bu sayede tanımlanan noktanın hangi etki altında nasıl davranacağı belirlenebilmektedir. Elemanın global eksenlerden farklı bir doğrultuda olması isteniyorsa “orientation” komutu ile lokal eksenler tanımlanabilmektedir.

Düğüm noktalarındaki mafsal özelliğini sağlamak amacıyla, çubuk uç noktalarında, düğüm noktalarıyla aynı koordinatlara sahip yeni noktalar tanımlanarak bu bölgeye “Zero-Length Element” atanmıştır. Noktadaki dönmeleri serbest bırakmak amacıyla x, y ve z eksenleri etrafındaki dönmeler için elastisite modülü düşük malzeme tanımı yapılmıştır. Yerdeğiştirme eksenlerinde ise herhangi bir malzeme girilmemiştir. Bu doğrultularda kuvvet aktarımının sağlanması için “equalDOF” komutu yardımıyla düğüm noktasında tanımlanan tüm noktaların aynı yerdeğiştirmeleri yapmaları sağlanmıştır.

4.2.3. Malzeme modelleri

Çubuk elemanların davranış modeli, “Hysteretic” komutu ile tanımlanan malzeme modeli kullanılarak tanımlanmaktadır. Bu model, altı kritik noktadaki gerilme-

şekildeğiştirme değerlerinin tanımlanmasıyla oluşturulmaktadır. **Şekil 4.17**'de gerilme-şekildeğiştirme eğrisi verilen “Hysteretic” malzeme modelinde p_1 , p_2 ve p_3 değerleri çekme bölgesindeki kritik noktaları, n_1 , n_2 ve n_3 değerleri basınç bölgesindeki kritik noktaları göstermektedir.

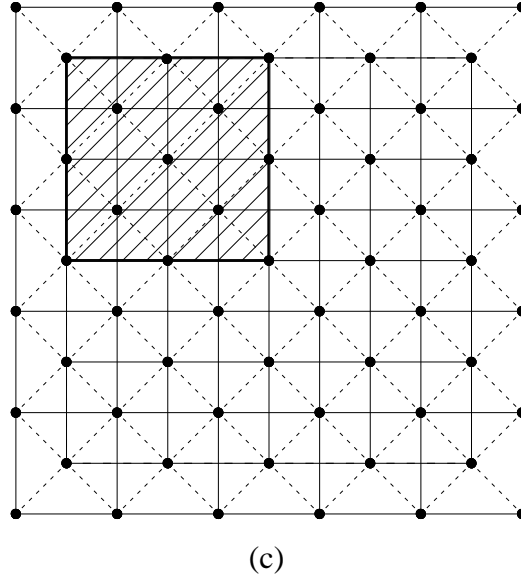
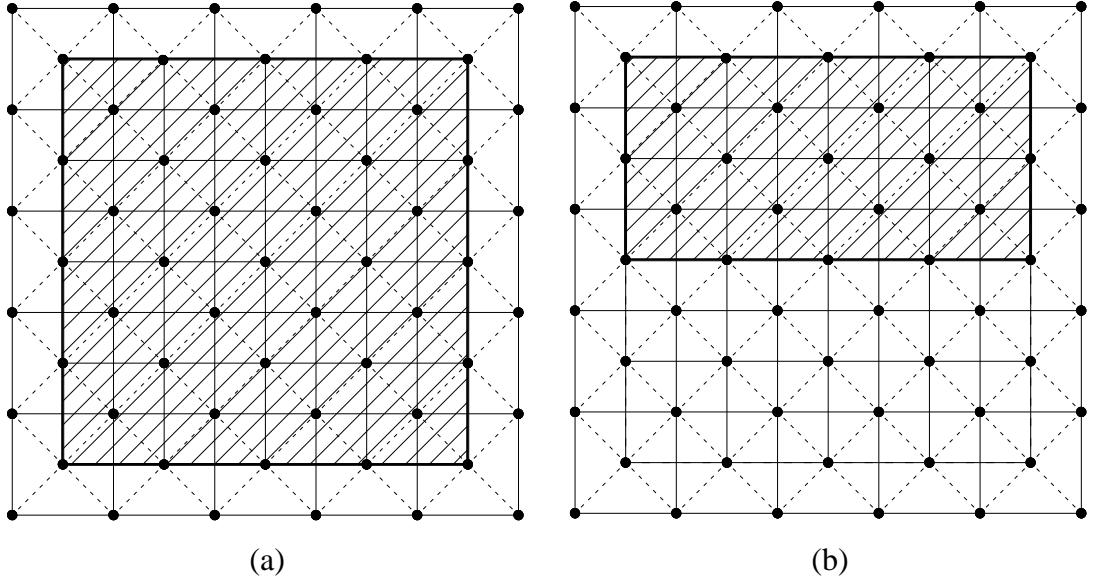


Şekil 4.17 : “Hysteretic” malzeme modeli.

Malzeme modellerinin oluşturulmasında her bir çubuk için **bölüm 4.1**'de belirtilen esaslar uygulanarak kritik gerilme-şekildeğiştirme noktaları belirlenmiştir ve “Hysteretic” malzeme tanımında girilerek çubuklara atanmıştır. Her iki örnek sistemdeki çubuklar için başlangıç kusuru oranının $L/300$ ve $L/500$ olması, aynı zamanda bulonların tanımlı olması veya olmaması durumları için ayrı ayrı malzeme modelleri oluşturulmuştur. Burada bulonların tanımlı olması, bulon kopma dayanımının çubuk akma dayanımından küçük olduğu elemanlarda sınır durum için bulonun belirleyici olarak dikkate alındığını göstermektedir.

4.2.4. Yükleme durumları

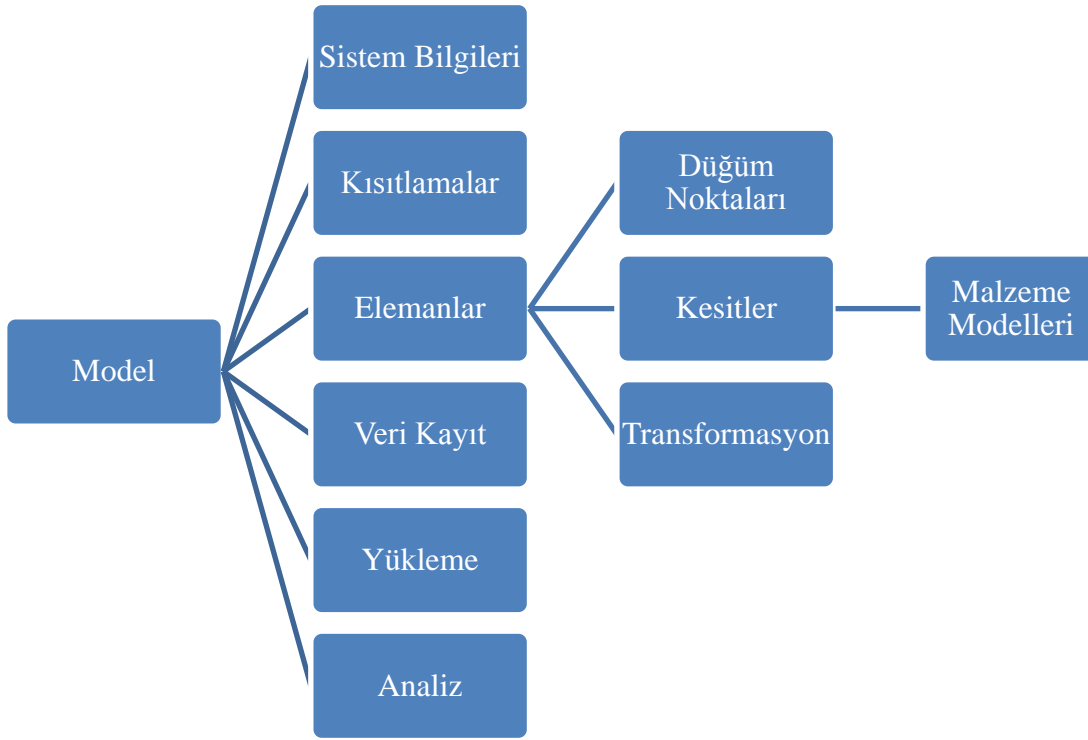
Uzay kafes sistemde yük yığılmalarını temsil etmek üzere, sistemin tamamının, yarısının ve çeyreğinin dolu olması hali için yüklemeler yapılmıştır. **Şekil 4.18**'de gösterilen yükleme durumları için her bir düğüm noktasına yük aldığı alanlarla orantılı olarak yükleme dağılımı yapılmıştır. Burada köşe noktalara 0.25, köşe haricindeki kenar noktalara 0.50 ve orta noktalara 1.00 oranlarında 1 kN'un katları olacak şekilde birim yükler girilmiştir.



Şekil 4.18 : Yükleme durumları (a) tam yükleme, (b) yarım yükleme , (c) çeyrek yükleme.

4.2.5. Çözüm akış şemasının ve OpenSEES veri dosyalarının hazırlanması

OpenSEES analizlerinde kodların akış şeması **Şekil 4.19**'da verilmiştir. Programda ilk olarak çözülecek sistemin boyut bilgisi ve serbestlik derecesini içeren sistem bilgilerinin girilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada örnek sistemler üç boyutlu ve altı serbestlik dereceli olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.19 : OpenSEES akış şeması.

Kısıtlamalar bölümünde düğüm noktalarına uygulanacak yerdeğiştirme kısıtları girilmektedir. Burada sistemlerin dört köşe noktası basit mesnetli olarak tanımlanmıştır. Ayrıca düğüm noktalarında “Zero Length Element” elemanını tanımlamak amacıyla girilen ekstra düğüm noktalarında, yerdeğiştirmelerin aynı olmasını sağlamak için “equalDOF” komutu kullanılmıştır.

Elemanların tanımlandığı kısımda, sistemde kullanılan tüm eleman türlerinin ve bunlara ait bilgilerin girilmesi gerekmektedir. İlk olarak malzeme modelleri tanımlanarak kesitlere atanmaktadır. Daha sonra eleman i ve j noktaları, integrasyon noktası sayısı, transformasyon türü ile birlikte, oluşturulan enkesitler elemanlara atanmaktadır. Bu çalışmada çubukları temsil eden “nonlinearBeamColumn” ve düğüm noktalarında dönme hareketini veren “zeroLength” elemanlar kullanılmıştır.

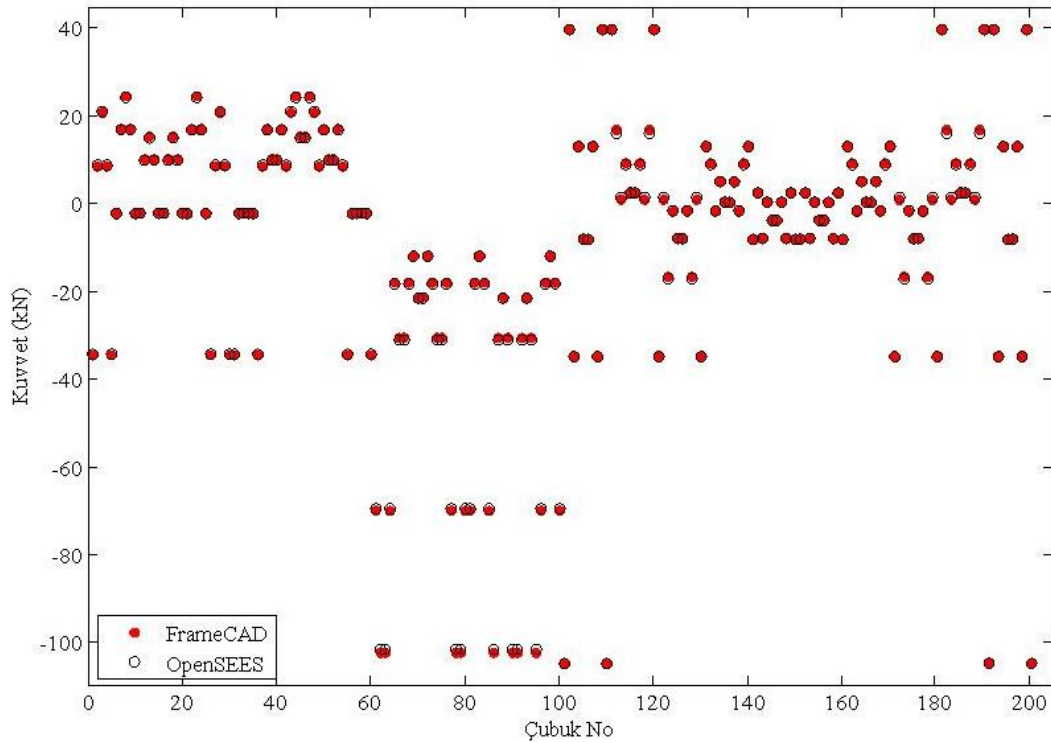
Veri kayıt kısmında analiz sonucunda hangi dataların yazdırılacağı belirlenmektedir. Eleman iç kuvvetleri, düğüm noktası yerdeğiştirmeleri, gerilme-şekildeğiştirme değerleri ve mesnet reaksiyonları bu bölümde yazılacak kodlar sayesinde okunabilmektedir. Yükleme bölümünde sisteme etkitilecek yükler girilmektedir. Burada daha önce açıklanmış olan üç farklı yükleme durumuna göre, sistemin üst başlık düğüm noktalarına düşey yükler etkitilmiştir. Analiz kısmında OpenSEES

statik itme analizi (pushover) protokol dosyası, gerekli düzenlemeler yapılarak kullanılmıştır.

