

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK YAPILARIN
AŞAMALI GÖÇME RİSKİNİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

Saffet KILIÇER

ARALIK 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK YAPILARIN
AŞAMALI GÖÇME RİSKİNİN BELİRLENMESİ

Saffet KILIÇER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 / 11 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 22 / 12 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Korhan ÖZGAN

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Zemin-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Yapıların Aşamalı Göçme Riskinin Belirlenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Yükseköğretim dönemi, eğitimim ve çalışmalarım sürecince sabrını, yardımını, deneyimlerini esirgemeyen, teorik ve uygulama alanında engin bilgi ve tecrübelerini her zaman cömertçe paylaştan ve bir hocadan daha fazlası olarak nitelendirebileceğim çok değerli tez danışmanım Yapı Anabilim Dalı Öğretim Üyesi **Prof. Dr. Korhan ÖZGAN**’a,

Doktora eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerini her zaman içtenlikle benimle paylaştan gerek ders döneminde gerekse tez döneminde hayata dair görüşlerini benden esirgemeyen Yapı Anabilim Dalı Öğretim Üyesi sayın **Prof. Dr. Ayşe T. DALOĞLU**’na,

Değerli vakitlerini ayırarak çalışmanın şekillenmesi ve çeşitlenmesinde büyük rol oynayan Mimarlık bölümü Öğretim Üyesi sayın **Doç. Dr. Serbülent VURAL**’a,

Beni bu süreçte gerek akademik gerekse idari olarak her zaman destekleyip cesaretlendirerek çalışmamın devamlılığına katkıda bulunan Yapım Yönetimi Anabilim Dalı Öğretim Üyesi sayın **Prof. Dr. Tayfun DEDE**’ye,

Zorlu süreçlerde farklı tarzı ve yön göstermesiyle ufkumu açan, güler yüzü ve mizahıyla bizleri motive eden Yapım Yönetimi Anabilim Dalı Öğretim Üyesi sayın **Dr. Öğr. Üyesi Hasan Basri BAŞAĞA**’ya,

Bu tez, TÜBİTAK tarafından desteklenen; 118M998 no’lu ‘Yapı-Zemin Etkileşimini Dikkate Alarak Yapıların Aşamalı Göçme Riskinin Belirlenmesi’ adlı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu desteklerinden ötürü **TÜBİTAK**’a teşekkür ederiz.

Araştırma sonucu elde edilen verilerin İnşaat Mühendisliği ve ülkemiz savunma sanayii alanına katkı sağlamasını diliyorum.

Hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve sevgili eşime, en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmayı kızım Beril’e atfetmek istiyorum.

Saffet KILIÇER

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Zemin-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Yapıların Aşamalı Göçme Riskinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Korhan ÖZGAN’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/12/2023

Saffet KILIÇER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Aşamalı Göçme Kavramı	2
1.2. Konu ile İlgili Yapılan Bazı Diğer Çalışmalar	10
1.3. Amerikan Savunma Bakanlığı Stadartı (UFC 4-023-03).....	20
1.4. Alternatif Yol Metodu	25
1.5. Kolon Kaldırma Senaryosu	26
1.6. Analiz Yöntemleri	28
1.6.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi	29
1.6.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi.....	34
1.7. Zemin-Yapı Etkileşim Modelleri	36
1.7.1. Bir Parametrelili Zemin Modelleri	37
1.7.2. İki Parametrelili Zemin Modelleri.....	38
1.7.3. Geliştirilmiş Vlasov Modeli.....	39
1.8. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	41
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER	1
2.1. 6 Katlı Betonarme Konut Binası	44
2.1.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm	47
2.1.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm	50
2.2. 5 Katlı Betonarme Eğitim Binası	65
2.2.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm	73
2.2.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm	75
2.3. 10 Katlı Çelik Konut Binası	82

2.3.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm	86
2.3.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm	91
2.4. 20 Katlı Merkezi Çaprazlı Çelik Ofis Binası	104
2.4.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm	107
2.4.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm	110
3. SONUÇLAR.....	116
4. ÖNERİLER.....	119
5. KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ DİKKATE ALINARAK YAPILARIN AŞAMALI GÖÇME RİSKİNİN BELİRLENMESİ

Saffet KILIÇER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Korhan ÖZGAN
2023, 129 Sayfa

Yapılar hizmet ömrü boyunca tasarım yüklerinden farklı olarak öngörülemeyen yüklere de maruz kalmaktadır. Bazı gelişmiş ülkeler bu gibi etkileri dikkate alarak hazırladıkları rehber ve yönetmelikler ile stratejik öneme sahip yapılar için aşamalı göçme risk analizleri yapmaktadırlar. Ancak diğer birçok ülkelerde henüz aşamalı göçme kavramı yeterince bilinmediğinden bu tür analizler yapılmamakta ve kritik öneme sahip yapılar bu eksiklik ile inşa edilmektedir. Bu tezin amacı zemin özelliklerinin aşamalı göçme üzerindeki etkilerini araştırmak ve farklı zemin tipleri üzerine inşa edildiği düşünülen yapıların davranışını detaylı olarak incelemektir.

Bu amaçla, son yıllarda aşamalı göçme analizlerinde yaygın olarak kullanılan Amerikan Savunma Bakanlığı'nın yayımlamış olduğu UFC 4-023-03 rehberini kullanılarak, betonarme ve çelik yapı örnekleri incelenmiştir. Örnek yapılar zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak Alternatif Yol metodu (APM) ile doğrusal statik analiz (LSP) ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi (NDP) olmak üzere iki farklı yöntemle analiz edilmiştir. Geliştirilmiş Vlasov zemin modeli ile dikkate alınan zemin etkisi, MATLAB dilinde kodlanan bir arayüz yardımı ile SAP2000 ve MATLAB programlarının eş zamanlı kullanılması ile hesaba katılmıştır. Yapılan analizler sonucunda iki analiz modelinde de zemin etkisinin yapı elemanlarının aşamalı göçme direncini önemli ölçüde değiştirebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Aşamalı göçme analizi, UFC 4-023-03, Alternatif Yol metodu, Betonarme yapılar, Çelik yapılar, Geliştirilmiş Vlasov modeli

PhD. Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF THE PROGRESSIVE COLLAPSE RISK OF STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT SOIL STRUCTURE INTERACTION EFFECT

Saffet KILIÇER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Korhan ÖZGAN
2023, 129 Pages

Structures may be exposed to unpredictable loads, different from design loads, throughout their service life. Some developed countries carry out progressive collapse risk analyzes for strategically important structures with the guidelines and regulations they prepare by taking such effects into account. However, in many other countries, since the concept of progressive collapse is not yet known enough, such analyzes cannot be made and critical structures are constructed in the same way as other structures. The aim of this thesis is to investigate the effects of soil properties on progressive collapse and to examine in detail the effects of different soil types on the behavior of structures.

For this purpose, reinforced concrete and steel frame samples were examined using the UFC 4-023-03 guide published by the American Department of Defense, which has been widely used in progressive collapse analyzes in recent years. Sample structures were analyzed by two different methods: linear static analysis (LSP) and non-linear dynamic analysis method (NDP) with the Alternative Path method (APM), taking into account the soil-structure interaction. The soil effect, which was taken into account with Modified Vlasov model, was taken into account by using SAP2000 and MATLAB programs simultaneously with the help of an interface coded in MATLAB. As a result of the analyses, it has been seen that soil effect could significantly change the progressive collapse resistance of the building elements in both analysis models.

Key Words: Progressive collapse analysis, UFC 4-023-03, Alternate Path method, Reinforced concrete structures, Steel structure, Modified Vlasov model

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Ronan Point apartmanı kat planı (Janssens, 2012)	4
Şekil 2. Alfred P. Murrah binası, (a) Patlamanın izometrik görünüşü (Osteraas, 2006), (b)19 Nisan 1915 patlamadan sonra Alfred P. Murrah binası (URL-1)	5
Şekil 3. WTC 1 Kuzey cephesi uçak etki alanı (FEMA, 2002)	6
Şekil 4. Terör saldırısı sonrası Khobar Towers (Shams-AL, 2012)	7
Şekil 5. Aşamalı göçme örneği (URL-2, 2018)	8
Şekil 6. Bir patlama örneği, (a) Tapu Kadastro Genel Müdürlüğüne ait binada meydana gelen doğalgaz patlaması sonucu oluşan yerel göçme, (b) Binanın karşıdan görünüşü (URL-3, 2018).	8
Şekil 7. TBMM, (a) TBMM’de meydana gelen bombalama sonucu oluşan hasar, (b) Binanın karşıdan görünüşü (URL-4, 2018)	9
Şekil 8. Weibull Kiev’de bulunan bir konut (URL-5, 2023)	9
Şekil 9. Önerilen sınır değerlerin şematik görünümü, a) Komşu iki katın her birinde kat alanının %15’ini aşmayan bölgesel hasar, b) Temsili kaldırılan kolon (Eurocode 1, 2006)	22
Şekil 10. Deformasyon ve kuvvet kontrollü davranış (ASCE 41)	26
Şekil 11. Kolon kaldırma şekli ve sınırları	27
Şekil 12. Dış kolon kaldırma konumu	27
Şekil 13. İç kolon kaldırma konumu	28
Şekil 14. Kat planında yük ve yük yerleşimi	33
Şekil 15. A-A kesiti yük ve yük yerleşimi	34
Şekil 16. Moment-plastik dönme ilişkisi	35
Şekil 17. Bir parametrelili zemin modeline göre yer değiştirme durumları, (a) Düzgün olmayan yayılı yük durumunda zeminin yer değiştirmesi, (b) Tekil yük durumunda zeminin yer değiştirmesi, (c) Rijit tabaka ile aktarılan yük altında zeminin yer değiştirmesi, (d) Düzgün yayılı yük altında zeminin yer değiştirmesi	37
Şekil 18. Elastik zemine oturan plak şeması	39
Şekil 19. Zemin-yapı etkileşimine ait akış şeması	40
Şekil 20. Elastik zemine oturan plak örnekleri	41
Şekil 21. 6 katlı betonarme konut binası kolon kaldırma senaryoları	44
Şekil 22. 6 katlı betonarme konut binası giriş kesitleri ve donatı detayları	45
Şekil 23. 6 katlı betonarme konut binası kolon kesitleri ve donatı detayları	46

Şekil 24.	Tanımlanan temel zemin boyutları	47
Şekil 25.	A1 kolonu kaldırma senaryosu için x - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	50
Şekil 26.	A1 kolonu kaldırma senaryosu için y - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	51
Şekil 27.	A1 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x - y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	52
Şekil 28.	A1 kolonunun kaldırılması halinde K101 ve K143 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi.....	53
Şekil 29.	A1 kolonunun kaldırılması halinde K101 ve K143 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi.....	54
Şekil 30.	A4 kolonu kaldırma senaryosu için x - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	55
Şekil 31.	A4 kolonu kaldırma senaryosu için y - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	56
Şekil 32.	A4 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x - y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	56
Şekil 33.	A4 kolonunun kaldırılması halinde K103, K104 ve K158 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi	57
Şekil 34.	C1 kolonu kaldırma senaryosu için x - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	58
Şekil 35.	C1 kolonu kaldırma senaryosu için y - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	58
Şekil 36.	C1 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x - y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	59
Şekil 37.	C1 kolonunun kaldırılması halinde K115, K144 ve K145 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi	60
Şekil 38.	B2 kolonu kaldırma senaryosu için x - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	61
Şekil 39.	B2 kolonu kaldırma senaryosu için y - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	61
Şekil 40.	B2 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x - y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	62
Şekil 41.	B2 kolonunun kaldırılması halinde K108, K109, K148 ve K149 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi.....	62
Şekil 42.	B2 kolonunun kaldırılması halinde K108, K109, K148 ve K149 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi	64
Şekil 43.	Okul binası üç boyutlu İdeCAD modeli	66
Şekil 44.	Okul binası bodrum kat kalıp planı	67
Şekil 45.	Okul binası zemin, birinci, ikinci ve üçüncü kat planları	68

Şekil 46.	Okul binası E4 kolonu yerleşim detayı.....	69
Şekil 47.	Okul binası E4 kolonu kesiti ve donatı detayı	69
Şekil 48.	Okul binası K123-K124 ve K148-K149 kiriş kesiti ve donatı detayı	70
Şekil 49.	Okul binası D4 kolonu yerleşim detayı	70
Şekil 50.	Okul binası K245 kiriş kesiti ve donatı detayı.....	71
Şekil 51.	Okul binası K246 kiriş kesiti ve donatı detayı.....	71
Şekil 52.	Okul binası örneği için tanımlanan temel ve zemin boyutları.....	72
Şekil 53.	E4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	76
Şekil 54.	E4 kolon kaldırma senaryosu için y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	76
Şekil 55.	E4 kolon kaldırma senaryosu için +6.90 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	77
Şekil 56.	E4 kolonunun kaldırılması halinde K123, K124, K148 ve K149 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi.....	77
Şekil 57.	D4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	78
Şekil 58.	D4 kolon kaldırma senaryosu için y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	79
Şekil 59.	D4 kolon kaldırma senaryosu için +10.35 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	79
Şekil 60.	D4 kolonunun kaldırılması halinde K222, K223, K245 ve K246 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi.....	80
Şekil 61.	10 katlı çelik konut binasına ait kalıp planı	82
Şekil 62.	10 katlı çelik yapı 1-1 aksı kesiti	84
Şekil 63.	10 katlı çelik konut binası için kolon kaldırma senaryoları.....	84
Şekil 64.	10 katlı çelik konut binası için kolon kaldırma senaryoları.....	86
Şekil 65.	10 katlı çelik konut binası için atanan yatay yüklerin görünümü.....	91
Şekil 66.	SAP2000 programında çubuk elemanlara dönme serbestliği atanması.....	92
Şekil 67.	10 katlı çelik konut binası mafsallı birleşimlerin görünümü	92
Şekil 68.	Kirişlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması.....	93
Şekil 69.	Ankastre birleşimlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması	93
Şekil 70.	Mafsallı birleşimlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması	94
Şekil 71.	10 katlı çelik konut binası için atanan plastik mafsalların görünüşü.....	94
Şekil 72.	B4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	95

Şekil 73.	B4 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	96
Şekil 74.	B4 kolonunun kaldırılması halinde K116, K117, K126 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi.....	96
Şekil 75.	B4 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	97
Şekil 76.	D2 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	98
Şekil 77.	D2 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	98
Şekil 78.	D2 kolonunun kaldırılması halinde K130 ve K131 kiriş mesnet momentlerinin zamanla değişimi.....	99
Şekil 79.	D2 kolonunun kaldırılması halinde K130 ve K131 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi	99
Şekil 80.	F4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	100
Şekil 81.	F4 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	101
Şekil 82.	F4 kolonunun kaldırılması halinde K120 ve K130 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi.....	101
Şekil 83.	F4 kolonunun kaldırılması halinde K120 kirişi plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi	102
Şekil 84.	20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binasına ait kalıp planı.....	104
Şekil 85.	Kolon ve ana kiriş kesitleri	105
Şekil 86.	20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için kolon kaldırma senaryosu	106
Şekil 87.	20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için tanımlanan temel ve zemin boyutları	107
Şekil 88.	Kirişlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması.....	110
Şekil 89.	Ankastre birleşimlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması	111
Şekil 90.	F3-F4 kolon kaldırma senaryosu y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	112
Şekil 91.	B2-B3 kolon kaldırma senaryosu x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi	113

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Betonarme kirişlerin kabul kriterleri (UFC 4-023-03, Table 4-2).....	31
Tablo 2. Çelik çerçeve bağlantılarının kabul kriterleri (UFC 4-023-03, Table 5-1).....	32
Tablo 3. Çelik yapı kabul kriterleri (ASCE 41-13 Table 9-4)	32
Tablo 4. Doğrusal statik analiz yöntemi için yük aktarım faktörleri	33
Tablo 5. 6 katlı betonarme konut binasına ait geometri ve malzeme özellikleri	45
Tablo 6. G ve G_{LD} döşeme yükleri.....	48
Tablo 7. A1, A4, C1 ve B2 kolonları kaldırma senaryoları m oranlarının zemin cinsi ile değişimi	49
Tablo 8. LSP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)	49
Tablo 9. Doğal titreşim periyotları.....	50
Tablo 10. Aşamalı göçme direncini sağlayan kirişlerin kesit ve donatıları	54
Tablo 11. Aşamalı göçme direncini sağlayan kirişlerin kesit ve donatıları	60
Tablo 12. Aşamalı göçme direncini sağlayan kirişlerin kesit ve donatıları	63
Tablo 13. NDP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)	64
Tablo 14. LSP ve NDP yöntemlerinin karşılaştırılması.....	65
Tablo 15. 5 katlı betonarme eğitim binasına ait geometri ve malzeme özellikleri	66
Tablo 16. m faktör ve beklenen (ortalama) moment dayanımı değerleri.....	73
Tablo 17. Okul binası örneği için hesaplanan G ve G_{LD} döşeme yükleri	73
Tablo 18. E4 ve D4 kolonları kaldırma senaryoları m oranlarının zemin cinsi ile değişimi.....	74
Tablo 19. Düşey yer değiştirme değerleri (cm)	75
Tablo 20. Doğal titreşim periyotları.....	75
Tablo 21. Kaldırılan D4 kolonuna bağlanan kiriş kesitlerinde hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi.....	80
Tablo 22. Okul binası örneğinde kaldırılan kolonların düğüm noktalarında NDP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)	81
Tablo 23. Okul binası yapı örneği için aşamalı göçme güvenliğinin karşılaştırması	81
Tablo 24. 10 katlı çelik konut binasına ait geometri ve malzeme özellikleri	83
Tablo 25. 10 katlı çelik konut binası için hesaplanan G ve G_{LD} döşeme yükleri	88
Tablo 26. B4, D2 ve F4 senaryolarının m oranlarının zemin cinsi ile değişimi	88

Tablo 27.	10 katlı çelik konut binasında kaldırılan kolonların düğüm noktalarında LSP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)	90
Tablo 28.	10 katlı çelik konut binası için elde edilen doğal titreşim periyotları.....	95
Tablo 29.	10 katlı çelik konut binasında kaldırılan kolonların düğüm noktalarında NDP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)	102
Tablo 30.	10 katlı çelik konut binası için aşamalı göçme güvenliğinin karşılaştırması.....	103
Tablo 31.	20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binasına ait geometri ve malzeme özellikleri	105
Tablo 32.	20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için hesaplanan G ve G_{LD} döşeme yükleri.....	108
Tablo 33.	F3-F4 ve B2-B3 kolonları kaldırma senaryoları m oranlarının zemin cinsi ile değişimi	109
Tablo 34.	20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binasında kaldırılan kolonların düğüm noktalarında LSP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm).....	110
Tablo 35.	20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için elde edilen doğal titreşim periyotları.....	111
Tablo 36.	F3-F4 kolon kaldırma senaryosu için mafsallarda hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi.....	113
Tablo 37.	B2-B3 kolon kaldırma senaryosu için mafsallarda hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi.....	114
Tablo 38.	B2-B3 kolon kaldırma senaryosu için mafsallarda hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi.....	114

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_s	: Donatı alanı
$ASCE$	: Amerika İnşaat Mühendisliği Topluluğu
APM	: Alternatif Yol metodu
b_w	: Kiriş genişliği
ELR	: Bölgesel direnç metodu
TF	: Bağ kuvvetleri metodu
d	: Faydalı yükseklik
D	: Ölü yük
D	: Plak eğilme rijitliği
DCR	: Talep kapasite oranı
$Eurocode$	: Avrupa standardı
E_s	: Zemin elastisite modülü
$FEMA$	: Federal Acil Durum Yönetimi Ajansı
G_N	: Doğrusal olmayan dinamik analiz için düşey yük
G_s	: Zemin kayma modülü
GSA	: General Services Administration
H_s	: Zemin derinliği
k	: Zemin yatak katsayısı
L	: Azaltılmış hareketli yük
m	: Oran
$m_{Sınır}$	: Sınır m değeri
M	: Moment
M_p	: Plastik moment
M_y	: Akma momenti
$NBCC$	: Kanada Yapı Yasası Konseyi
$NRCC$	: Kanada Ulusal Araştırma Konseyi
p	: Taban basıncı
S	: Kar yükü
$T_{x,y}$	: Yapının doğal titreşim periyotları

V	: Kesme kuvveti
UFC	: Bileşik Tesisler Kriterleri
Q	: Kuvvet
Q_{CE}	: Dayanım
Q_{UD}	: Deformasyon kontrol durumunda iç kuvvetler
Q_{UDlim}	: Sınır iç kuvvetler
$2t$	: Zemin kayma parametresi
θ_p	: Plastik dönme
$\emptyset$	: Donatı
ϕ	: Malzemeye bağlı dayanım azaltma katsayısı
γ	: Zemin yüzey parametresi
ρ	: Donatı oranı
w	: Düşey yer değiştirme
ν_s	: Zemin poisson oranı
Δ	: Deformasyon

Not: Bu listede verilmeyen bazı semboller çalışmada ilgili oldukları yerlerde açıklanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

Yapılar, genel tasarım ilkeleri gözetilerek, ölü yükler, hareketli yükler, deprem yükleri ve kar yükü gibi ekonomik ömrü boyunca maruz kalabilecekleri yükler altında projelendirilmektedir. Özellikle insan yoğunluğunun ve bina önem derecesinin fazla olduğu hastaneler, okullar, itfaiye binaları, polis merkezleri, askeri yapılar ve kamu binaları, olağandışı durumlar karşısında da hizmet verebilmesi için, daha güvenli inşa edilmektedir. Bu tür yapılar hizmet verdiği süre boyunca projelendirme aşamasında dikkate alınmayan yüklemelere de maruz kalabilirler. Bu tür yüklemelere olağan dışı yüklemeler adı verilmektedir. Olağan dışı yüklemeler, insan hataları, sabotajlar, patlamalar, yangınlar, araç çarpmaları, uçak düşmeleri ve terör saldırısından meydana gelebilmektedir. Bu yüklemelerin ortaya çıkma ihtimali düşük olsa da meydana geldiğinde oluşturduğu etki büyük olabilmektedir. Hem can kaybı hem de ekonomik olarak geniş çaplı etkisi olduğu bilinen bu durumlar, kimi zaman ülke ekonomilerini etkilemekte kimi zaman ise medya aracılığıyla dünya çapında etkileri olabilmektedir.