Uzay kafes sistemler çok fazla sayıda eleman içerdiğinden FrameCAD verileri, yapılacak analize uygun şekilde Matlab [24] programında işlenerek OpenSEES analiz dosyaları haline getirilmiştir.

4.2.6. OpenSEES modelinin doğrulanması

OpenSEES dosyaları oluşturulduktan sonra, hazırlanan modelin tutarlı sonuçlar verip vermediği kontrol edilmiştir. FrameCad programında hazırlanan modelden alınan hesap yükleri, OpenSEES programında oluşturulan modelde, düğüm noktalarına aynı şekilde girilerek lineer analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda her iki programdan elde edilen iç kuvvetler karşılaştırılmıştır ve aradaki farklar %1 mertebelerinde çıkmıştır. **Şekil 4.20**'de OpenSEES ve FrameCAD programlarından elde edilen çubuk kuvvetlerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 4.20 : OpenSEES ve FrameCad çubuk kuvvetleri.

4.3. Yapıların Düşey Yükler Altında Statik İtme Analizi

Statik itme analizinde yapının orta düğüm noktasındaki düşey yerdeğiştirme değeri kontrol parametresi olarak alınmıştır. Sistemin kapasitesi dört köşe noktasındaki

düşey mesnet reaksiyonları toplamı alınarak bulunmuştur. Analizler **Çizelge 4.3**'te gösterildiği gibi tüm durumları yansıtmak üzere toplam 24 farklı şekilde gerçekleştirilmiştir.

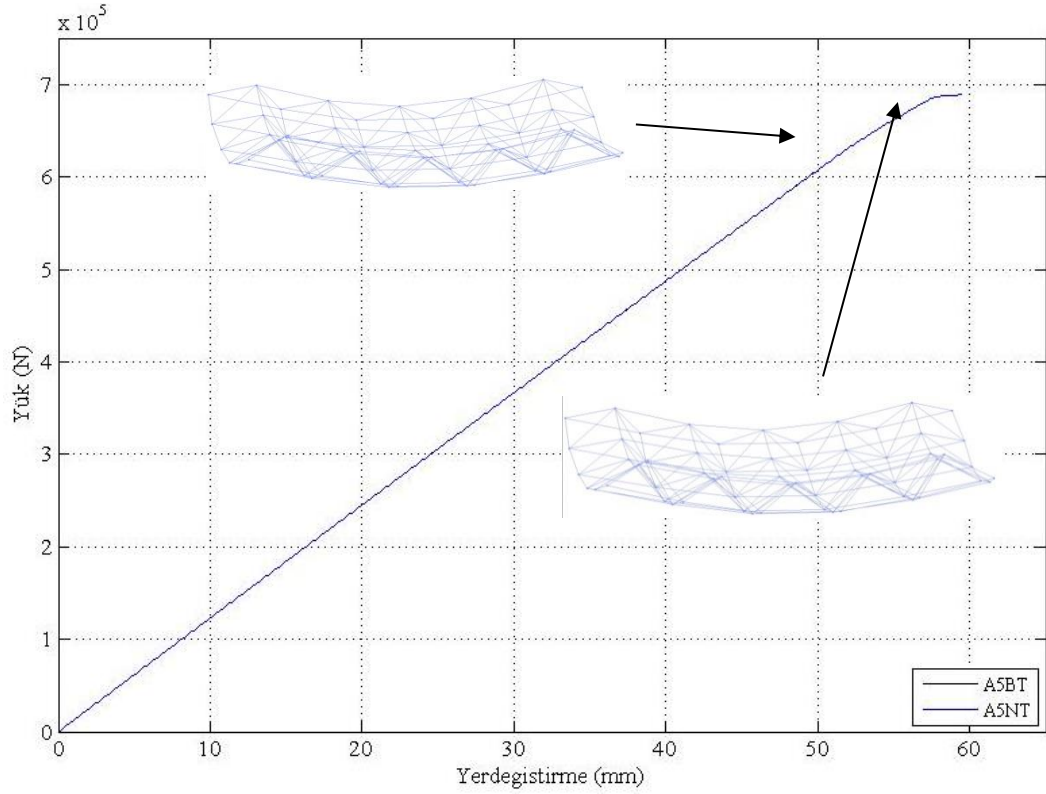
Çizelge 4.3 : Analiz Modelleri

Analiz Kodu	Model Adı	Çubuklarda Başlangıç Kusuru Oranı	Bulon Tanımı	Yükleme Durumu
A5BT	A	L/500	Var	Tam
A5BY	A	L/500	Var	Yarım
A5BC	A	L/500	Var	Çeyrek
A5NT	A	L/500	Yok	Tam
A5NY	A	L/500	Yok	Yarım
A5NC	A	L/500	Yok	Çeyrek
A3BT	A	L/300	Var	Tam
A3BY	A	L/300	Var	Yarım
A3BC	A	L/300	Var	Çeyrek
A3NT	A	L/300	Yok	Tam
A3NY	A	L/300	Yok	Yarım
A3NC	A	L/300	Yok	Çeyrek
B5BT	B	L/500	Var	Tam
B5BY	B	L/500	Var	Yarım
B5BC	B	L/500	Var	Çeyrek
B5NT	B	L/500	Yok	Tam
B5NY	B	L/500	Yok	Yarım
B5NC	B	L/500	Yok	Çeyrek
B3BT	B	L/300	Var	Tam
B3BY	B	L/300	Var	Yarım
B3BC	B	L/300	Var	Çeyrek
B3NT	B	L/300	Yok	Tam
B3NY	B	L/300	Yok	Yarım
B3NC	B	L/300	Yok	Çeyrek

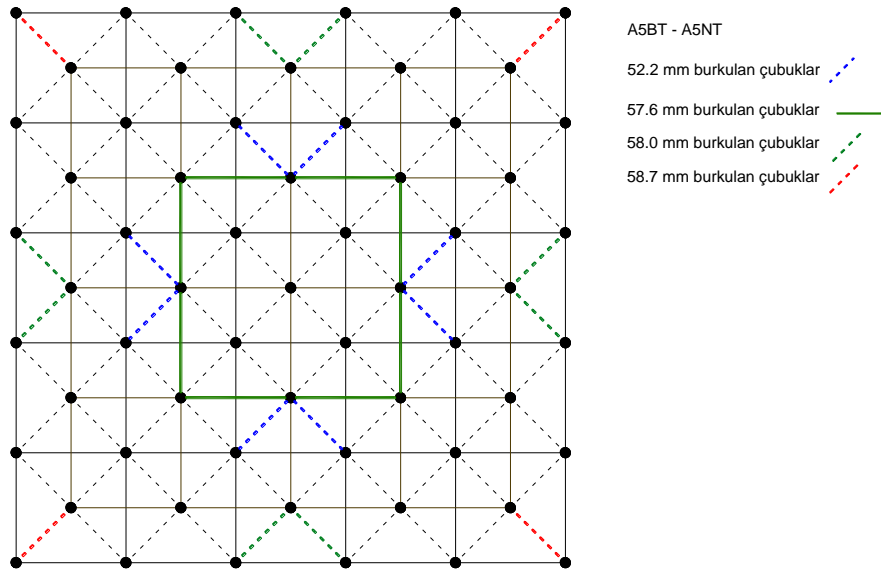
4.3.1. Model A analizleri

A5BT ve A5NT durumları için elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrisi **Şekil 4.21**'de gösterilmiştir. L/500 başlangıç kusuru oranı ve tam yüklenme olması durumunu yansıtan modellerde, ilk olarak orta nokta düşey yerdeğiştirme değeri 52.2 mm

olduğunda sekiz adet çubukta burkulma görülmüştür. Şekil 4.22’de gösterildiği gibi çubukların art arda burkulmasıyla, orta noktanın yerdeğiştirmesi 59.0 mm’ye ulaştığında sistem yük taşıyamaz hale gelmiştir. Bu duruma karşı gelen yük değeri 688 kN olarak bulunmuştur. Sistemde göçme durumunu burkulan çubuklar belirlediğinden, bulonların tanımlandığı sistem ile tanımlanmadığı sistemler için aynı eğriler elde edilmiştir.

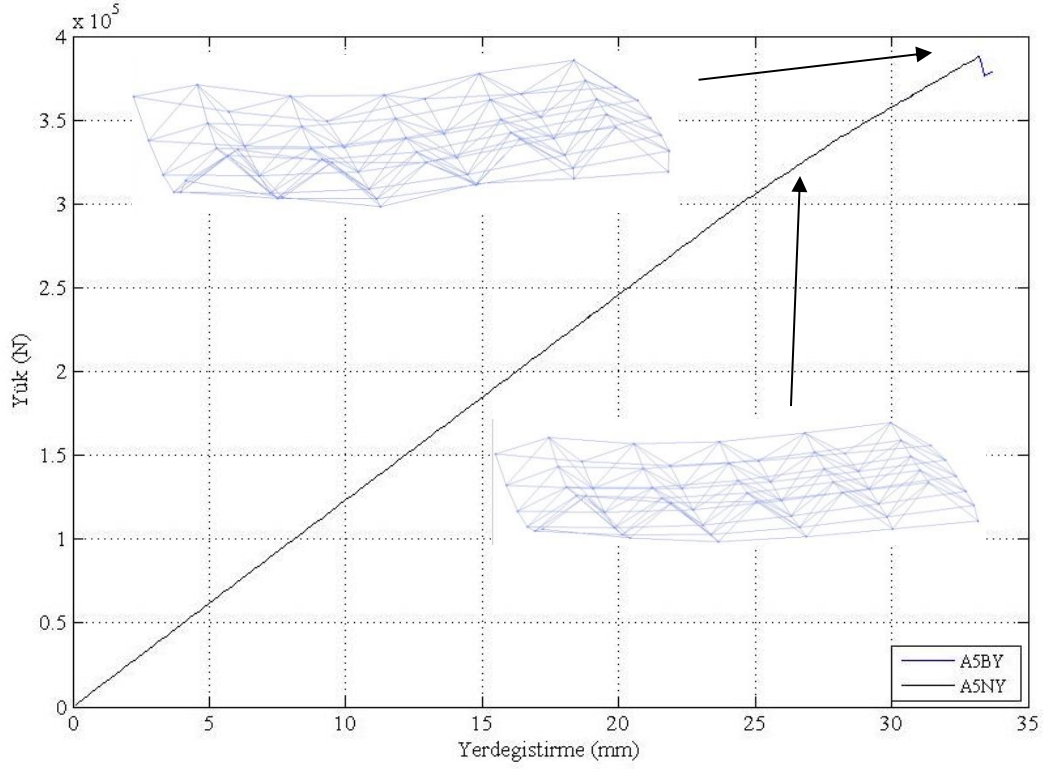


Şekil 4.21 : A5BT ve A5NT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

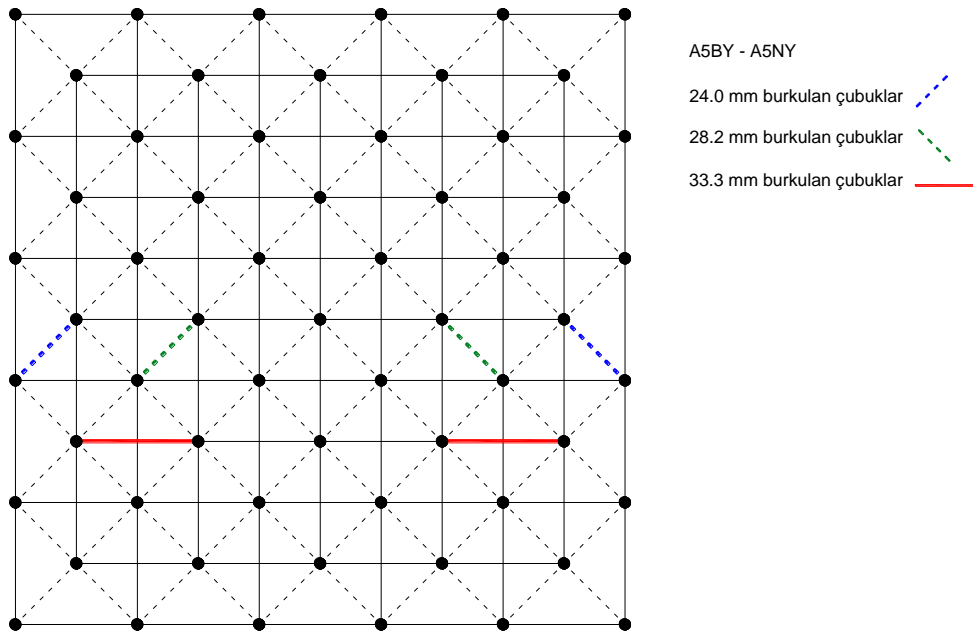


Şekil 4.22 : A5BT ve A5NT durumlarında kritik elemanlar.

L/500 başlangıç kusuru oranı ve yarım yükleme hali için oluşturulan A5BY ve A5NY modelleri için elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.23'te verilmiştir. Şekil 4.24'te verildiği gibi 24.0 mm yerdeğiştirme görüldüğü anda çubuklar burkulmaya başlamıştır. Taşıma kapasitesi 388 kN'a ve orta nokta yerdeğiştirmesi 33.3 mm'ye ulaştığında sistem göçmüştür.

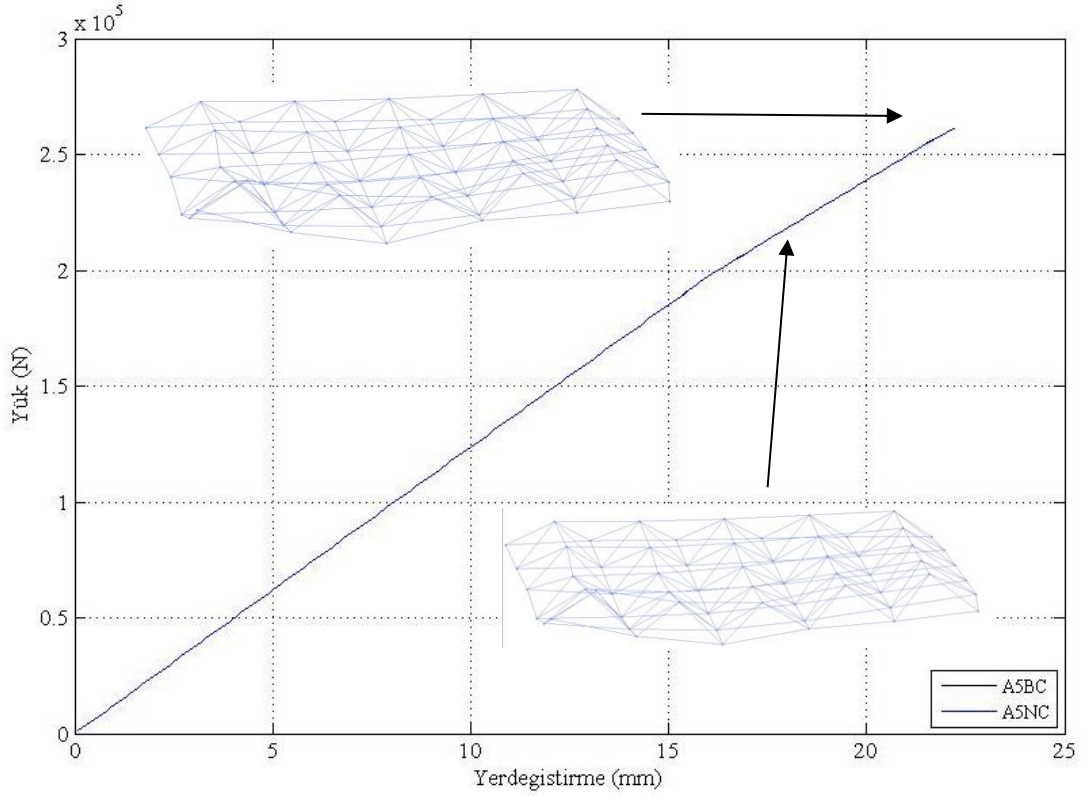


Şekil 4.23 : A5BY ve A5NY durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

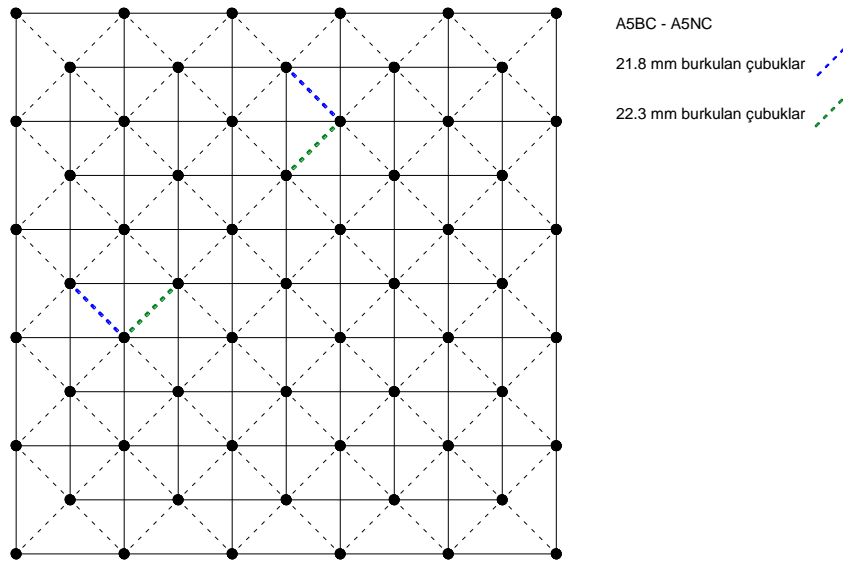


Şekil 4.24 : A5BY ve A5NY durumlarında kritik elemanlar.

A5BC ve A5NC durumları $L/500$ başlangıç kusuru oranı ve çeyrek yükleme hali için oluşturulmuştur. Analiz sonucunda 21.8 mm’de iki adet çubuğun burkulması ve ardından 22.3 mm’de iki çubuğun daha burkulmasıyla sistemde göçme meydana gelmiştir. Göçme anında sistemin taşıma kapasitesi 261 kN olarak bulunmuştur. Şekil 4.25’te bu durumlar için yük-yerdeğiştirme grafiği, Şekil 4.26’da ise kritik çubuklar gösterilmiştir.

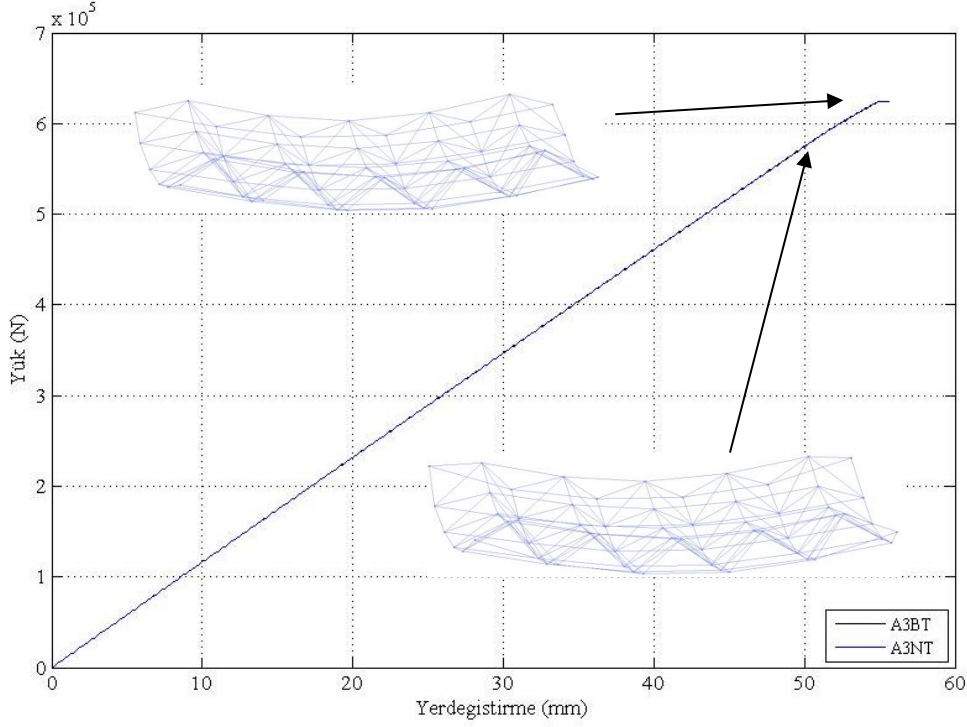


Şekil 4.25 : A5BC ve A5NC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

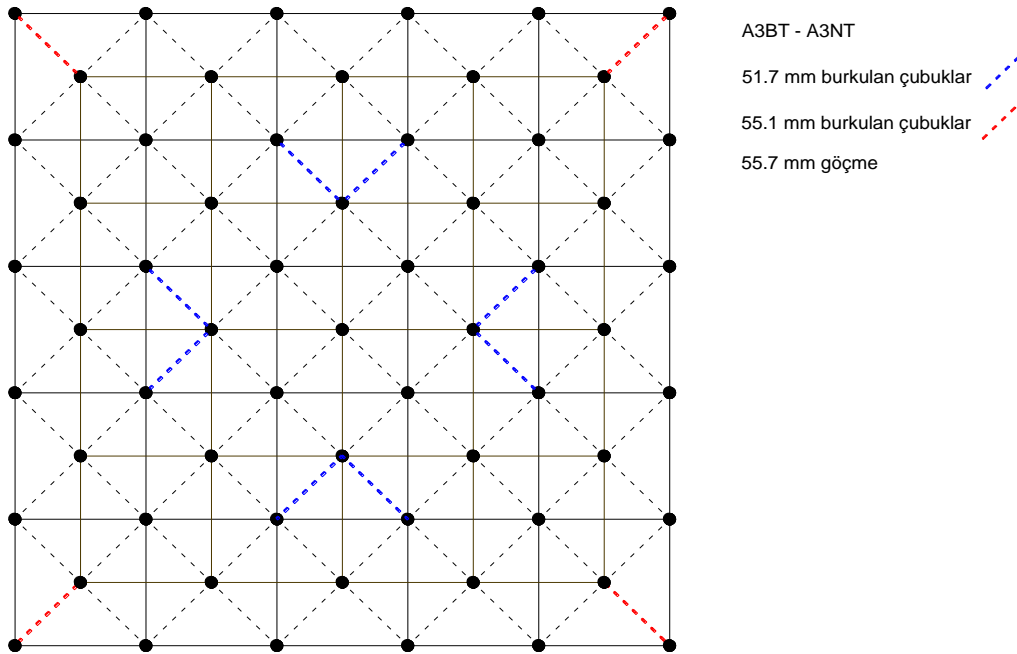


Şekil 4.26 : A5BC ve A5NC durumlarında kritik elemanlar.

Tam yükleme ve L/300 başlangıç kusuru oranına sahip A3BT ve A3NT modelleri için yapılan analizden elde edilen yük-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 4.27’de görülmektedir. 51.7 mm’de ilk olarak sekiz adet çubuk burkulmuş ve ardından 55.1 mm’de, dört köşedeki diagonal çubukların da burkulmasıyla sistem 624 kN taşıma gücüne ulaşarak göçmüştür. Burkulan çubuklar Şekil 4.28’de verilmiştir.