Tasarım mühendisleri yapıların projelendirilmesinde yönetmelik ve rehberlerin belirlediği kriterleri göz önüne almak zorundadırlar. Ancak, projelendirilme aşamasında dikkate alınan tasarım yükleri haricinde, yapıların şok yüklere (çok kısa zaman diliminde aşırı yükleme) maruz kalma ihtimalleri de olabilmektedir. Bu tür yüklere karşı tasarlanmayan yapılar, benzer yüklemelere maruz kaldıklarında ya tümünden göçmekte ya da kısmi göçmeler ile sonlanan yıkımlara uğramaktadırlar. Bu tür göçme türüne literatürde '*aşamalı göçme*' adı verilmektedir. Bu tür olağan dışı etkiler ile bir ya da birkaç kolonun sistemden eksilmesiyle yapı sistemi tümünden ya da kısmen göçebilmektedir.

Projelendirme esnasında dikkate alınmayan olağan dışı yükler sebebiyle yapının bu etkiler karşısında nasıl davranış göstereceği bilinmemektedir. Oysaki üst yapıların dışarıdan gelen yüklemelere ne şekilde tepki vereceğinin projelendirme aşamasında bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Mevcut ve yeni yapılacak yapıların yeterli dayanıklılık ve sünekliliğe sahip olması, oluşacak hasarın sınırlı kalarak yapının ayakta kalmasını sağlamaktadır. Meydana gelen hasarlar bölgesel olarak sınırlandırmalı ya da başlangıç hasarlarının yapının diğer kısımlarına yayılması engellemelidir. Özetle, önem derecesi yüksek üst yapıların aşamalı göçme direncini artırabilmek için yapının taşıyıcı elemanlarında oluşan iç kuvvetleri

güvenli bir şekilde sistemin geri kalanına doğru ve hızlı bir biçimde aktarabilen tasarımlar gerekir.

Yıllar geçtikçe şehirlerin gelişmesi, ihtiyaçların değişmesi, nüfusun artması ve dikey mimari olgusunun oluşmasıyla, insanoğluna hizmet eden yapılarda mühendislik hizmeti gerekliliği artarak devam etmektedir. Yapıların hesap ve tasarımı günden güne gelişmiş ve çeşitli yıllarda bilimsel gelişmeler ışığında hem yeni yazılı kurallar oluşturulmuş hem de var olan yönetmeliklerde değişikliklere gidilmiştir. 1904 yılında Almanya’da, 2 yıl sonra 1906 senesinde Fransa’da ilk yönetmelikler yayımlanmıştır. Ülkemizde ise 1953 yılından başlamak üzere 1962, 1963, 1969 yıllarında ilk yazılı yapı tasarımı yönetmelikleri yayımlanmış, ilerleyen yıllarda bazı maddelerinde değişikliklere gidilerek yürürlüğe konmuştur. Günümüze kadar birçok değişiklik geçiren yönetmelikler, 2018 yılında son halini alarak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği adıyla Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

Ülkemizde bilinirliği olmayan aşamalı göçme kavramı, Ergüçlü (2013) ‘nın çalışmasıyla farklı bir boyut kazanmış ve bazı aşamalı göçme işlem adımları kullanıcılara sunulmuştur. Sonraki on yılda ise kayda değer bir ilerleme olmamıştır. Bu çalışma ile yönetmelikleri destekleyen analizler ile tasarım mühendislerine projelendirme aşamasında yol gösterici bir rehber sunmak hedeflenmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda üst yapıların zeminden bağımsız olarak modellendiği görülmektedir. Oysaki yapılan birçok çalışma zemin-yapı etkileşiminin yapı davranışını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir (Girgin vd., 2008; Aydemir, 2011; Hamarat, 2012; Kılıçer, 2016).

Stratejik öneme sahip yapıların kısmi ya da tümünden göçmesi ülke ekonomilerinin yanında siyasal ve beşerî hayata da büyük zararlar vermektedir. Sonuçları kamuoyunda etki yaratan bu kavramın zemin etkisi dikkate alınmadan değerlendirilmesi bir eksiklik olarak nitelendirilebilir. Bu nedenle tasarım mühendislerinin aşamalı göçme analizleri hakkında bilgi sahibi olması büyük önem taşımaktadır.

1.1. Aşamalı Göçme Kavramı

Aşamalı Göçme, bir veya birden fazla kolonun kaybı sonucu başlayan zincirleme göçme mekanizmasıdır. Sistemde meydana gelecek ani kolon kaybı üst katlarda ve komşu taşıyıcı elemanlarda büyük gerilme ve yer değiştirmeler meydana getirmektedir. Aniden meydana gelen bu durum karşısında, iç kuvvetlerin taşıyıcı elemanlar arasında hızlı ve doğru

şekilde yeniden dağıtılarak yapının en kısa sürede tekrar dengeye gelmesiyle en az hasarla ayakta kalabilmesi beklenmektedir. Aşamalı göçme kavramı birçok yönetmelikte farklı ancak birbiriyle uyumlu şekilde tanımlanmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekildedir;

ASCE-7’de; ‘bölgesel bir hasarın, elemandan elemana yayılmasıyla yapının tümünün ya da büyük bir kısmının göçmesi’ (ASCE 7-05, 2006),

Birleşik Devletler Savunma Bakanlığı tarafından yayınlanan Binaların Aşamalı Göçmeye Dayanıklı Tasarımı rehberinde; ‘öngörülemez olaylar neticesinde yapının bölgesel hasarlarının elemandan elemana yayılmasıyla başlayan göçme mekanizması’ (UFC 4-023-03, 2009),

Birleşik Devletler Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST)’de; ‘orantısız göçme olarak bilinen aşamalı göçme, başlangıç olayıyla bölgesel olarak başlayan daha sonra elemanlar arası yayılan tüm yapının göçmesi ya da yerel hasarlarla sınırlı kalan bir olay’ (Menchel, 2009),

Eurocode-1’de tam olarak aşamalı göçme ile ilgili bir çıkarımda bulunulmasa da yapı dayanımı kısmında; ‘yapının yangın, patlama, çarpma veya insan hatası gibi olaylara dayanma kabiliyeti’ (Eurocode 1, 2006),

Birleşik Devletler Genel Hizmet İdaresi (GSA)’da ‘Birincil yapısal elemanlarda başlayan ve komşu elemanlara yayılan göçme mekanizması’ (GSA, 2003),

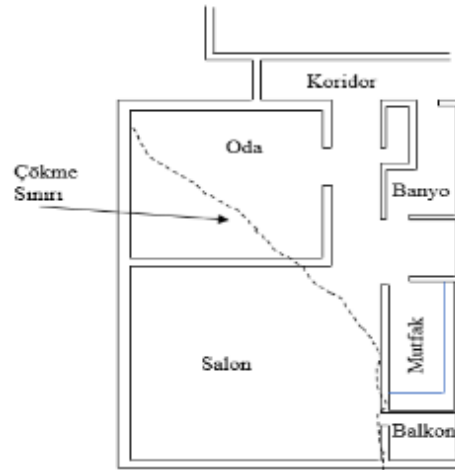
Rusya yönetmeliklerine göre ise ‘taşıyıcı elemanlara verilen hasar nedeniyle yapının bir kısmının ya da tümünün ilk hasar sebebiyle göçmesi’ olarak tanımlanmaktadır (Vasilieva, 2013).

Göçmeyi başlatan sebepler arasında araç çarpmaları, depremler, yangınlar, doğalgaz, tüp ve kazan patlamaları, terör saldırıları, uçak çarpmaları, tasarım hataları ve insan kaynaklı hatalar gösterilebilir.

Aşamalı göçme kavramını literatüre kazandıran olay Ronan Point apartmanında 1968 yılında yaşanan göçmedir. 4 kişinin ölümü ve bir dizi yaralanmayla sonuçlanan olay, tasarımcıların yapı güvenliği kavramına bakış açısını değiştirdiği gibi tasarım kodlarına uygun hükümler getirme çabalarını da hızlandırmıştır. Ronan Point apartmanında meydana gelen bir patlama düşey taşıyıcı elemanın kaybına, yük taşıyıcı duvar elemanların yer değiştirme yapmasına neden olmuştur. Stabilitesini kaybeden elemanlar alt katlara çarparak düşey yönde ilerleyen bir göçmeye yol açmıştır. Bu göçme biçimi araştırmacıların dikkatini çekmiş ve ilk raporlar bu vaka üzerine yoğunlaşmıştır. Griffiths vd. (1968) ile Pearson ve Delatte (2005)’nin yaptığı araştırmalar, ilk hasarın yük taşıyıcı duvarların yanal yüklemeye

karşı sınırlı dirence sahip olmasından kaynaklandığı ve işçilik hatalarının bu göçüşü başlattığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca teknik değerlendirme kriterlerindeki bir dizi güncellemenin ve özellikle büyük panel sistemli konut bloklarının yapısal değerlendirmesinin yapılması için ilgili rehberlerin (Matthews ve Reeves, 2012) olaydan sonra gerekli olduğu düşünülmüştür. Bu inşaat şeklinin dayanıksızlığı ile ilgili soruları ortaya çıkaran kısmi aşamalı göçme literatüre girmiştir (Confidential Reporting on Structural Safety, 2010).

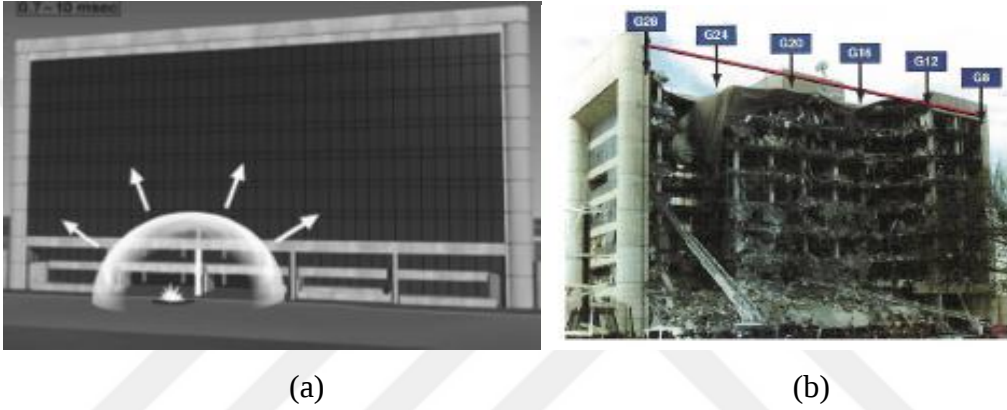
Ronan Point apartmanı 1948'de Danimarka'da ortaya çıkan sanayileşmiş bir yapı metodu olan Larson Nielson sistemi (LNS) kullanılarak inşa edilmiştir. LNS hem ihtiyaç duyulan işgücünü azaltması hem de kaliteyi artırması sebebiyle seçilmiştir (Janssens, 2012). Apartman 64 m yüksekliğinde ve kat alanı $18.3 \text{ m} \times 24.4 \text{ m}$ 'dir. Patlamaya sebep olan gaz borusunun neden olduğu ve göçüşü başlatan yapısal elemanların göçme sınırı Şekil 1'de görülmektedir. Patlamanın etkisiyle göçen duvarları takiben, salon ve odanın bir kısmı koparak kattan ayrılmıştır. Aşamalı göçme kavramını literatüre kazandıran bu vakadan sonra bu tür göçmeler için önleyici tedbirlere yönelik araştırmalar artmış ve ilk aşamalı göçme hükümleri tasarım standartlarına dâhil edilmeye başlanmıştır.