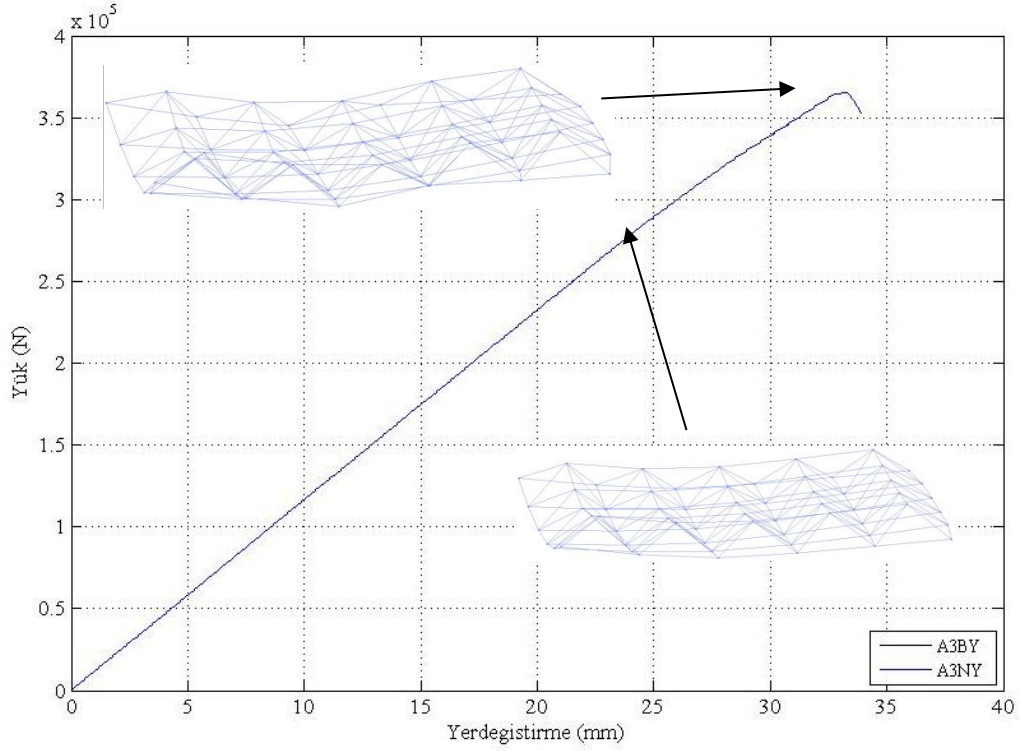


Şekil 4.27 : A3BT ve A3NT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

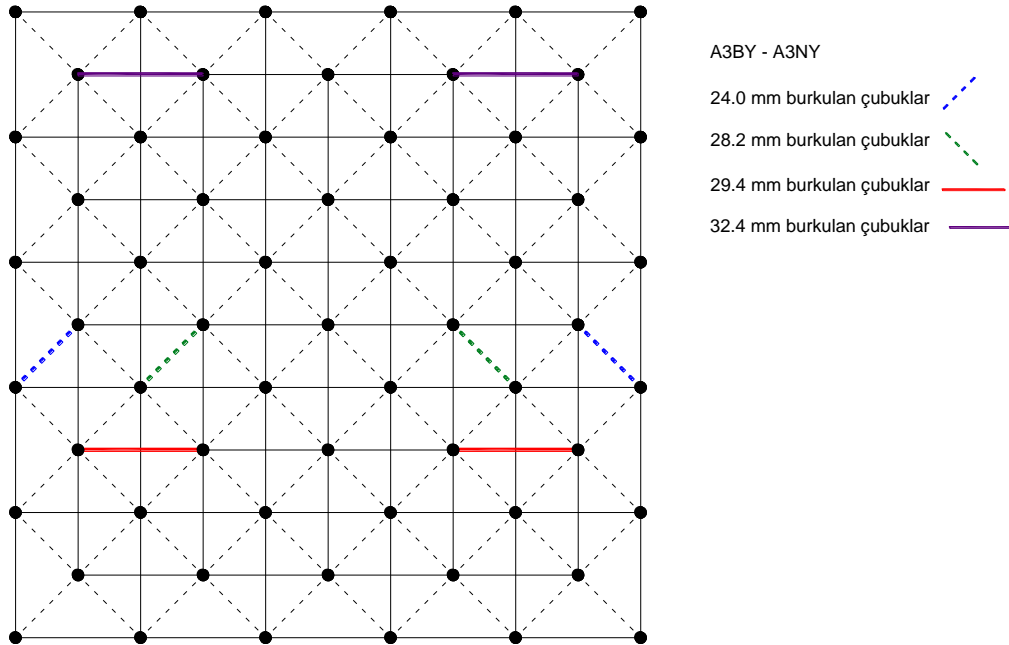


Şekil 4.28 : A3BT ve A3NT durumlarında kritik elemanlar.

Yük-yerdeğiştirme grafiği **Şekil 4.29**'da verilen A3BY ve A3NY modelleri, L/300 başlangıç kusuru oranı ve yarım y¼kleme durumunu temsil etmektedir. Orta nokta d¼řey yerdeğiştirmesi 24.0 mm de iken iki ¼ubukta burkulma g¼r¼lmeye başlanmış, 32.4 mm'ye ulaşıldığında toplamda sekiz adet ¼ubuk burkulmuş ve sistem g¼çm¼řt¼r (**Şekil 4.30**). Sistemin taşıma kapasitesi 365 kN olarak bulunmuştur.

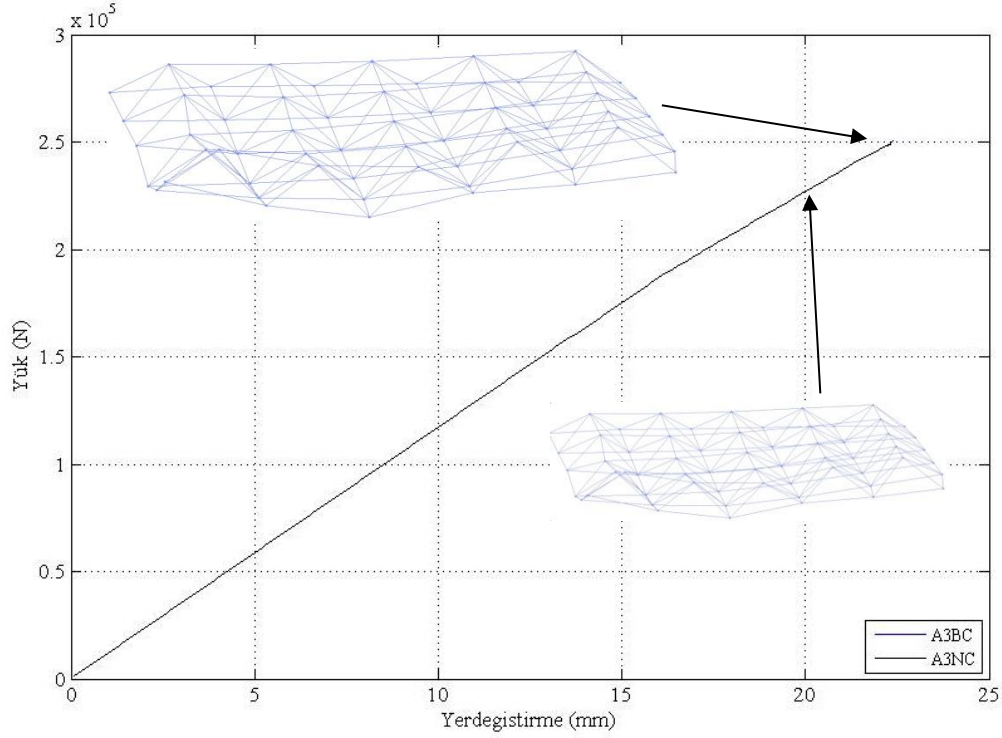


Şekil 4.29 : A3BY ve A3NY durumlarında y¼k-yerdeğiştirme eğrisi.

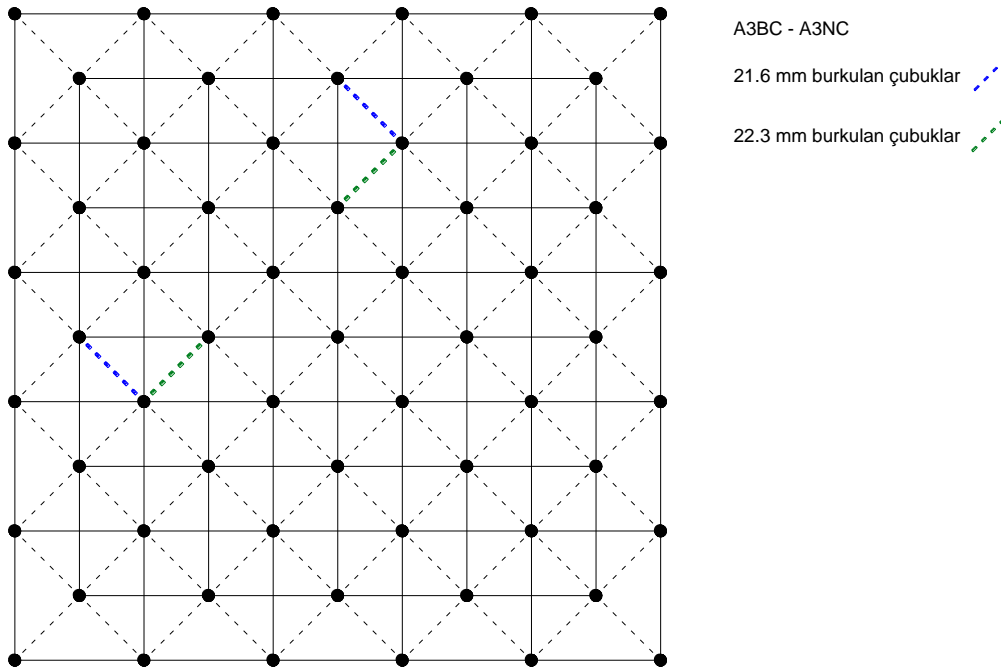


Şekil 4.30 : A3BY ve A3NY durumlarında kritik elemanlar.

L/300 başlangıç kusuru oranı ve çeyrek yükleme durumlarının ele alındığı A3BC ve A3NC sistemlerinde 21.6 mm’de burkulan çubukların olduğu gözlenmiştir. 22.3 mm orta nokta yerdeğiştirme değeri ve 249 kN yük altında sistemde göçme meydana gelmiştir. **Şekil 4.31**’de A3BC ve A3NC durumları için yük-yerdeğiştirme grafiği, **Şekil 4.32**’de ise kritik çubuklar gösterilmiştir.



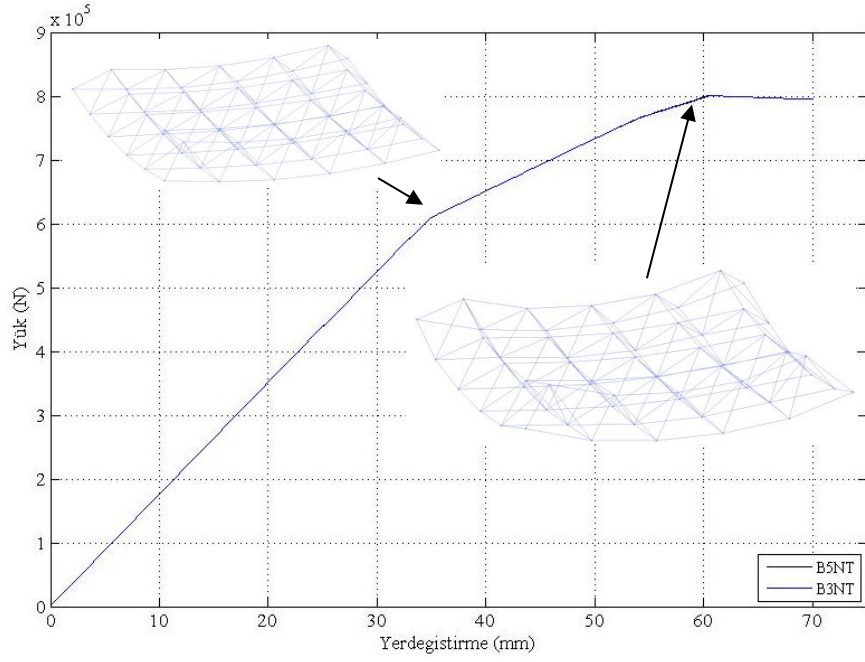
Şekil 4.31 : A3BC ve A3NC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.



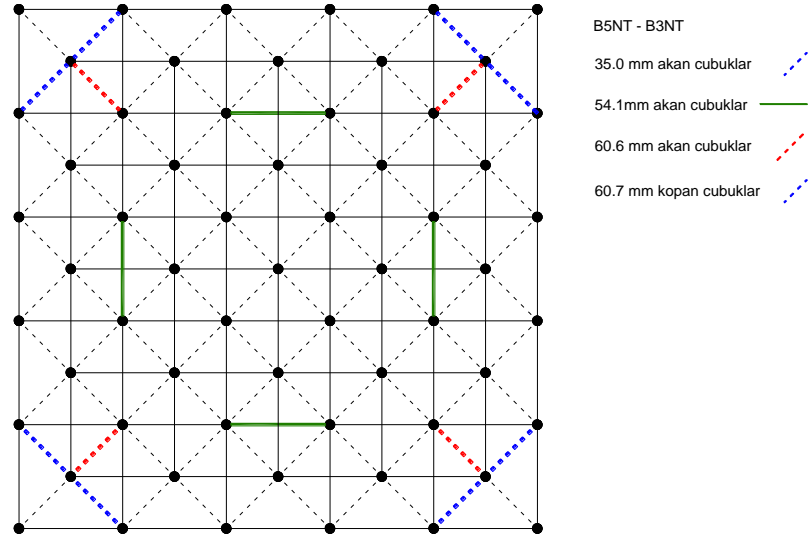
Şekil 4.32 : A3BC ve A3NC durumlarında kritik elemanlar.

4.3.2. Model B analizleri

B5NT ve B3NT durumları için elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Bulonların tanımlanmadığı, tam yükleme durumunu yansıtan modellerde, ilk olarak orta nokta düşey yerdeğiştirme değeri 35.0 mm olduğunda sekiz adet çubukta akma görölmesiyle elastik ötesi davranış başlamıştır (Şekil 4.34). Sekiz adet çubukta daha akma görüldükten sonra, 70.0 mm düşey yerdeğiştirmeye ulaşıldığında sistem göçmüştür. Sistemin taşıyabileceği maksimum yük 800 kN olarak bulunmuştur ve bu yüke karşı gelen yerdeğiştirme 60.7 mm'dir.