Şekil 1. Ronan Point apartmanı kat planı (Janssens, 2012)

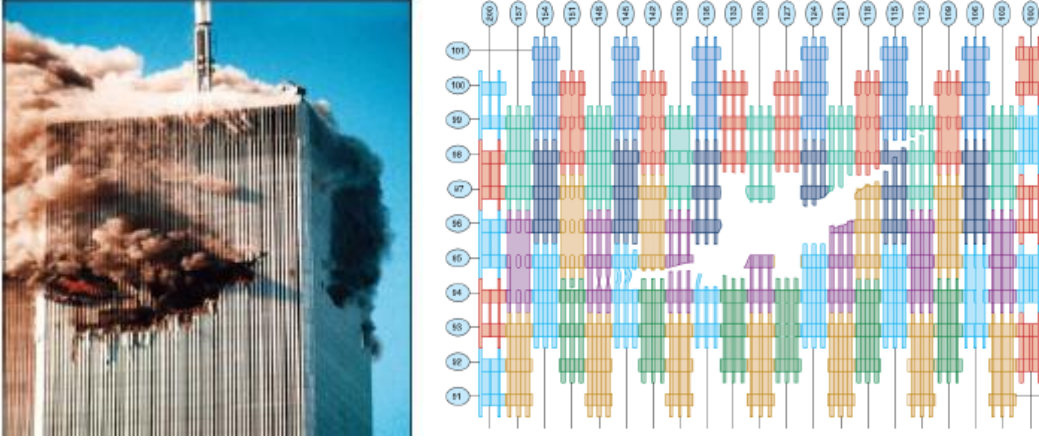
Oklahoma'da bulunan ve 1970 yılında 9 katlı betonarme perdeli olarak inşa edilen Alfred P. Murrah binasının 19 Nisan 1995 tarihinde terör saldırısında bombalanması aşamalı göçme kavramını tekrar gündeme getirmiştir. Binaya, madencilikte ve inşaat sektöründe kullanılan bir patlayıcı türü olan 1815 kg ANFO (Amonyum nitrat-Fuel oil) ile yüklü bir araçla 5 metre mesafeden saldırılmıştır. Önce yapının G20 kolonu yıkılmış, daha sonra

aşamalı olarak G16 ve G24 kolonları taşıma gücünü kaybetmiştir. Aşamalı göçme, yapının orta kolonları yıkılıncaya kadar devam etmiştir (Şekil 2). Saldırı sonrası 19'u 6 yaşının altında 168 kişi hayatını kaybederken 500'den fazla kişi yaralanmıştır. Corley vd. (1998) yaptıkları incelemelerde betonarme yapının donatılarında, taban kolonlarında ve kirişlerinde süreksizlik olması nedeniyle aşamalı göçme gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Aşamalı göçme direncini artırmak için yapının kütlesi ve dayanımının artırılması önerisinde bulunmuşlardır. Ayrıca Birleşik Devletler'de yeni yapılacak federal binalarda özel moment çerçevesi sistemler kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.



Şekil 2. Alfred P. Murrah binası, (a) Patlamanın izometrik görünüşü (Osteraas, 2006), (b) 19 Nisan 1995 patlamadan sonra Alfred P. Murrah binası (URL-1)

11 Eylül 2001'de Birleşik Devletlere ait 2 tarifeli uçak terör saldırısında kullanılmak üzere kaçırılmıştır. American Airlines'a ait ilk uçak 8.46'da WTC 1 (World Trade Center)'in kuzey yüzüne, 94 ile 98. katlar arasına, saatte 708 km/h hızla çarpmıştır (Şekil 3). 16 dakika sonra, WTC 2'nin güney yüzüne United Airlines'a ait ikinci bir uçak çarpmıştır. Önemli yapısal hasarlara neden olan çarpışma sonucu yoğun olarak yangın başladı. WTC 2 çarpmadan yaklaşık 56 dakika sonra göçmüştür. Bu sırada WTC 1 de ilk çarpışmayı takiben 1 saat 43 dakika ayakta kalmaya devam etmiştir.



Şekil 3. WTC 1 Kuzey cephesi uçak etki alanı (FEMA, 2002)

İkiz kulelerin göçmesi, 3000'den fazla insanın ölümüne ve aynı zamanda yakındaki binalara da büyük zarar vermesine neden olmuştur (Dusenberry vd., 2004). Dünya Ticaret Merkezi (WTC) kulelerinin teröre bağlı göçmesinden itibaren aşamalı göçmeye olan ilgi en üst seviyesine ulaşmıştır.

Ronan Point apartmanı, Alfred P. Murrah binası ve WTC kulelerinde meydana gelen göçmeler aşamalı göçme tarihçesinin dönüm noktalarıdır. Bu göçmeler, aşamalı göçme kavramının nadir gerçekleşen bir olayda olsa meydana geldiğinde etkisinin ve algısının büyük olduğunu göstermiştir. Siyasi, ekonomik, güvenlik ve askeri açılardan kısa ve uzun vadede büyük etkileri olmuştur. Ancak aşamalı göçme kavramı sadece terör saldırılarında meydana gelmemektedir. Yangın, kasırga, deprem, işçilik ile imalat hataları ve Ronan Point apartmanında da olduğu gibi özellikle doğalgaz patlamalarında da karşımıza çıkabilmektedir. Son yıllarda hem ülkemizde hem de dünya çapında farklı örnekler ile karşılaşılmaktadır.

25 Ocak 1971'de, 16 katlı bir apartmanın üçte ikisi 2000 Commonwealth bulvarında (Boston, Massachusetts) inşa edilirken yıkılmıştır. Çatıdaki bir arızadan sonra bodruma kadar ilerleyen bir göçme tetiklenmiş, olay neticesinde dört işçi hayatını kaybetmiştir. Göçmenin yavaş gerçekleşmesi diğer işçilerin hayatta kalmasını sağlamıştır. King ve Delatte (2004), Boston yetkililerinin 1971 yılında hazırladığı raporu incelemişler ve 2 benzer vaka ile karşılaştırarak raporu genişletmişlerdir. Bu raporda yer alan hususlardan bazıları; betonun soğuk havalara karşı yeterince korumaya alınmadığı ve donatıların doğru yerleştirilmediği, projenin mevcut şartnamelere tam olarak uygun olmadığı, göçme anında inşaatta 130 işçi

olmasına rağmen yetkin bir mimar olmadığı ve bu nedenlerle döşemelerde zımbalama olayının gerçekleşerek binanın en üst katından başlayan aşamalı bir göçüşün başladığıdır.

25 Haziran 1996'da ABD Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlı Khobar Towers'a (Dhahran, Suudi Arabistan) düzenlenen terör saldırısında, yaklaşık 2268 kg patlayıcı madde ile dolu bir tanker kullanılmıştır. 32 km uzaktan duyulan patlamada 26 metre genişliğinde ve 10.6 metre derinliğinde bir krater meydana gelmiştir. 19 ABD'li çalışanın öldüğü ve yaklaşık 500 kişinin yaralandığı terör saldırısında yapının ön kısmında bölgesel göçmeler meydana gelmiş ve yapının kullanılamaz hale geldiği rapor edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Terör saldırısı sonrası Khobar Towers (Shams-AL, 2012)

16 Şubat 2016 tarihinde Yaroslavl kentinde (Moskova, Rusya) 5 katlı binada 7 kişinin ölümüyle sonuçlanan doğalgaz patlaması gerçekleşmiştir. Patlamanın etkisiyle binanın bir kısmı göçmüştür (Şekil 5). Ayrıca yine Rusya'da 2012'de 9 katlı binanın bölgesel göçmesiyle 10 kişi, 2014'de Sibirya'da askeri bir yapının yenilenmesi esnasında işçilik hataları sebebiyle oluşan göçme nedeniyle 23 Rus askeri hayatını kaybetmiştir. Günümüzde özellikle Rus bloğu ülkelerde doğalgaz patlaması nedeniyle aşamalı göçme vakalarına daha sık rastlanmaktadır.



Şekil 5. Aşamalı göçme örneği (URL-2, 2018)

Ülkemiz 'de 17 Ocak 2017'de Ankara'nın Çankaya ilçesinde Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü'ne ait binada doğalgaz sıkışması nedeniyle meydana gelen patlamada binanın köşe kolonları patlama esnasında taşıma gücünü yitirerek hasar görmüş ve bu olay bölgesel göçük ile sonuçlanmıştır (Şekil 6).



(a)

(b)

Şekil 6. Bir patlama örneği, (a) Tapu Kadastro Genel Müdürlüğüne ait binada meydana gelen doğalgaz patlaması sonucu oluşan yerel göçme, (b) Binanın karşıdan görünüşü (URL-3, 2018).

15 Temmuz 2016'da ülkemizde yaşanan darbe girişimi esnasında Türkiye Büyük Millet Meclisi'ne (TBMM) uçakla yapılan bombalı saldırıda kolonlar arası mesafelerin az olması sebebiyle yapı aşamalı göçme direncini koruyabilmiş ve kısmi göçme bile yaşanmamıştır (Şekil 7).



Şekil 7. TBMM, (a) TBMM’de meydana gelen bombalama sonucu oluşan hasar, (b) Binanın karşıdan görünüşü (URL-4, 2018)

Ukrayna-Rusya savaşında Rus füzesinin başkent Kiev’de bulunan 26 katlı bir binaya isabet etmesi sonucu yapının 16 ile 21’nci katlar arasında bazı mahaller yok olmuştur (Şekil 8). Herhangi bir can kaybı yaşanmayan olayda yapıdaki tüm yaşayan bireyler güvenli tahliye edilmiştir. Yapının bu olay özelinde aşamalı göçmeye dirençli olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Weibull Kiev’de bulunan bir konut (URL-5, 2023)

Farklı nedenlerle aşamalı göçmeye uğramış bina örnekleri artırılabilir. Yukarı da verilen örneklerde genelde yapılarda taşıyıcı sistem kaybını takiben yüklerin sisteme yeniden dağıtılamaması nedeniyle göçmeler yaşandığı görülmektedir. Bu tip vakalarla çok

sık karşılaşılmaya da etkisi dünya kamuoyunda fazla olmaktadır. Bu nedenle terör grupları saldırılarında önemli binaları hedef almaktadır. Son yıllarda meydana gelen aşamalı göçme olayları göstermiştir ki, iyi tasarlanmış ve sağlam modern binaların da aşamalı göçmeye karşı dayanıklı olabileceğini göstermiştir (Song, 2010).