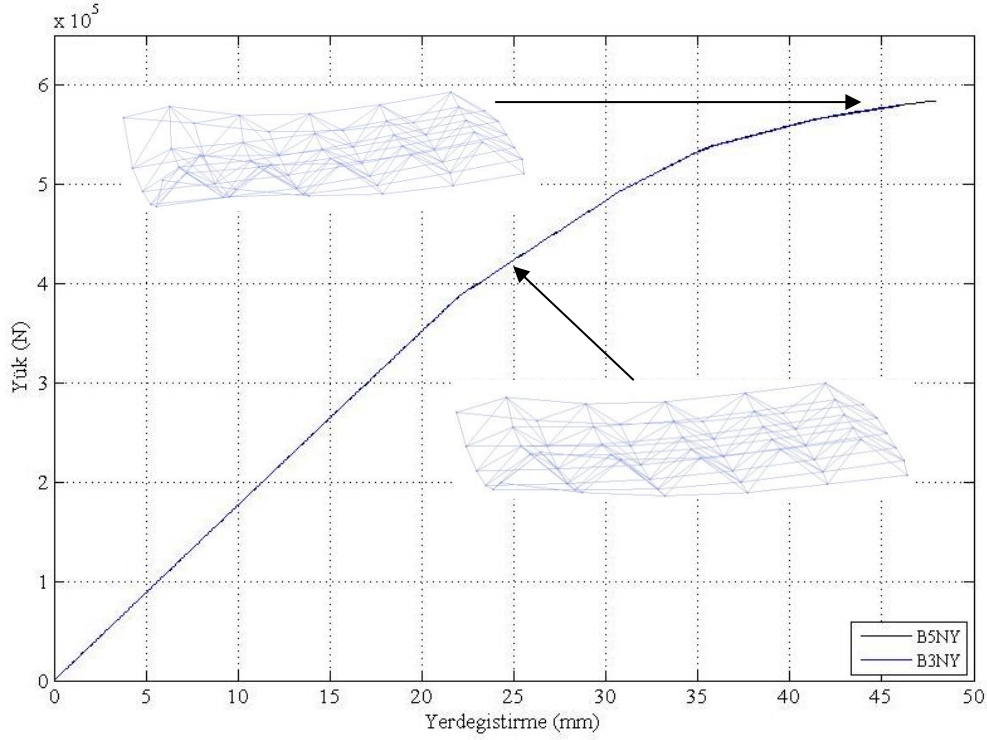


Şekil 4.33 : B5NT ve B3NT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

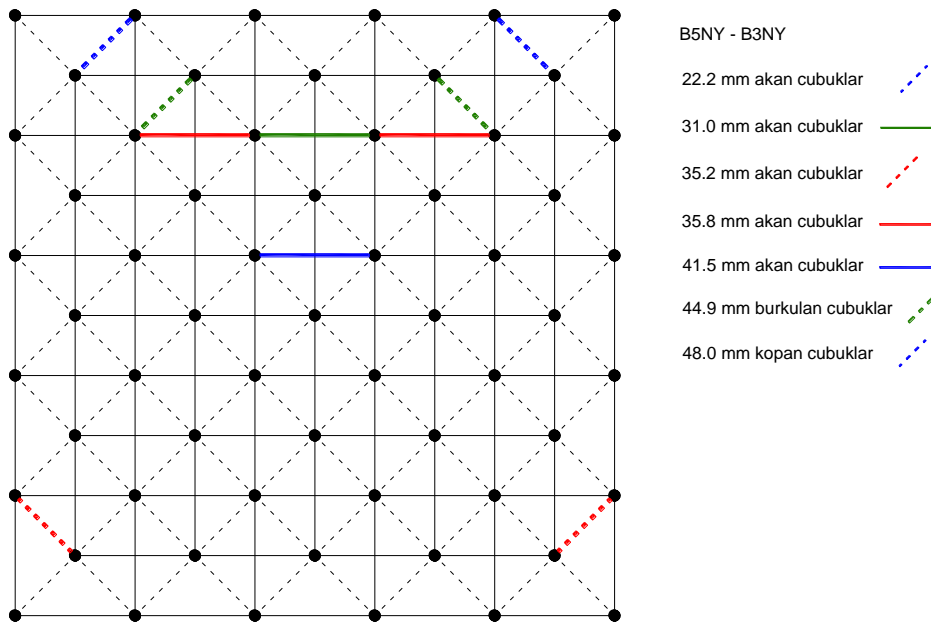


Şekil 4.34 : B5NT ve B3NT durumlarında kritik elemanlar.

Bulonların tanımlı olmaması ve yarım yükleme hali için oluşturulan B5NY ve B3NY modelleri için elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.35'te verilmiştir. Şekil 4.36'da verildiği gibi 22.2 mm yerdeğiştirme görüldüğü anda çubuklar akmaya başlamıştır. Taşıma kapasitesi 584 kN'a ve orta nokta yerdeğiştirmesi 47.9 mm'ye ulaştığında sistem göçmüştür.

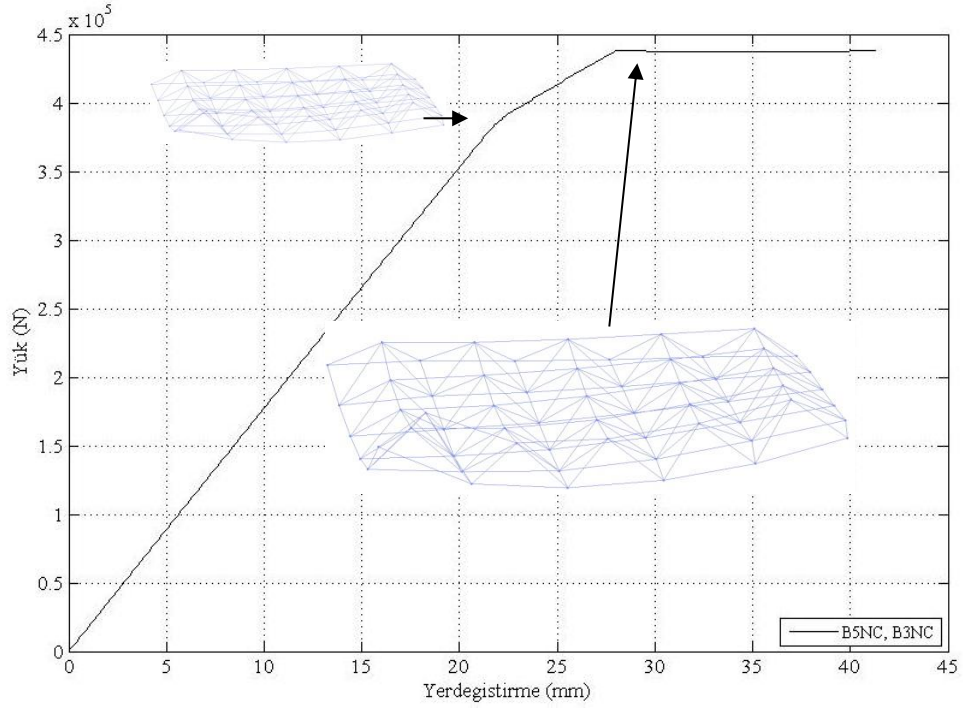


Şekil 4.35 : B5NY ve B3NY durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

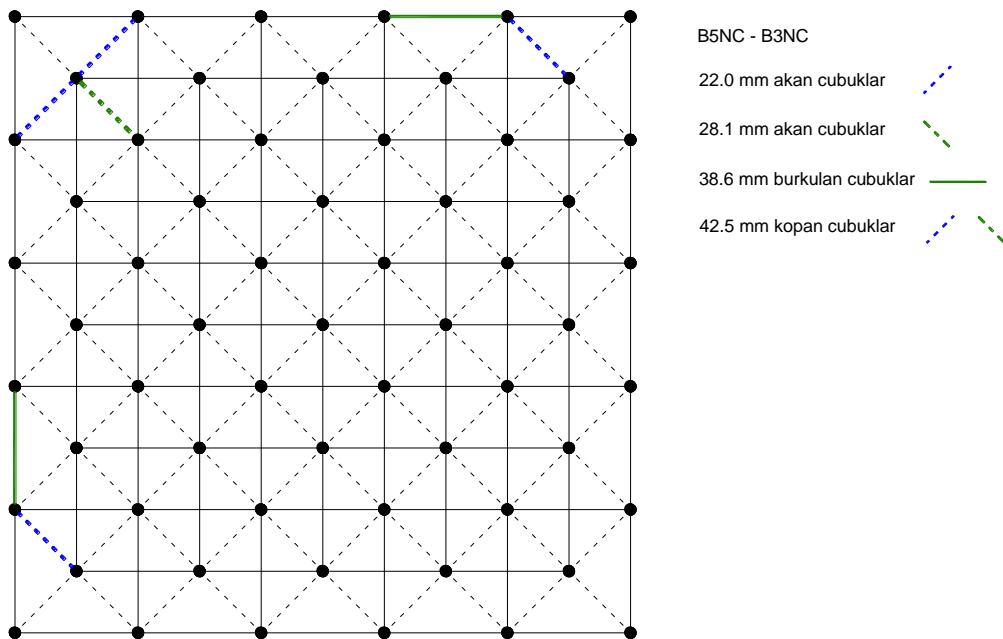


Şekil 4.36 : B5NY ve B3NY durumlarında kritik elemanlar.

B5NC ve B3NC durumları bulonların tanımlanmamış olması ve çeyrek yükleme hali için oluşturulmuştur. Analiz sonucunda 22.0 mm’de iki adet çubüğün akmaya başlaması ile elastik ötesi davranış başlamıştır. 42.5 mm’ye gelindiğinde beş adet çubukta kopma meydana gelmiş ve sistem göçmüştür. Göçme anında sistemin taşıma kapasitesi 439 kN olarak bulunmuştur. **Şekil 4.37**’de bu durumlar için yük-yerdeğiştirme grafiği, **Şekil 4.38**’de ise kritik çubuklar gösterilmiştir.

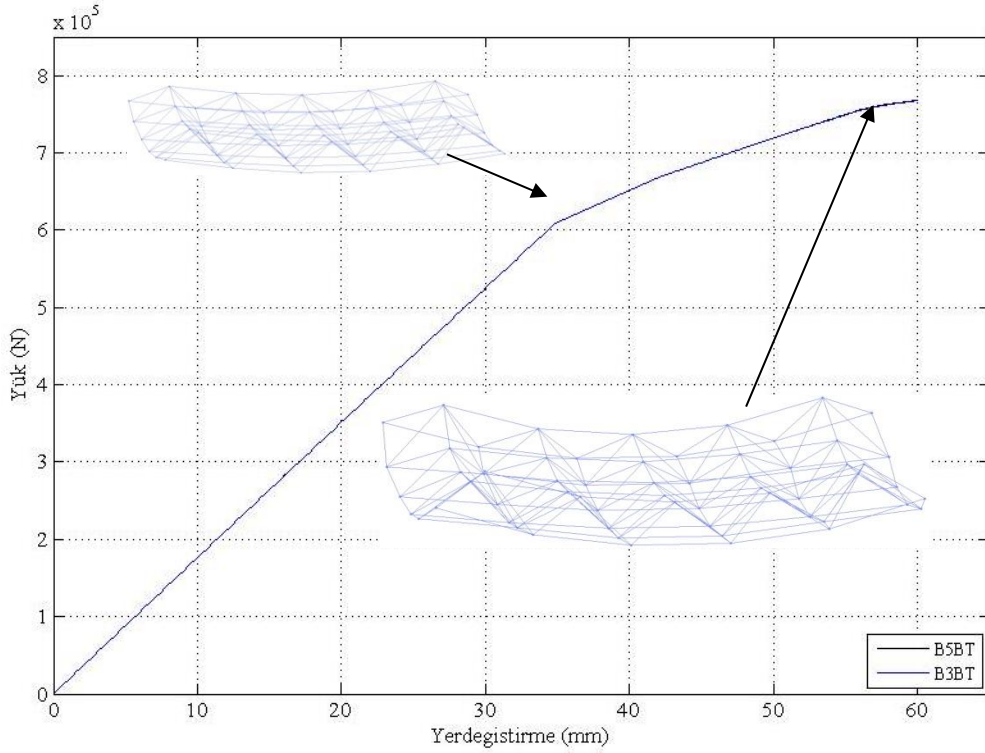


Şekil 4.37 : B5NC ve B3NC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

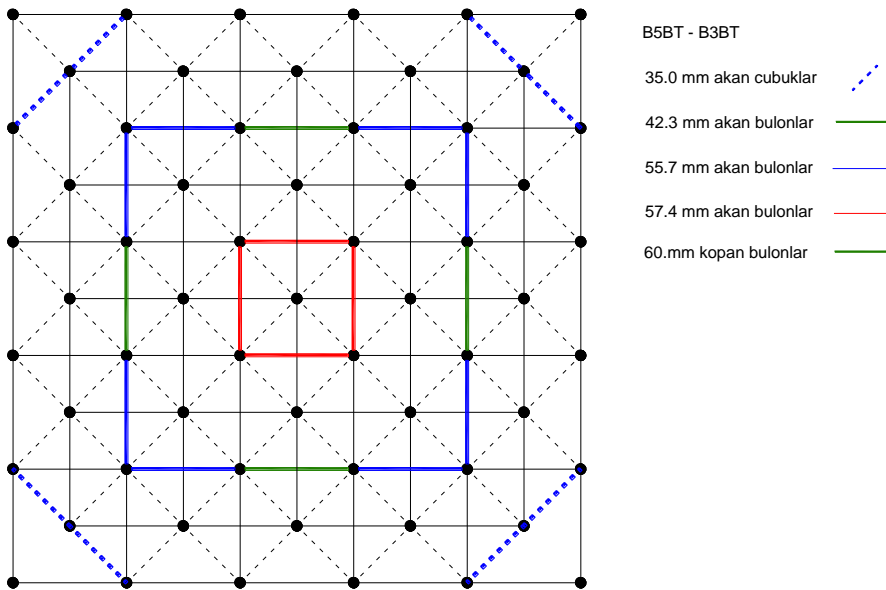


Şekil 4.38 : B5NC ve B3NC durumlarında kritik elemanlar.