1.2. Konu ile İlgili Yapılan Bazı Diğer Çalışmalar

Aşamalı göçme kavramı, 1960'larda ilgi uyandırmaya başlamışsa da 2000'li yıllara kadar hem yönetmelik oluşturmada hem de bilimsel araştırmalarda kayda değer çalışmalar yapılmamıştır. Ancak 11 Eylül 2001'de Boeing 767 jetlerinin Dünya Ticaret Merkezlerine (WTC) ve Pentagon'a yaptıkları terör saldırıları sonucu yapı davranışı araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu sansasyonel eylem neticesinde ülkelerin kendi yönetmeliklerini oluşturma istekleri ivme kazanmıştır. Bu nedenle literatür çalışmalarını 2000'li yıllar öncesi ve 2000'ler sonrası olarak 2 grupta incelemek daha doğru olacaktır.

1960 ile 2000 yıllar arasını kapsayan ve aşamalı göçme kavramının literatüre girdiği çalışmalar şu şekilde özetlenebilir;

Griffiths vd. (1968), Ronan Point apartmanında yaşanan gaz patlaması neticesinde başlayan zincirleme göçme mekanizması ile ilgili ön rapor yazmışlardır. Raporlarında birleşim bölgelerinde işçilik hatasından dolayı göçme kısmen kötü işçiliğe bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Ancak rapordan sonra yapı tasarımı yapılırken uyulacak yönetmeliklere taşıyıcı elemanların 34 kN/m^2 (4.9 psi) yanal basınca dayanabilmesi kuralı eklenmiştir.

Ferahian (1972), İngiliz ve Kanada kodlarındaki ilk aşamalı göçmeyi önleyici tedbirlerde yapılan değişiklikleri incelemiştir. Yazar, depremler için tasarlanan bir binanın, taşıyıcı elemanlarından birisinin kaybindan sonra aşamalı göçmeye direnmesinin mümkün olabileceğini öne sürmüştür. Yapının dayanımını arttırmak ve yapısal bütünlüğü artırmak için elemanlar arasındaki süneklik ve sürekliliğin sağlanması gerektiği sonucuna varmıştır.

Lewicki ve Olesen (1974), yük taşıma kapasitesi kaybolduktan sonra aşamalı göçmeye direnecek bir bina tasarlamının mümkün olmasına rağmen, bölgesel hasarların meydana gelmesini önlemenin ekonomik olarak uygulanabilir olmadığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, mevcut bilgi ile binanın ekonomik olarak karşı koyacağı yerel bir hatanın büyüklüğünü tanımlamanın mümkün olmadığı sonucuna varmışlar ve daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu açıklamışlardır.

Breen (1975), eleman kaybını dikkate alarak, aşamalı göçme üzerine yaptığı araştırmada doğrudan ve dolaylı tasarım arasında bir ayrım yapmıştır. Dolaylı tasarım, aşamalı göçmeye karşı dolaylı bir direnç düşüncesini içerirken, doğrudan tasarım ise aşamalı göçmeye karşı basit yaklaşımlarla bir direnç içerebileceğini öne sürmüştür.

Leyendecker ve Elingwood (1977), aşamalı göçmeyi önlemek için çeşitli rehberler kullanarak üç yöntem önerdiler. Bunlardan ilki, yapı sistemini etkileyecek olağan dışı yüklemeleri önleyen olayın kontrol yöntemidir. İkincisi, yapının minimum dayanıma ve sünekliğe sahip olacak şekilde tasarlandığı dolaylı tasarım yöntemidir. Son olarak da yapısal elemanların anormal yüklemeye karşı koyabilmeleri için yeterince dayanıklı yapıldığı veya yapının eleman kaybettiğinde taşıma kapasitesini telafi edebilecek şekilde tasarlandığı durum olan direkt tasarım yöntemini önermişlerdir.

Ellingwood ve Leyendecker (1978), aşamalı göçmede ilk riski azaltmak ve meydana gelen hasar miktarını kontrol altına alabilmek için tasarım stratejileri sunulmuşlar ve bunların nispi avantajlarını karşılamışlardır. Hasara uğrayan bir yapı tarafından taşınacak olan azaltılmış yükler için tasarım kriterlerine yer verilmişlerdir.

Arora vd. (1980), hasar toleransının optimum tasarımı için bir metodoloji önermişlerdir. Hasar durumunu, seçilen elemanların veya yapının bölümlerinin tamamen veya kısmen çıkarılması olarak tanımlamışlardır. Başarısız güvenli optimizasyon algoritması, bir 3-D uzay kafes benzeri yapı olarak modellenen bir helikopterin kuyruk patlaması için test etmişlerdir. Özellikle, optimizasyon algoritmaları, yapının toplam kütleini en aza indirmek için noktasal yer değiştirme, eleman göçmesi ve doğal frekans üzerindeki kısıtlamalar ile geliştirmişlerdir. Sonuç olarak hasara maruz kalmadan optimize edilen bir yapının, daha sonra herhangi bir hasar meydana gelmesi durumunda genellikle felakete yol açmayacağını ve hasar toleranslı bir tasarım hedefine ulaşmak için tasarımda önemli bir değişikliğin gerekli olduğunu göstermişlerdir.

Gross ve McGuire (1983), analiz programı kullanarak yapının bir kısmını taşıyan kolonunun kaybıyla başlayan ve yapının geri kalanına yayılan zincirleme göçme mekanizmasını birkaç örnek yapı üzerinde karakterize ederek yapıların aşamalı göçme direncini belirlemeye çalışmışlardır.

McConnel ve Kelly (1983), depo olarak düşündükleri çerçeve sistemi aşamalı göçme yaklaşımıyla incelemişlerdir. Ayrıca çerçeve sistemin göçme esnasındaki geometrik değişimi ve iç kuvvetlerde oluşan farklılıkları bilgisayar programı aracılığıyla da izlemişlerdir. Yapının göçme mekanizmasını anlayabilmek için deneysel sonuçları da

incelemişlerdir. Sonuç olarak, göçmenin yaşandığı bölgede yapının rijit cisim olarak döndüğünü bunun da hasar görmemiş sağlam kısımlarda göçmeyi başlatabileceği sonucuna varmışlardır.

Casciati ve Farvelli (1984), sismik yüklere maruz kalan yapısal sistemlerin aşamalı göçmeye karşı direncini araştırmışlardır. Yapı sisteminin, bir bölümünde meydana gelen taşıyıcı eleman kaybı sonrası önceden belirlenmiş ve ortaya çıkması muhtemel büyük bir yer değiştirme için sınır değerler hedef koyarak analiz sonucu meydana gelen yer değiştirmeye göre başarısızlık olarak nitelenen göçme meydana gelip gelmediğini incelemişlerdir.

Pretlove (1986), dinamik etkilere maruz bir yapının statik yükleri yeniden dağıtmada güvenli olduğu gözükse bile artçı dinamik etkileri de hesaba kattığında yapının güvensiz olduğu sonucuna varmıştır.

Pretlove vd. (1991), yaptıkları deneysel çalışmalarda yapı sisteminde meydana gelebilecek beklenmedik yüklemeler neticesinde hasara uğrayan taşıyıcı elemanların sistemden nasıl yok oldukları ve sistemin tekrar dengeye gelme çabasında iken henüz hasar oluşmamış taşıyıcı elemanlarda meydana gelebilecek yeni çatlaklarının dağılımını gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda yapıların statik olarak güvenli olsa da dinamik açıdan güvenli olmayacağı sonucuna varmışlardır.

Malla ve Nalluri (1995), uzay kafes sistemlerin dinamik etkiler altında kaybettiği taşıyıcı bir elemanın sisteme olan etkisini belirleyebilmek için 2 tip eleman kaybını dikkate alan bir yöntem önermişlerdir. Bunlardan ilki bir elemanın aniden gevrek kırılarak taşıyıcı özelliğini kaybetmesi diğeri ise zamanla elemanın burkulma ya da kopmasıyla yük taşıyamaz hale gelmesidir. 3 boyutlu çatı kafes sistemi analiz ederek sonuçları dinamik etki altındaki sistemde meydana gelen deformasyon ve gerilme yönünden değerlendirmişlerdir.

Abedi ve Parke (1996), kubbeler üzerinde yaptıkları araştırmada sayısal örnekler kullanarak kubbelerdeki dinamik yayılımın elemandan elemana geçişi incelemişlerdir. Sonlu eleman yöntemi kullandıkları çalışmalarında yükleme koşulları için de öneride bulunmuşlardır. Çalışmanın sonucunda yapının aşamalı göçme ihtimallerini incelemişlerdir.

Gilmour ve Viridi (1998), aşamalı göçme davranışına sebep olan olağan dışı yüklemelere dikkat çekmişler ve yapıyı göçmeye götüren bu yüklemeler altında betonarme çerçeve sistemi tam otomatik olmayan bilgisayar programı aracılığıyla tasarlamışlardır. İki örnek ile açıklamaya çalıştıkları aşamalı göçme kavramı için sonlu elemanlar metodu ve sınır değer metodu kullanmışlardır. Çalışmanın sonunda aşamalı göçme ile ilgili daha doğru

sonuçlar için daha fazla doğrusal olmayan u boyutlu dinamik çalışmanın yapılması gerekliliğine vurgu yapmışlardır.

Hinman (1998), sivil hedeflere yönelen terörist faaliyetlerin artması sebebiyle çevresel patlamaya maruz kalan sivil yapılar için tasarım yaklaşımı sunmuştur. Ele aldığı konular arasında tehdit senaryoları, karşı önlemler, silah etkileri, analitik teknikler ve kullanılan optimizasyon teknikleri vardır.

2000 yılından sonrasını kapsayan ve aşamalı göçme kavramına olan ilginin arttığı literatür çalışmaları şu şekilde özetlenebilir;

Astaneh-asl vd. (2002), bir kolonun çıkarılması durumunda aşamalı göçmeye direnmek için tipik bir elik profillerden oluşan ereve yapının gücünü araştırmışlardır. alışmalarında laboratuvarda hazırlanan 60ft boyunda 20ft eninde (yaklaşık 18×6m) tek katlı elik yapı kullanmışlardır. Geniş başlıklı profilleri kiriş ve kolon olarak kullandıkları çalışmalarında orta kolonun kaldırılmasıyla yükün diğer kolonlara nasıl aktarıldığını araştırmışlardır. Ayrıca kaldırılan kolonun etrafında gerilme yığılmaları sebebiyle ilk çatlakları gözlemişlerdir.

Mlakar vd. (2003), 2001 yılında meydana gelen ikiz kuleler ve Pentagon saldırılarında aşamalı göçmeyi önlemek için ilerleyen zamanlardaki tasarım ve araştırma ihtiyaçlarına yönelik tavsiyelerde bulundukları bir çalışma hazırlamışlardır. Yaptıkları araştırmalar neticesinde zemindeki kolonlarda fazla hasar tespit etmemişlerdir. Uçağın çarptığı bölgenin st katlarının da aniden gmediğinin farkına varmışlardır. Bunun sebebi olarak da kiriş ereve sisteminin yükü yeniden dağıtılabildiği, kolonlar arasındaki kısa açıklıklar olması ve kiriş alt takviyesinin bulunması, projelendirme aşamasında tasarım yüklerinin fazla alınması, spiral takviyeli kolonların kapasitesi, çift işlev yapan dış duvarların yapıyı daha uzun süre ayakta tuttuğunu aktarmışlardır. Yazarlar, aşırı kolon deformasyonlarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi ve aşırı etkilere dayanma yeteneği gibi aşamalı göçme alanı ile ilgili konulardaki araştırma ihtiyaını da vurgulamışlardır.

Astaneh-asl (2003), elik kablo tabanlı bir sistemin binaların aşamalı olarak göçmesini önlemek için ve uygulanabilirliğini araştırmak için tek katlı binanın tam ölçekli örneğini laboratuvar ortamında modellenmiştir. Sistemin bir tarafını, yeni yapıyı temsil eden elik kablolarla sahip bölüm, diğer tarafı ise mevcut binaların güçlendirilmesi için dışarıdan kablolar yerleştirildiği ikincil bölüm olarak varsaymıştır. Testler ve ilgili analizler, sistemin bir araç ile yapılan bombalı saldırı ve dış kolonlardan birinin çıkarılması durumunda bile

sistemin aşamalı göçmesini hem ekonomik hem de verimli bir şekilde önleyebileceğini göstermiştir.

Marjanishvili (2004), GSA yönetmeliğinin yapılardaki aşamalı göçmeyi değerlendirmede yetersiz kaldığı için 4 farklı yeni yöntem önermiştir. Ayrıca yazar, yönetmelikte yer alan yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajlarını da araştırmıştır.

Luccioni vd. (2004), betonarme bir yapı da meydana gelen patlama sonucu oluşan şok dalgaların taşıyıcı elemanlarda nasıl yol aldığını incelemişlerdir. Yaptıkları simülasyon ile oluşan zararları karşılaştırmışlardır.

Kaewkulchai ve Williamson (2004), Düzlemsel çerçeve yapılarının aşamalı göçme analizi için çözüm önerisi sunmuşlardır. Ayrıca önceki araştırmalardan farklı olarak, dinamik yükün yeniden dağılımının önemini incelemişlerdir. Geliştirilen kiriş-kolon elemanı doğrusal ve aynı zamanda eksenel kuvvetin ve eğilme momentinin etkileşimini de hesaba katarak analizlerini yaptıkları düzlem çerçeve sistem için dinamik yayılımında aşamalı göçme direncini değerlendirme önemli bir etken olduğu sonucuna varmışlardır.

Sasani ve Kropelnicki (2008), bir yapının aşamalı göçme potansiyelinin değerlendirmek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Sürekli bir betonarme kirişe bağlanan kolonun kaldırılmasıyla ilgili deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Ayrıca kiriş de meydana gelen büyük deformasyonu anlamak için sonlu eleman metodu geliştirmişlerdir. Kaldırılan kolon sonucu yükün yeniden nasıl dağıldığını anlamaya çalışmışlardır.

Izzuddin vd. (2008), aşamalı göçmenin çok katlı yapılar üzerinde direncini etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Çelik çerçeveli ve kompozit çok katlı binaların aşamalı göçme değerlendirmesine yönelik yeni yaklaşımın uygulanmasını detaylandırarak, bu yapıların dayanıklılığı ve mevcut tasarım hükümlerinin yeterliliği hakkında önerilerde bulunmuşlardır.

Khandelwal vd. (2009), gerekli tasarım kontrolleri yapılarak sismik olarak tasarlanmış çelik çerçevelerin aşamalı göçme direncini araştırmışlardır. Alternatif Yol metodunu kullanarak 10 katlı çelik çaprazlı yapı dikkate almışlardır. Çaprazlar dış merkezli ve eş merkezli olarak 2 farklı şekilde düşünmüşlerdir. Çalışmaları neticesinde dış merkezli olarak yerleştirilen çaprazlı sistemin daha az hasar gördüğü sonucuna varmışlardır.

Fu (2009), ABAQUS programında 20 katlı üç boyutlu ve sonlu elemanlar modeliyle oluşturulmuş yapının aşamalı göçme davranışını incelemiştir. Sayısal analizleri deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonuçları aşamalı göçme yönetmeliklerine katkı sağlamıştır.

Liu (2011), Alternatif Yol metodu kullanarak 9 katlı ve üç açıklıklı düzlem çelik çerçevelerin maliyetini doğru bir şekilde hesaplamak için optimizasyon teknikleri kullanmıştır. UFC 4-023-03 rehberine göre toplam çelik ağırlığını dikkate alarak analizleri yapmıştır. Doğrusal statik analiz en fazla çelik ağırlığı verirken, dinamik yöntemler daha ekonomik çelik tonajları verdiği sonucuna ulaşmıştır.

Yap ve Li (2011), Singapur'da yaygın olarak bulunan aynı yapıya sahip betonarme binaların, patlama sonrası kolon-kiriş birleşim bölgelerinde sabit yük ve diğer yükler altındaki davranışını incelemişlerdir.

Sadek vd. (2011), betonarme ve çelik bir yapının kolon kiriş noktalarının aşamalı göçmeye göre davranışını incelemişlerdir. Merkez kolonun kaldırılmasıyla yapılarda oluşan düşey yer değiştirme ile yapının göçme modlarını araştırmışlardır.

Li vd. (2011), bağ kuvvetleri yönteminin aşamalı göçme direncini artırmadaki yetersizliğini göstermek amacıyla 2 betonarme yapı üzerinde sayısal çalışmalar yapmışlardır. Bağ kuvvetleri yönteminin aşamalı göçme direncini artırmada, dinamik etkilerde, iç kuvvetler ve yükü yeniden dağıtma konusunda yetersiz olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca yönetmelikteki bu eksiklikleri giderebilmek için yeni bir yöntem önermişlerdir.

Choi ve Kim (2011), 2 açıklıklı 5 ve 8 katlı çerçeve sistemin sismik yüklerle ve sismik yükler olmadan betonarme yapının kolon kiriş bölgelerinin aşamalı göçmeye karşı direncini deneysel testlerle araştırılmışlardır. Aşamalı göçme analizlerinde dış ve iç kolonları ayrı ayrı kaldırmışlardır. Ayrıca dış kolonları iç kolonlardan 1.5 kat büyük tasarlamışlardır. Test sonuçları ani kolon kaybıyla başlayan aşamalı göçmeye karşı mevcut sismik tasarım kodlarına göre tasarlanan betonarme yapılardaki kirişlerin eğriliğinin azaltılabileceği sonucuna varılmışlardır.

Chen vd. (2012), betonlu ve betonsuz olmak üzere 2 farklı model düşünmüşlerdir. Aşamalı göçmenin döşemeler üzerine etkisi anlayabilmek için 2 katlı çelik çerçeve sistemin dış kolonu kaldırılarak sistem davranışını deneysel testlerle incelemişlerdir. Sonuçlar, modellerin deney ile iyi bir uyum sağladığını ve yükün yeniden dağıtım sürecinde beton levhaların önemli bir rol oynadığını göstermişlerdir.

Szyniszewski ve Krauthammer (2012), çok katlı yapılar için enerjiye dayalı aşamalı göçmenin değerlendirilmesiyle ilgili bir yöntem ortaya atmışlardır. Literatürde bulunan yöntemlerle yaptıkları enerji tabanlı yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca, dinamik yükler altında enerji tabanlı yöntemlerini de araştırmışlardır.

Yu ve Tan (2013), Alternatif Yol metodunu kullanarak deneysel ve sayısal olarak betonarme bir yapının kolon-kiriş davranışını orta kolon kaldırma senaryosunu dikkate alarak incelemişlerdir. Bu bağlamda, kirişlerde meydana gelen eğilmeleri bilinen akma dayanımıyla kıyaslamışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu gözlemişlerdir.

Song ve Sezen (2013), var olan çelik bir yapının doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik yöntemleri kullanarak aşamalı göçme potansiyelini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Yapının birinci katından 4 adet kolonu kaldırarak yükün yeniden nasıl dağıldığını ve deneysel sonuçların sayısal analizlerle uyumluluğunu da irdelemişlerdir. Aşamalı göçme analizlerinde lineer statik yöntemin daha fazla yer değiştirmeye neden olduğu ve üç boyutlu modellerin iki boyutlu modele göre daha doğru sonuçlar verdiği bilgilerine ulaşmışlardır.

Li ve Hao (2013), modern bilgisayar gücüyle bile simülasyonların son derece zaman ve kaynak tükettiği için yeni bir sayısal patlama modelini temsil etmek için sonlu elemanlar modeli kullanarak bir yaklaşım sunmuşlardır. Metodun kullanılabilirliğini göstermek için 2 adet 6 katlı betonarme yapı dikkate almışlardır. Önerdikleri yöntemin daha az matematiksel işlem ile daha etkili sonuçlar elde ettiklerini öne sürmüşlerdir.

Dat ve Tan (2014), deneysel çalışmalarında betonarme bir yapının kaza durumu sonrası köşe kolonun yanındaki taşıyıcı kolonu kaybetmesi sonrası ortaya çıkacak yapı davranışını gözlemlemeye çalışmışlardır. Test sonuçlarına dayanarak, köşe aksına yakın kolon kaybı senaryosu altında betonarme bina yapısının aşamalı göçme direncini ölçmek için basit fakat ölçülü bir yaklaşım önermişlerdir.

Rezvani vd. (2015), sismik olarak tasarlanan çelik moment çerçevesinin farklı açıklıklar için doğrusal olmayan dinamik ve doğrusal olmayan statik yöntemlerle aşamalı göçmeye etkisini araştırmışlardır. Açıklık yarı yarıya azaltıldığında çelik moment çerçevesinin dayanımının 1.91 kat arttığı ve iç kolonların kaldırılmasının aşamalı göçmeye daha duyarlı hale getirdiği sonucuna varmışlardır.

Elsayed vd. (2016), Mısır deprem yönetmeliğini dikkate alarak 7 katlı betonarme ofis binasının aşamalı göçmeye karşı direncini artırmak için deneysel çalışma yapmışlardır. Kolonu kaldırılan kirişlerin alt bölgelerine takviye yapmak suretiyle düşey yer değiştirmeyi sınırlayarak yapının daha az hasar görmesini sağlamak istemişlerdir. Kirişin farklı yerlerinde ve farklı uzunluklarda yapılan takviyeler neticesinde enerji emiliminin arttığını, yükü yeniden dağıtabildiklerini ve düşey deplasmanı sınırlayabildiklerini öne sürmüşlerdir.

Ren vd. (2016), literatürde bulunan kolon kaldırma senaryosunda test edilen kiriş-kolon ve devamlı kiriş elemanlarının aksine 5 adet döşeme-kiriş ve 2 adet döşemesiz devamlı kirişi orta kolon kaldırma senaryosuna göre incelemişlerdir. Aşamalı göçmenin kiriş yüksekliği, kiriş genişliği, döşeme kalınlığı ve genişliği üzerine etkisini belirleyebilmek için analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Alogla vd. (2016), betonarme yapılarda yeterli sürekli takviyeler olmadığı için yapıların aşamalı göçmeye karşı zayıf olduğunu öne sürmüşlerdir. Ayrıca çoğu rehberde aşamalı göçmeyi azaltmak için sistemin bütünüyle ilişkili öneriler verdiği için eksiklik olduğundan bahsetmişlerdir. Bu amaç için 4 örnek yapı üzerinde kolon çıkarma senaryoları denemişler, her bir senaryoda kolon kaldırılan bölgedeki kirişin gövde donatısı bölgesine ek çelik takviyeler yaparak aşamalı göçme direncini artırmayı hedeflemişlerdir. Test sonuçları, kirişlerin sünekliğinde önemli ölçüde artma olduğunu göstermiştir.