Tam yükleme ve bulonların tanımlı olması durumunu yansıtan B5BT ve B3BT modelleri için yapılan analizde elde edilen yük-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 4.39'da görülmektedir. 51.7 mm'de ilk olarak sekiz adet çubukta akma görülmüş ve ardından çekme kapasitesi çubuktan küçük olan bulonlarda akma görülmüştür. Yerdeğiştirme değeri 60.0 mm'de iken dört adet çubuk eleman bulonlarında kopma meydana gelmiş ve sistem 768 kN yük altında göçmüştür (Şekil 4.40).

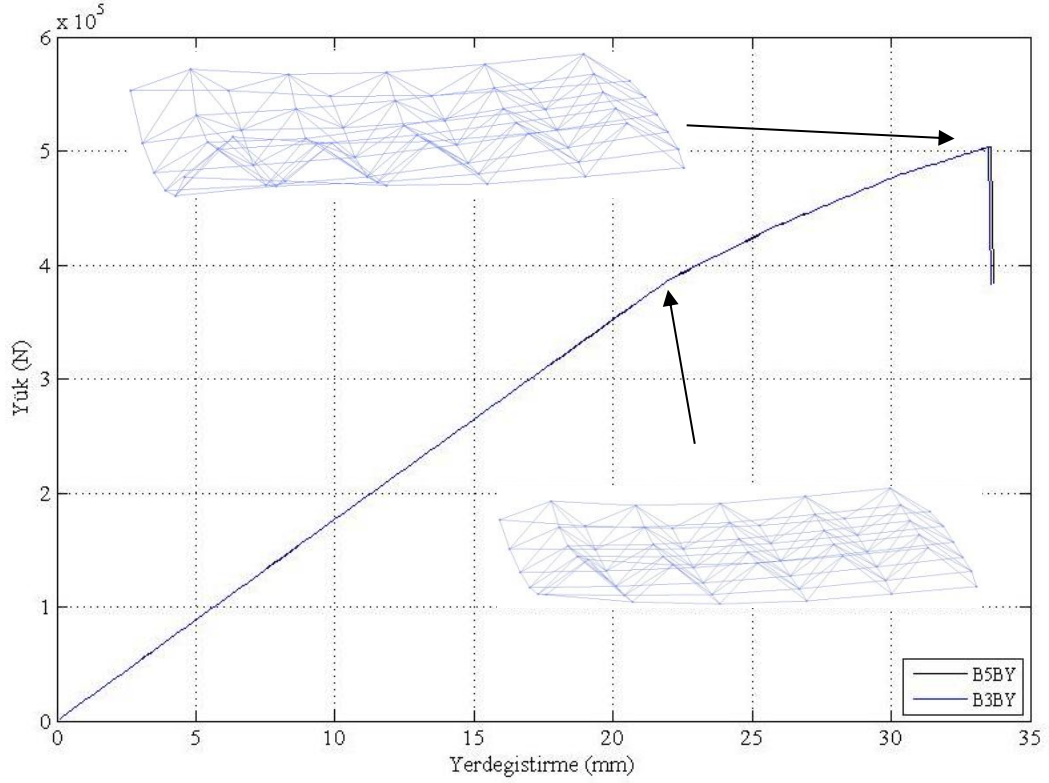


Şekil 4.39 : B5BT ve B3BT durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

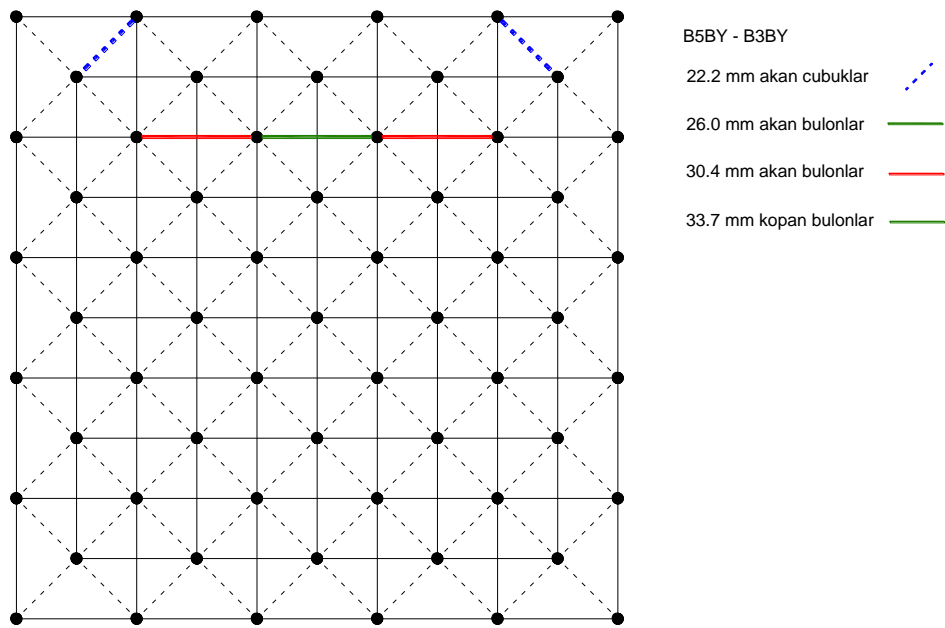


Şekil 4.40 : B5BT ve B3BT durumlarında kritik elemanlar.

Yük-yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.41'de verilen B5BY ve B3BY modelleri, bulonların tanımlı olması ve yarım yükleme durumunu temsil etmektedir. Orta nokta düşey yerdeğiştirmesi 26.0 mm de iken iki çubukta akma görölmeye başlanmış 33.7 mm'ye ulaşıldığında bulonlarda kopma meydana gelmiş ve sistem göçmüştür (Şekil 4.42). Bu durumda istemin taşıma kapasitesi ise 503 kN olarak bulunmuştur.

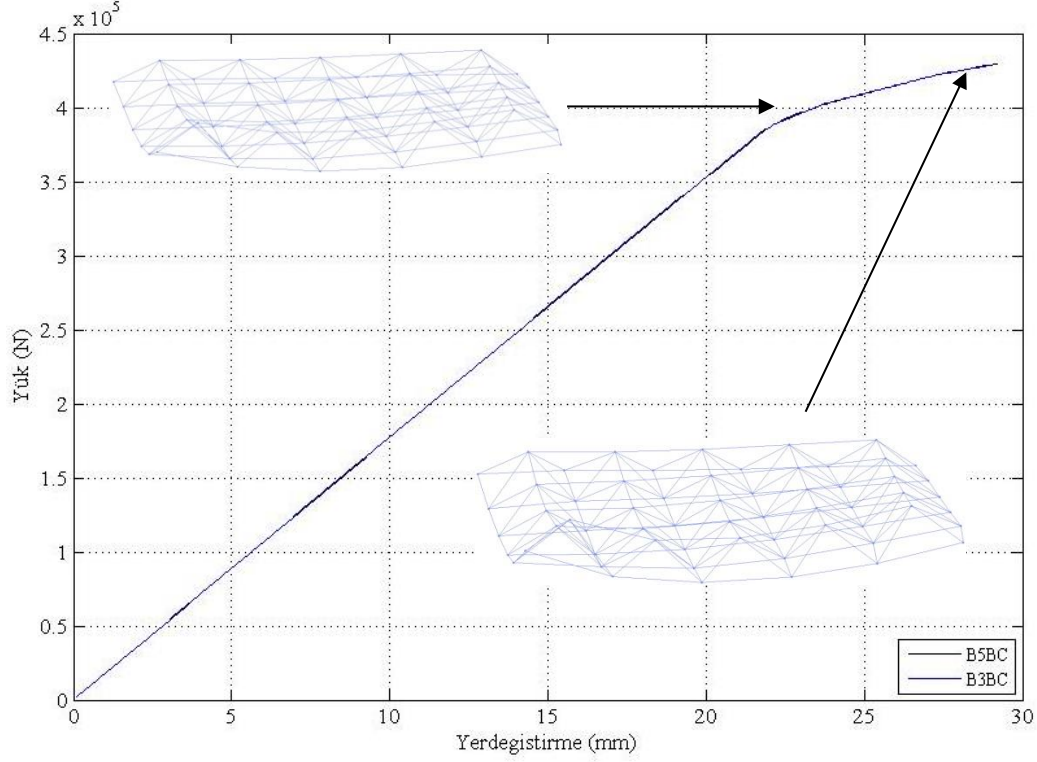


Şekil 4.41 : B5BY ve B3BY durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.

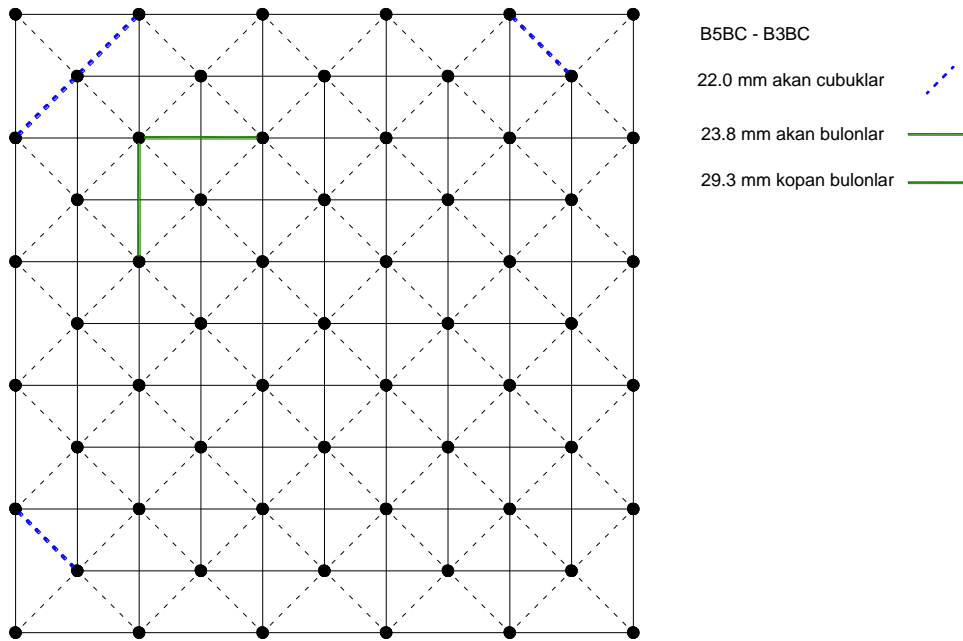


Şekil 4.42 : B5BY ve B3BY durumlarında kritik elemanlar.

Bulonların tanımlı olması ve çeyrek yükleme durumlarının ele alındığı B5BC ve B3BC sistemlerinde 22.0 mm’de akan çubukların olduğu gözlenmiştir. 29.3 mm orta nokta yerdeğiştirme değeri ve 429 kN yük altında bulonların kopmasıyla sistemde göçme meydana gelmiştir. Şekil 4.43’te B5BC ve B3BC durumları için yük-yerdeğiştirme grafiği, Şekil 4.44’te ise kritik çubuklar gösterilmiştir.



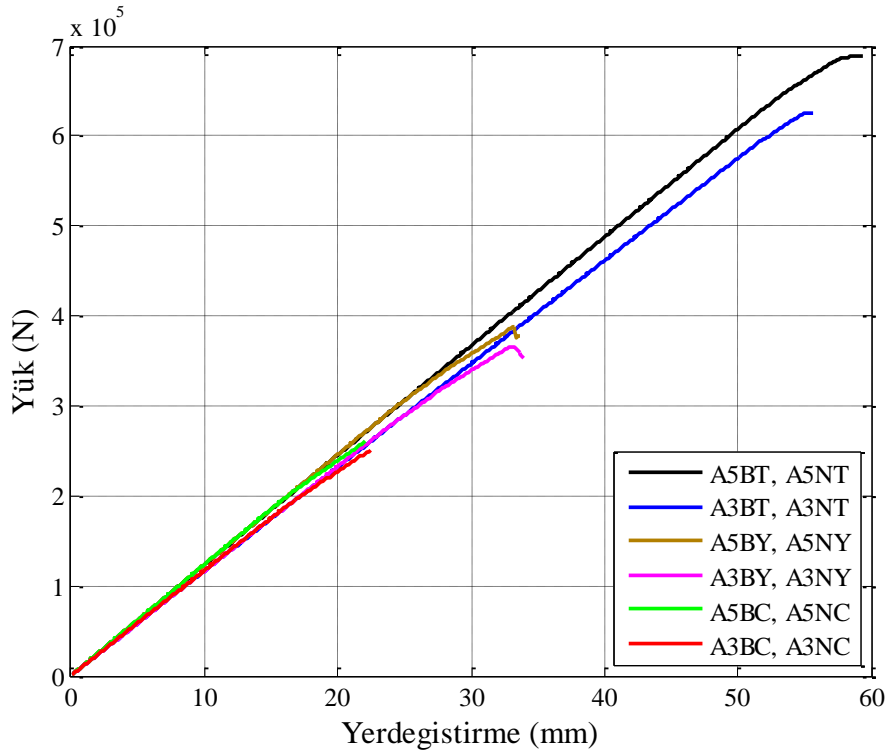
Şekil 4.43 : B5BC ve B3BC durumlarında yük-yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.44 : B5BC ve B3BC durumlarında kritik elemanlar.