Jiang ve Li (2017), bölgesel olarak yangına maruz kalan üç boyutlu ve iki boyutlu çelik çerçevelerin aşamalı göçme direncini doğrusal statik ve dinamik etkiler altında sayısal olarak araştırmışlardır. Kolonları önce tek tek daha sonra ise dördü aynı anda olmak üzere yangına maruz bırakmışlardır. Üç boyutlu yapının iki boyutlu düzlem çerçeve sistemine göre daha farklı göçme modları ve yükü dağıtma yolları olduğu sonucuna varmışlardır.

Li vd. (2017), çelik moment çerçeve sistemin iç kolonlarından birinin kaybına yönelik yürüttükleri deneysel çalışmalarında sistemin davranışı ve aşamalı göçmenin sayısal uygulamalarının geçerliliğini sorgulamışlardır. Kolon kaybı sonrası meydana gelen büyük deformasyonların dinamik artış faktörünün değeri üzerine etkisinin büyük olduğunu ve sistemin elastik davranarak göçmenin meydana geldiği sonucuna ulaşmışlardır.

Qian ve Li (2017), mühendislerin hasar görmüş yapıları yeniden kullanıp kullanılamayacağını belirlemesine yardımcı olan ve hasarlı elemanların yük taşıma kapasitesini belirleyerek yapı davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlayan bir metot geliştirmişlerdir. Yaptıkları bir dizi dinamik testler neticesinde hasarlı elemanların ilk rijitliklerinde önemli ölçüde düşüş olduğundan bahsetmişlerdir.

Lim vd. (2017), literatürdeki çalışmalarda kolon, kiriş ve döşeme arasındaki etkileşimi anlamak için betonarme çerçeve sistemlerin bütün halde incelemişlerdir. Yapı taşıyıcı elemanları daha iyi anlamak için betonarme kiriş ve döşeme, sadece döşeme ve sadece kiriş elemanları tekil olarak incelemek için sistematik bir çalışma geliştirmişlerdir. Laboratuvar ortamında hazırladıkları 4 numuneden köşe ve orta kolonları kaldırarak her bir duruma göre kirişin ve döşemenin yük taşıma kapasitesindeki artış miktarlarını izlemişlerdir.

Adam vd. (2018), 21. yüzyılın başından beri binaların aşamalı olarak yıkılması ve dayanıklılık alanında gerçekleşen tüm ana ilerlemeleri açıklayan iddialı bir çalışma ortaya koymuşlardır. (1) kavramsal tanımların bir listesi, (2) ayrıntılar, (3) kodların ve tasarım önerilerinin mevcut durumu ve gelişimi, (4) sağlamlığın ölçülmesi, (5) aşamalı göçme riski, (6) deneysel testler, (7) sayısal modelleme ve (8) araştırma ihtiyaçları gibi başlıklar altında bazı bilgiler sunmuşlardır.

Swondo vd. (2019), deprem sonrası yangına maruz kalan kompozit çelik çerçevelerin üç boyutlu aşamalı göçme analizlerini sunmaktadırlar. Yükün yeniden dağıtım yollarını ve elemanların kompozit çerçeve içindeki etkileşimlerini incelenmişlerdir. Sonuçlar, 2D modelde yakalanamayan bazı yük dağıtım olgularının 3D modellerde daha iyi belirlenebildiğini göstermiştir.

Alshaikh vd. (2019), yapı sünekliliği artırabilmek için kauçuk ve kumu (ince agrega) çeşitli oranlarda karıştırarak betonarme bir örneği deneysel olarak irdelemişlerdir. Bu çerçevenin orta kolon kaldırma senaryosundaki davranışını incelemişler ve çevre dostu olarak adlandırdıkları bu malzeme ile yapılan analizlerde çerçeve sistemin sünekliliğini artırdıklarını ortaya koymuşlardır.

Feng vd. (2020), geleneksel ön üretimli beton ile imal edilen çerçeve sistemlerde aşamalı göçme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Statik ve dinamik analizler yaptıkları modelde donatı oranı, yer değiştirme, kiriş sürekliliklerinin aşamalı göçmeye etkisini tespit etmeye çalışmışlardır. Çalışma sonunda özellikle kiriş süreklilikleri ve donatı oranının aşamalı göçme direncine büyük katkı sağladığını açıklamışlardır.

Nyunn vd. (2020), dolgu duvarların aşamalı göçme direncini etkisini araştırmışlardır. Bu bağlamda betonarme bir yapının dış akslarının dolgu duvar olduğunu varsaymışlardır. Analizlerinde doğrusal statik, doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz türlerini dikkate almışlardır. Analiz sonuçları dolgu duvarların yükü dağıtmada başarılı olduğunu, aynı zamanda betonarme yapının aşamalı göçme direncini artırdığını göstermiştir.

Zhu vd. (2020), çeşitli modellemelerle yangın etkisinin ve yüksek sıcaklığının aşamalı göçme üzerine etkisini SAP2000 ve EXCEL kullanarak araştırmışlardır. SAP2000 OAPI kullanarak hazırladıkları yazılım ile FDS (yangın dinamiği simülatörü) kullanarak çalışmalarını zenginleştirmişlerdir. Çalışma sonunda elemanların maksimum yer değiştirme, kat sayısı, mahal farklılıkları ve diğer parametreleri kıyaslamışlardır.

Ryu vd. (2021), çalışmalarında çelik takviyeli yapıların yangın esnasında aşamalı göçme davranışını incelemişlerdir. Yeni bir hesaplama modeli ile test sonuçlarını

karşılaştırmışlar ve sertleştirilmiş çelik plakaların yangın esnasındaki davranışını da incelemişlerdir.

Panahi ve Zahrai (2021), belirledikleri kare ve dikdörtgen planlı betonarme yapıları birçok aşamalı göçme analizine tabi tutmuşlardır. Farklı kolon kaldırma senaryolarını uyguladıkları yapılar köşe kolonlarının hasar görmesiyle başlayacak bir aşamalı göçmede iç kolonları kesme ve eksenel kuvvetlerinin ortalama 1.5 kat daha fazla arttığını, kare binada ise enerji emme miktarının daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Qiu vd. (2021), betonarme bir yapıda farklı genişlikte T profilli kirişler kullanılarak hem deneysel hem de sayısal örneklerle kirişlerin içerisine bağ tasarlamışlardır. Ancak diğer çalışmalardan farklı olarak kiriş içerisine monte edilen bu bağ gergin değil, gevşektir. Dinamik yükler altında ve aşamalı göçme başlangıcında yapıya 237%–349% arası katkı sağladığını açıklamışlardır. Sonuç olarak bu yöntemin deneysel ve sayısal sonuçlarına göre gevşek bağ uygulaması ile yapıların aşamalı göçmeye karşı daha iyi direnç kazandığını göstermişlerdir.

Feng vd. (2022), aşamalı göçme analizlerinde döşeme ve dolgu duvarların yeterince önemsenmediğini, analizlere katılmadığını ve bu yapı elemanlarının davranışının yeterince açıklanmadığını iddia etmişlerdir. OpenSees programını kullanarak yaptıkları analizlerde ikincil elemanlarında aşamalı göçme direncine yaptığı katkının göz ardı edilemeyeceğini göstermişlerdir.

Lin vd. (2022), yapıların dinamik yükler altında nasıl davranacağı belirsizliği üzerinde durmuşlardır. Çin yönetmeliklerine göre tasarladıkları 3 katlı 12 m² betonarme bir yapıyı belirsizlik eğrisi oluşturabilmek için çeşitli analizlere tabi tutmuşlardır. Dinamik yük etkisinde belirsizlik eğrisi sunmuşlardır.

Vinay vd. (2022), betonarme yapılarda aşamalı göçmenin etkisini araştırmışlardır. Aşamalı göçme prosedürlerinin daha iyi anlaşılması için SAP2000 programı kullanarak Alternatif Yol metodu başta olmak üzere diğer metotları da incelemişlerdir.

Tian vd. (2023), yaptıkları deneysel çalışmalarda kolon kiriş birleşim bölgesini güçlendirmek için eğri ve düz olmak üzere farklı malzeme tipleri geliştirmişlerdir. Bu malzemeleri kiriş-kolon birleşim bölgesinde kiriş başlık altlarına monte etmişler ve yaptıkları analizlerde kirişin kırılma yerlerinin kolon iç yüzüne uzaklığına göre materyal tiplerini incelemişlerdir.

Bu çalışmalara ek olarak Daneshvar ve Driver (2017), çelik birleşim tipleri için aşamalı göçme potansiyelini araştırmışlardır. Forquin ve Chen (2017), betonarme yapılarda

kolon kiriş birleşim detayını aşamalı göçmeye göre dikkate almışlardır. Pham ve Tan (2014) ise döşeme kiriş etkileşimine dikkat çekmişlerdir. Ding vd. (2017), yeni metod geliştirerek yapıların göçme direncini ölçmüşlerdir. Zhao vd. (2017) ile Salem ve Helmy (2014) çelik kafes elemanların aşamalı göçme durumu altındaki davranışını incelemişlerdir. Nair (2006), Starossek ve Wolff (2005) ile Mohamed (2006) aşamalı göçme yük kombinasyonları ve tasarım gereksinimleri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Son olarak Fu (2013), Starossek ve Haberland (2012), Masoero (2012), Forni (2017) ile Moghaddan ve Sasani (2015), aşamalı göçme kavramı üzerine yaptıkları değerli araştırmalarla terör saldırıları, doğalgaz patlamaları ve diğer insan hatası sebeplerle yapıda meydana gelebilecek ani taşıyıcı eleman kaybı sonrası yapı davranışının daha iyi anlaşılabilmesine katkı sağlamışlardır.

1.3. Amerikan Savunma Bakanlığı Stadartı (UFC 4-023-03)

Yürürlükte bulunan yönetmeliklerin ana amacı yapıların tasarım yükleri etkisinde servis süreleri boyunca güvenilir şekilde hizmet vermelerini sağlamaktır. Bu yönetmelikler öngörülen tasarım yüklerinin dışında olağan yüklemeleri ya da şok dalgalarını dikkate almazlar. Ancak terör odaklı saldırıların neticesinde binaların aşamalı olarak göçmesi, hükümet yetkililerini ve yönetmelik yazım organlarını aşamalı göçmeyi önlemek veya en aza indirmek için harekete geçirmiştir. Özellikle son yıllarda yapıların aşamalı göçmeye karşı direncini belirleyebilmek için birçok yönetmeliklerin son versiyonlarında değişikliğe gidilmiştir.