4.4. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Optimum çubuk kesitleri kullanılarak boyutlandırılmış Model A sistemi üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 4.45'te verilmiştir. Sistemde basınç çubuklarının burkulması göçme davranışını belirlemektedir. Birçok çubuğun aynı anda burkulmasıyla ani göçme meydana gelmekte ve sünek bir davranış görülememektedir. Ayrıca çubuklarda burkulma davranışı kritik olduğundan, bulonların tanımlı olması durumunun sistem davranışı üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.

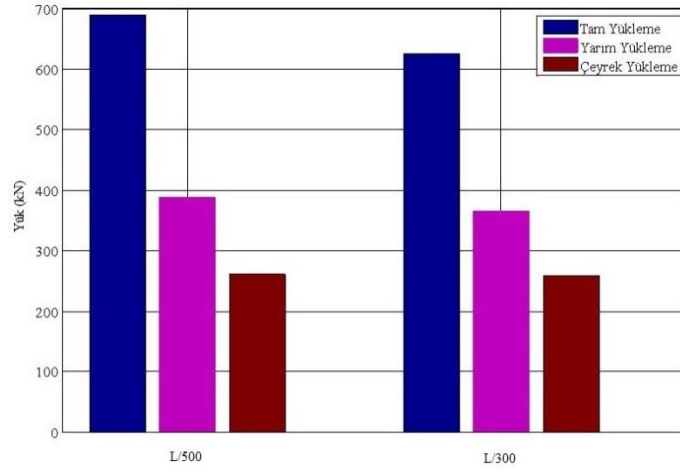


Şekil 4.45 : Tüm durumlar için Model A yük-yerdeğiştirme eğrileri.

Yükleme durumu açısından bakıldığında, çubuk elemanları L/500 başlangıç kusuru oranına sahip sistemde taşıma kapasitesi, yükler çatının yarısında yığıldığında %43 oranında, çeyreğinde yığıldığında %62 oranında azalmaktadır. Çubuk elemanları L/300 başlangıç kusuru oranına sahip sistemde ise taşıma kapasitesi, yükler çatının yarısında yığıldığında %41 oranında, çeyreğinde yığıldığında %60 oranında azalmaktadır.

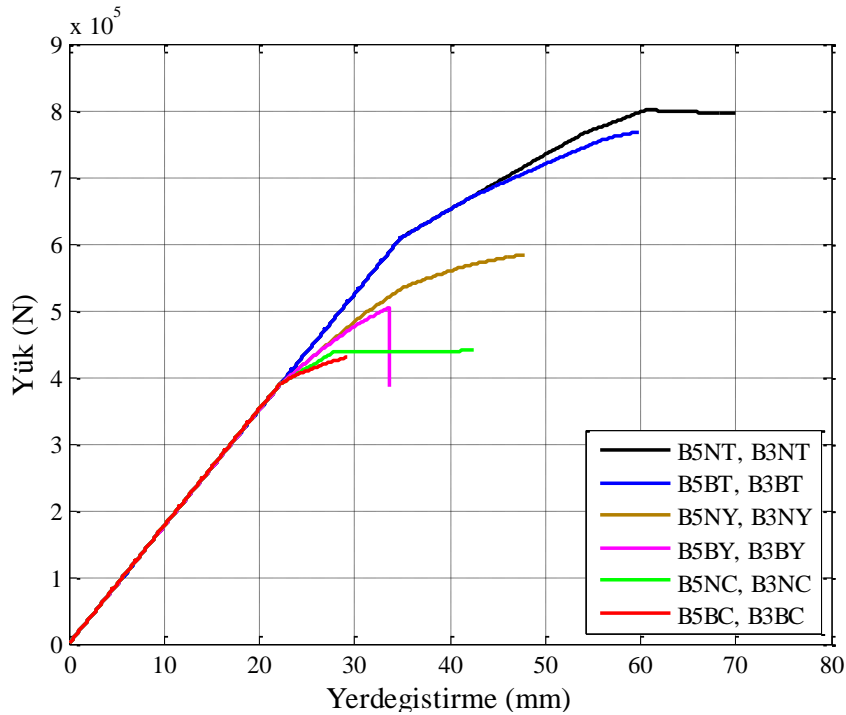
Çubuklardaki başlangıç kusuru oranı açısından karşılaştırıldığında, başlangıç kusuru oranının L/500 yerine L/300 olması taşıma kapasitesini, tam yükleme durumu için

%9, yarım yükleme durumu için %6, çeyrek yükleme durumu için %5 oranında azaltmaktadır. Şekil 4.46’da Model A için taşıma kapasitesi değerleri görülmektedir.



Şekil 4.46 : Model A taşıma kapasitesi değerleri.

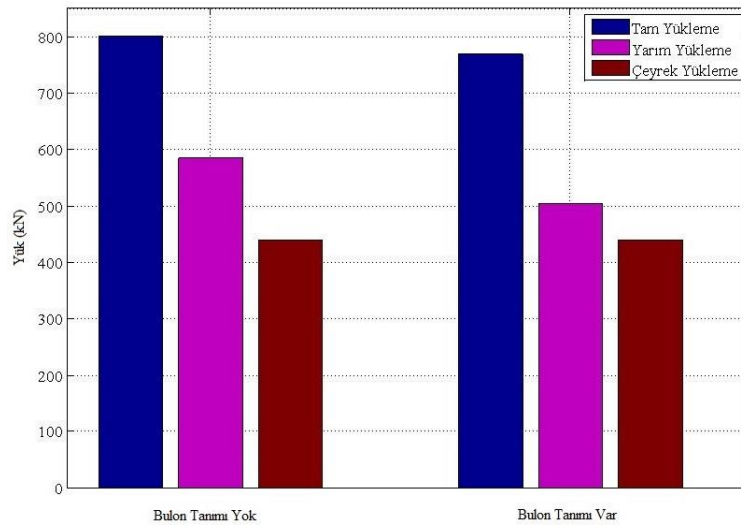
Basınç çubuklarının narinlikleri 80 ile sınırlandırılarak boyutlandırılan Model B üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 4.47’de verilmiştir. Sistemde çekme çubuklarının akması basınç çubuklarının burkulmasından önce meydana gelmektedir, bu sayede sistem bir miktar elastik ötesi davranış yapabilmektedir. Çekme çubuklarının akması sistemde belirleyici olduğundan, izin verilen sınırlar içinde kalmak koşuluyla çubuklardaki başlangıç kusurları sistem davranışını etkilememektedir.



Şekil 4.47 : Tüm durumlar için Model B yük-yerdeğiştirme eğrileri.

Yükleme durumu açısından bakıldığında, bulon etkilerinin dikkate alınmadığı sistemlerde taşıma kapasitesi, yükler çatının yarısında yığıldığında %27 oranında, çeyreğinde yığıldığında %45 oranında azalmaktadır. bulon etkilerinin dikkate alınmadığı sistemlerde ise taşıma kapasitesi, yükler çatının yarısında yığıldığında %35 oranında, çeyreğinde yığıldığında %44 oranında azalmaktadır.

Bulon etkilerinin dikkate alınıp alınmaması açısından karşılaştırıldığında, sistemde kapasitesi bulon tarafından belirlenen elemanların olduğu görülmektedir. Bulon etkilerinin dikkate alındığı sistemlerde bulonların kopmasından dolayı ani göçme meydana gelmektedir. Ayrıca bu durum taşıma kapasitesini, tam yüklenme durumu için %4, yarım yüklenme durumu için %14, çeyrek yüklenme durumu için %23 oranında azaltmaktadır **Şekil 4.48**'de Model B için taşıma kapasitesi değerleri verilmiştir.



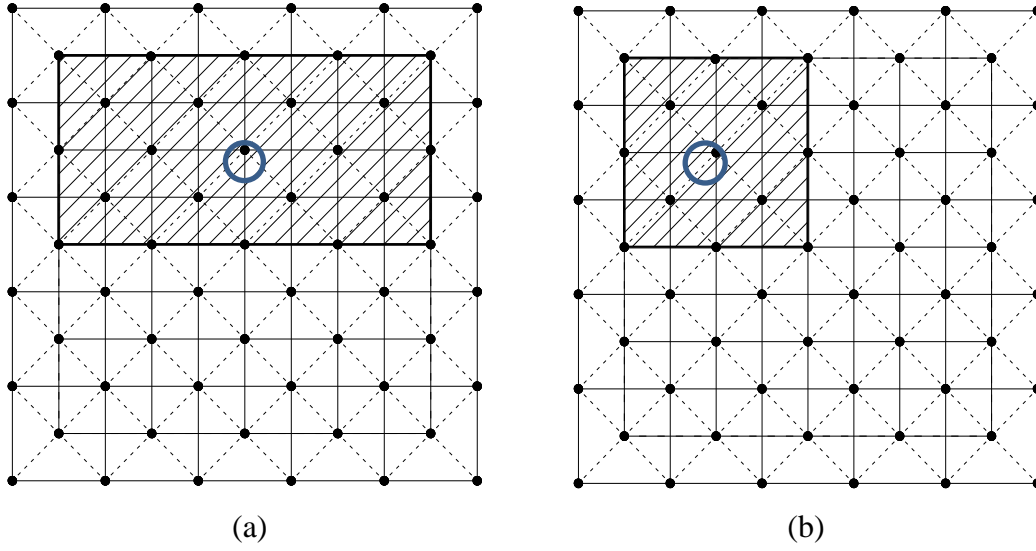
Şekil 4.48 : Model B taşıma kapasitesi değerleri.

4.5. Maksimum Deplasman Yapan Düğüm Noktaları Dikkate Alınarak Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Artan düşey yükler altında gerçekleştirilen itme analizlerinde tüm durumlar için kontrol noktası olarak uzay kafes çatı sisteminin orta noktası dikkate alınmıştır. Bu başlık altında ise analize esas kontrol noktası, o yüklenme durumunda maksimum yerdeğiştirmenin olduğu düğüm noktası olarak belirlenmiştir.

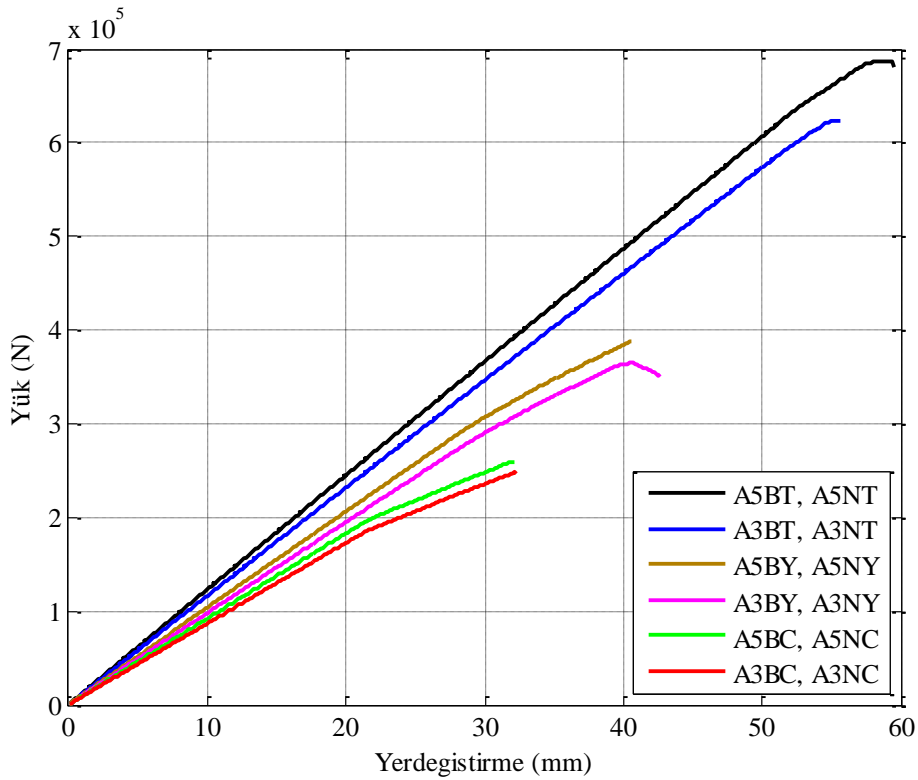
Tam yüklenme durumunda maksimum yerdeğiştirme çatı orta noktasında meydana gelmekte iken, yarım ve çeyrek yüklenme durumlarında yüklenme yapılan alanın orta

noktalarında görülmektedir. Şekil 4.49’da yarım ve çeyrek yükleme durumlarında dikkate alınan kontrol noktaları gösterilmiştir.



Şekil 4.49 : Yükleme durumları için kontrol düğüm noktaları (a) yarım yükleme, (b) çeyrek yükleme.

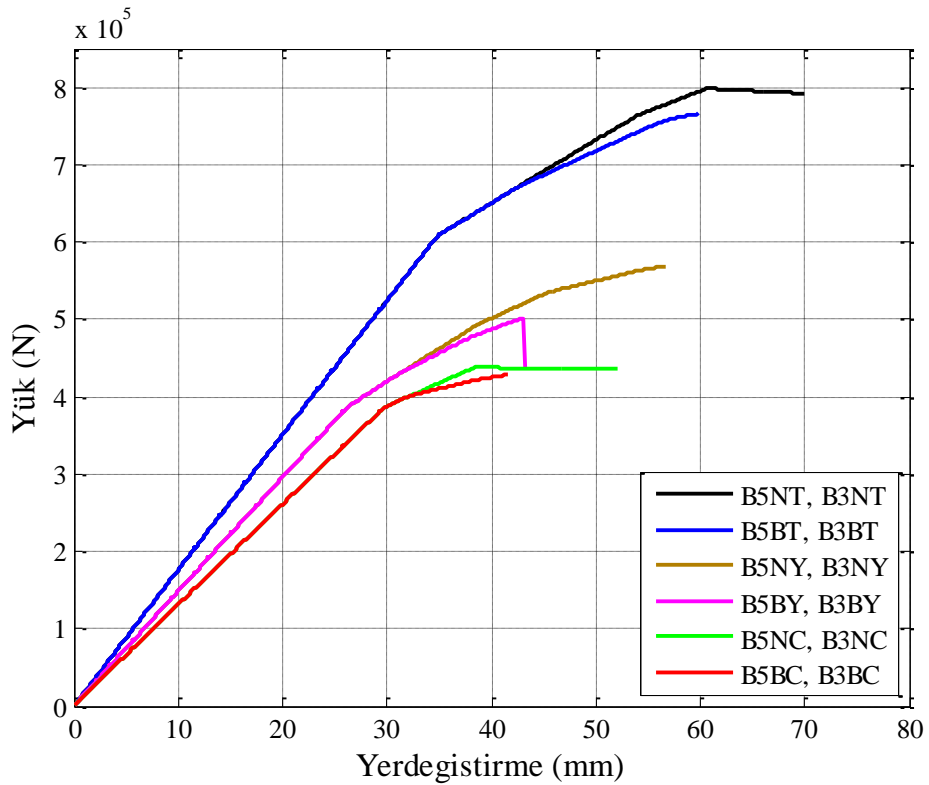
Model A üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 4.50’de gösterilmektedir. Maksimum yerdeğiştirme yapan noktalar dikkate alındığında sistemin taşıma kapasiteleri aynı kalırken, yerdeğiştirme değeri daha fazla olmaktadır.



Şekil 4.50 : Maksimum deplasman yapan düğüm noktalarına göre Model A yük-yerdeğiştirme eğrileri.

Yüklerin sistemin yarısında birikmesi durumunda sistemin kapasitesi yük taşıma kapasitesi yarı yarıya azalmaktadır. Çeyrek yükleme durumunda ise dizayn yükü (248.0 kN) ile aynı seviyede yük taşıyabilme yeteneğine sahiptir.

Şekil 4.51'de Model B üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçlarına yer verilmektedir. Bu modelde de kontrol düğüm noktalarının değiştirilmesi sistem taşıma kapasitesini değiştirmezken, sistemin artan düşey yükler altında yerdeğiştirme değerini arttırmıştır. Sistemin taşıma kapasitesi yarım yüklü olması durumunda, tamamının yüklenmiş olması durumuna göre %75 seviyelerinde kalmaktadır. Yüklerin çatı alanının çeyreğinde yığılması durumunda ise taşıma kapasitesi bir miktar daha düşerek %60 seviyelerine gelmesine rağmen, sistemin dizayn yükünden (267 kN) daha yüksek seviyelerde olmaktadır. Dolayısıyla Model B yüklerin çeyrek alanda yığılması durumunda dahi dizayn yükünden 1.6 kat daha fazla kapasiteye sahip bulunmaktadır.



Şekil 4.51 : Maksimum deplasman yapan düğüm noktalarına göre Model B yük-yerdeğiştirme eğrileri.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada her iki doğrultuda 15'er metre açıklığa ve 5'er modüle sahip uzay kafes sistem, çubukların narinlik değeri, başlangıç kusuru, bulon etkisive yük yığılmaları açısından incelenmiştir.

Başlangıç kusurunun ve bulonların sistem modelleri içinde tanımlı olması durumunun malzeme modelleri içinde hesaba katıldığı analizlerde, yük yığılmaları, çatının tamamının, yarısının ve çeyreğinin dolu olması durumları olarak temsil edilmektedir. Çubuk eleman narinliğinin etkisini incelemek için ise örnek modeldeki çubuk narinlikleri değiştirilerek yeni bir model çatı sistemi oluşturulmuştur.

Çalışmada ele alınan modellerde Model A optimum kesitler kullanılarak boyutlandırılmıştır. Model B ise Model A üzerindeki basınç çubuklarının narinlikleri belirli bir değerle sınırlandırılarak elde edilmiştir.

Her iki uzay kafes çatı sistemi modeli, bulon tanımı, başlangıç kusuru ve yük yığılmalarını kapsayacak şekilde artan düşey yükler altında analiz edilmiştir.

Analizlerden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır;

Model A için;

- Göçme durumunu burkulan çubuklar belirlemektedir. Burkulmanın ani olması ve birçok çubuğun aynı anda burkulmasıysistem, doğrusal olmayan davranış göstermeden ani olarak göçmektedir.
- Başlangıç kusuru oranının yüksek olması çubuk elemanların basınç altında burkulma eğilimini arttırdığından, sistemde de çubukların erken burkulmasına yol açarak yapının taşıma kapasitesini düşürmektedir.
- Burkulmanın etkin olduğu bir göçme meydana geldiğinden sistemde bulonların dikkate alınması herhangi bir etki oluşturmamaktadır.

Model B için;

- Sistemde basınç çubuklarında burkulma meydana gelmeden önce çekme çubuklarında akma başlamaktadır. Dolayısıyla sistemde ani göçme görülmemekte ve sistem bir miktar doğrusal olmayan davranış sergileyebilmektedir.
- Bulonların sistem modelleri içinde tanımlanması durumunda, çekme elemanlarında bulon kopma dayanımı çubuk akma dayanımından küçük olan çubuk-bulon birleşimleri varsa, çubuk akmaya geçmeden bulonda kopma meydana gelmektedir. Bu durum sistemde göçmenin ani olarak gerçekleşmesine ve sistemin taşıma kapasitesinin azalmasına yol açmaktadır.
- Göçmede çekme elemanları belirleyici olduğundan başlangıç kusuru oranı, izin verilen sınırlar içinde kalmak koşuluyla, sistem üzerinde etkili olmamaktadır.

Yük yığılmaları açısından bakıldığında, yüklerin belli bölgelerde yığılması sistem davranışını değiştirmemekte, ancak taşıma kapasitesini büyük ölçüde düşürmektedir. Özellikle burkulmanın etkin olduğu göçme durumunun gözlemlendiği Model A'nın, Model B'ye göre yük yığılmalarına karşı daha hassas olduğu görülmektedir.

Bu değerlendirmelerin yanında uzay kafes sistemlerin tasarımı açısından aşağıdaki önerilerin getirilmesi uygun görülmüştür,

- Uzay kafes sistemlerin dayanımlarında burkulmanın etkin olması, sistemin doğrusal olmayan davranış sergilemesini önleyerek göçmenin ani olarak meydana gelmesini sağlamaktadır. Bu nedenle çubuk elemanlar, basınç etkisinde burkulma görülmeden önce çekme etkisinde akma meydana gelecek şekilde boyutlandırılmalıdır. Çalışma kapsamında ele alınan örnek çatı sistemi modeli için, basınç çubuklarında narinlik oranı 80 ile sınırlandırılarak çekme etkisindeki çubuk elemanların akmaya ulaşması sağlanmıştır.
- Çekme etkisindeki bulonlar boru enkesitli elemanların akma dayanımına ulaşmasından önce kopma dayanımlarına ulaşmamalıdır. Dolayısıyla, bulonların kopma dayanımları, boru enkesitli elemanların akma dayanımından daima büyük olmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Doğan, M., Ünlüoğlu, E. ve Gönen, H.** (2007). Eskişehir’de kar yükünden hasar gören uzay kafes sistemler, 2. *Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 174-189, Eskişehir, Türkiye, 10-11 Mayıs.
- [2] **Tang, W. R.** (1999) . Design of double layer grids, (yüksek lisans tezi), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, M.A., USA.
- [3] **Jadhav, H. S. ve Patil, A. S.** (2013). Parametric study of double layer steel dome with reference to span to height ratio, *International Journal of Science and Research*, **2(8)**, 110–118.
- [4] **Sherman, D. R.** (1976). Application of steel tubing and pipe. American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., USA.
- [5] **OpenSEES**, (1999). The Open System for Earthquake Engineering Simulation, *University of California*, Berkeley, CA, USA.
- [6] **Collins, I. M.** (1981). Collapse analysis of double-layer grids, (doktora tezi), University of Surrey, Guilford, UK.
- [7] **El-Sheikh, A. I., ve McConnel, R. E.** (1993). Experimental study of behavior of composite space trusses, *Journal of Structural Engineering ASCE*, **119(3)**, 747–766, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:3(747)
- [8] **Huybrechts S. ve Tsai, S. W.** (1996). Analysis and behavior of grid structures, *Composites Science and Technology*, **56(9)**, 1001–1015, doi:10.1016/0266-3538(96)00063-2
- [9] **Fülöp, A. ve Iványi, M.** (2004). Experimentally analyzed stability and ductility behaviour of a space-truss roof system, *Thin-Walled Structures*, **42(2)**, 309–320, doi:10.1016/S0263-8231(03)00062-4.
- [10] **Uriz, P., Filippou, F. C. ve Mahin, S. A.** (2008). Model for cyclic inelastic buckling of steel braces, *Journal of Structural Engineering ASCE*, **134(4)**, 619–628, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:4(619)
- [11] **Lee, P. S. ve Noh H. C.** (2010). Inelastic buckling behavior of steel members under reversed cyclic loading, *Engineering Structures*, **32(9)**, 2579–2595, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.04.031.
- [12] **Lan, T.T.** (2005). Space frame structures, *Structural Engineering Handbook* (2nd edition), Boca Raton: CRC Press LLC.
- [13] **Knebel, K., Sanchez-Alvarez, J. ve Zimmerman S.** (t.y.). The structural making of the Eden Domes, Würzburg, Germany.
- [14] **Arekar, V. A. ve Bhavsar, B. B.** (2013). Analytical study of MERO connector in double layer grid structure, *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, **2(2)**, 35–42.

- [15] **Ghasemi, M., Davoodi, M. ve Mostafavian, S. A.** (2010). Tensile stiffness of MERO-Type connector regarding bolt tightness, *Journal of Applied Sciences*, **10(9)**, 724–730, doi: 10.3923/jas.2010.724.730
- [16] **Ramaswamy, G. S., Eekhout, M. ve Suresh, G. R.** (2002). Analysis, design and construction of steel space frames, London: Thomas Telford Publishing
- [17] **SAP2000**, (1995). Structural Analysis Program, *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley, California, USA.
- [18] **TS 648** (1980). Çelik yapıların hesap ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- [19] **ATC-24**, (1992). Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. *Applied Technology Council*, California.
- [20] **Rosen, A., ve Schmit, L. A. Jr.** (1979). Design-oriented analysis of imperfect truss structures-Part I-accurate analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **14(9)**, 1309-1321, doi: 10.1002/nme.1620140905
- [21] **Mazzoni S., McKenna, F., Scott M. H. ve diğ.** (2007). OpenSees command language manual, adres: <http://opensees.berkeley.edu/>
- [22] **FEMA 356** (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, D.C., USA.
- [23] **AISC360-10**, (2010) . Specification for structural steel buildings. *American Institute of Steel Construction*, Chicago, Illinois, USA.
- [24] **MATLAB** (2013). Matrix Laboratory, *The Mathworks Inc.*, Natick, MA,USA.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Haluk Emre ALÇİÇEK

E-Posta : alcicek@itu.edu.tr

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. (2012)