1968 yılında Londra’da bulunan Ronan Point apartmanında meydana gelen ilk bölgesel aşamalı göçme olayından sonra Birleşik Krallık yapı yönetmeliğinde değişikliğe gitmiştir (ODPM, 1970). Sonraki yıllarda aşamalı göçme kavramını tanımlayan ANSI (1972), BOCA (1972), NRCC (1975), SBCCI (1994) ve ICBO (1997) kodları yayınlanmıştır. Dünya Ticaret Merkezlerine yapılan terör saldırısıyla birlikte özellikle Amerika Birleşik Devletleri’nde aşamalı göçmeye olan ilgi artmış, yapıların aşamalı göçme davranışını inceleyen GSA ve UFC 4-023-03 rehberleri yayınlanmıştır.

Yürürlüğe giren rehberlerinin eğilimi, yapılardaki deformasyon kapasitesini artırarak yapısal elemanlara bölgesel bir zarar gelmesi durumunda, ortaya çıkan hasarların nispeten küçük bir alanla sınırlı kalmasını sağlayarak lokal ya da bütünüyle göçmeyi önlemek yönündedir (Mirzaei, 2010).

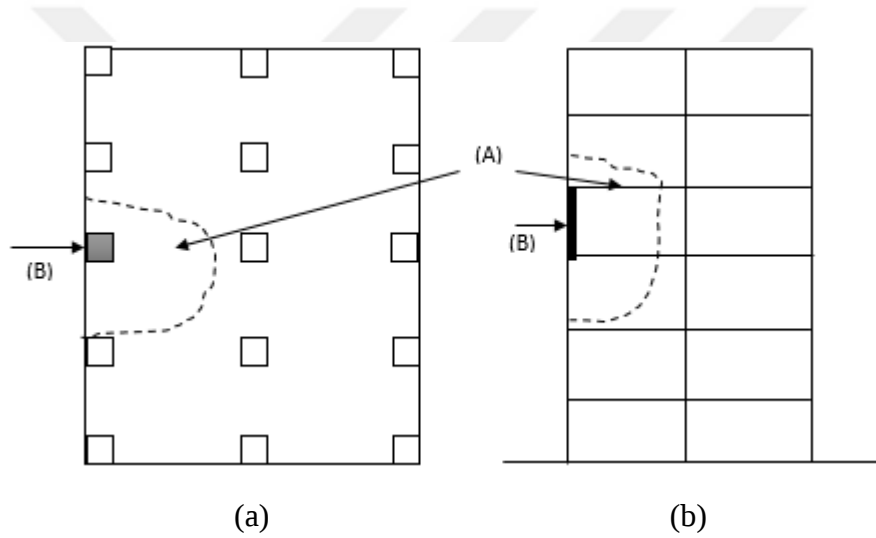
Aşağıdaki bölümler, mevcut yönetmelik ve rehberlerde yer alan hükümlere genel bir bakış sunmaktadır.

Birleşik Krallık, Ronan Point apartmanında meydana gelen aşamalı göçmeden sonra bu konuya kendi standartlarında açık bir şekilde yer veren ilk ülke olmuştur. İngiliz araştırmacılar tarafından 1970'li yıllarda başlayan çalışmalar günümüzde Bina Düzenlemeleri Yönetmeliğinin (ODPM, 2004) A3 bölümü 5. kısımda Orantısız Göçme başlığı altında son halini almıştır. Mevcut tavsiyelerin genel olarak yeterli olduğu kanıtlansa da orantısız göçme önerilerinin tüm binalara genişletilmesi gerektiğine dair genel bir inanış vardır (Moore, 2002). İlk olarak sadece 5 ve daha fazla katlı yapılara uygulandıysa da ilerleyen yıllarda tüm binalara uygulanabilir hale getirilmiştir. 1999 yılında araştırmacıların başlattığı çalışmada yazarlar yapıları risk faktörü ve kullanım amacına göre sınıflandırmayı önermişlerdir (DTLR, 1999). Bu yaklaşımda, her kattan kolonlar ve bir veya birden fazla kolon tarafından desteklenen kirişler sırasıyla sistemden kaldırılır ve kalan yapı her defasında bütünüyle kontrol edilir. Kontrol edilen yapının, kat alanının %15'i veya 75 m²'den fazlası hasar görür ise ya da anahtar elemanın 34 kN/m²'lik statik yüklemeye dayanamayacağı kabul edilirse yapının aşamalı göçmeye karşı dayanıklı olmadığı kabul edilmektedir. Ancak bu şartların ilerleyen yıllarda çok genel ve yetersiz olduğu ortaya çıkmıştır.

Kanada Ulusal Araştırma Konseyi (Associate Committee on the National Building Code, NRCC) ve Kanada Ulusal Yapı Yasası'nın (National Research Council of Canada, NBCC) 1975 yılında yayımladığı hükümlerde aşamalı göçme ile ilgili ilk kez tasarım kriterleri açıklamışlardır. Bu hükümler, Bina Düzenleme Yönetmeliği'nden sonraki en eski hükümlerdir. 1975 yılında yayımlanan NBCC, yapıların tasarım yükleri haricinde öngörülemeyen olağan dışı ve orantısız yüklemelere maruz kalması sebebiyle bölgesel hasarlara ve yıkıma uğrayabileceğini ifade etmiştir. 1980 yılında yürürlüğe giren NRCC ile aşamalı göçme kavramına verilen önem büyük ölçüde azalmıştır (Dusenberry ve Juneja, 2002). Yapısal bütünlük ve aşamalı göçmenin önlenmesi ile ilgili referansları ve yorumlar ile tasarım önerileri de kaldırılmıştır. Janssens (2012), 1995 baskısının 4.1.1.3 maddesinde yapıların hizmet ömürleri süresince öngörülen bütün yüklere dayanacak şekilde tasarlanması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca proje mühendislerinin tasarım esnasında olağan dışı yüklenme olma olasılığını daha ciddiye almalarını önermiştir. Vlassis (2007), yapısal bütünlüğü, yerel hasarı absorbe etme kabiliyeti ve tasarımcılara olağan dışı yüklemelerin meydana gelme olasılığını yılda 4 defa veya daha fazla olarak dikkate alınması gerektiğini,

Ellingwood (2006) ise bu olasılık eşiğinin yönetmelikte nasıl hesaplanacağı konusunda açık bir ifade olmadığını ve asıl amacın tasarım mühendisini uyarmak olduğunu öne sürmüştür. Bunlarla birlikte, bu kodda yük kombinasyonları yer almamaktadır.

EN 1991-1-7 (Eurocode 1, 2006), bina sınıflandırmasına göre orantısız göçme ile ilgili bazı yöntemler önermiştir. Bu yöntemler sayesinde yapıda bölgesel hasarlar oluşsa bile bunun kabul edilebilir sınırlar içinde kalabileceğine dikkat çekmiştir. Bu kabul edilebilir sınır, kodda iki bitişik kat için kat alanının %15 ya da 100 m²'den büyük alanların zarar görmesi aşamalı göçmeye karşı dirençsiz olduğu anlamına gelmektedir. Yönetmelikte sınır değerleri gösteren bir plan ve kesit şematik olarak gösterilmiştir. Önerilen sınır değerlerin şematik gösterimi Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Önerilen sınır değerlerin şematik görünümü, a) Komşu iki katın her birinde kat alanının %15'ini aşmayan bölgesel hasar, b) Temsili kaldırılan kolon (Eurocode 1, 2006)

ASCE 7-16 (2016) standart'ında, gerektirdiği hallerde, yapıların, patlamalar ve (orantısız göçme olmaksızın) taşıt etkisi gibi olağan dışı olayların etkilerine dayanabildiğinden emin olmak için dayanım ve stabilitenin kontrol edilmesi önerilmektedir.

Ronan Point apartmanında meydana gelen aşamalı göçme sonucu İngiltere ve Kanada standartlarının yanı sıra ilerleyen yıllarda Birleşik Devletler'de de yapı tasarım yönetmeliklerinde değişikliğe gidilmeye başlanmıştır. 1972 ve 1982 yıllarında yayımlanan yapı tasarımı için minimum tasarım yükleri kodu (ANSI-72 ve 82) içerisinde aşamalı göçme ilk defa bahsedilmeye başlanmıştır. 1982 basımında ise ilk defa doğrudan ve dolaylı tasarım yöntemlerine yer verilmiştir. Ancak bu yöntem için verilen bilgiler oldukça sınırlıdır. Ellingwood ve Leyendecker (1978) ile Dusenberry ve Juneja (2002), yapısal bütünlüğü

arttırmaya yönelik öneriler listesi yayımlamışlardır. İyi bir plan, uyumlu bir bağ sistemi, doğru döşeme tasarlama, yük yeniden dağılımına uyumluluk, döşeme ve kiriş altı duvarlarla eğilme durumunun iyi bir şekilde öngörülmesi, gereksiz bir yapısal sistemden kaçınılması, sünek davranış iyi anlaşılması, patlama yüklerini dikkate alınması ve yapılarda derzli uygulamaların tercih edilmesi gibi koşullar içermektedir.

Günümüzde aşamalı göçme analizlerinde kullanılabilecek iki farklı rehber araştırmacıların karşısına çıkmaktadır. Bunlardan ilki, 2016 yılında son halini alan GSA (U. S. General Services Administration) rehberidir. GSA’da statik ve dinamik analiz yöntemlerine göre aşamalı göçme analizleri yapmak mümkündür. Ancak doğrusal statik analiz metodu sadece 10 ya da daha az katlı yapılara uygulanabilmektedir. Düzensizlik şartları ve yük kombinasyonları içeren rehber halen araştırmacılar tarafından az da olsa kullanılmaktadır.

İkinci rehber yine Birleşik Devletler’de yayımlanan DoD (Department of Defense) yönetmeliklerinden birisi olan UFC 4-023-03 (Unified Facilities Criteria- Design of Buildings to Resist Progressive Collapse) en yaygın olarak kullanılan aşamalı göçme rehberidir. UFC 4-023-03 rehberi 2009 yılından itibaren 2010, 2013 ve 2016’da yapılan revizyonlarla günümüze kadar gelmiştir. Rehberinin 2016 yılı yayımı tüm yapı tipleri için aşamalı göçmeye karşı yapıların nasıl analiz edileceğini içeren örnekler bulundurmaktadır. Bu örneklerde yapının aşamalı göçmeye karşı direnci dayanıklılık ve performansına göre değerlendirilmiştir. Ayrıca rehber yapıların risk seviyesine göre direkt ve dolaylı analiz metotları içermektedir. Düşük ve orta risk seviyesi grubunda bulunan yapılarda dolaylı yaklaşımı benimserken yüksek risk grubunda ise direkt dizayn yaklaşımını önermektedir.

Bu tez kapsamında incelenecek örnek yapılar Amerikan Savunma Bakanlığına ait UFC 4-023-03 rehberi dikkate alınarak irdelenecektir. Rehber hem var olan yapılara hem de yeni inşa edilecek yapılarda kullanılabildiği için genellikle araştırmacılar tarafından da sıklıkla tercih edilmektedir. Amerikan Savunma Bakanlığının kendi tesis ve askeri yapıları için hazırladığı, aşamalı göçmeye dirençli yapı tasarımı rehberi yıllar geçtikçe sadece Birleşik Devletlerde değil birçok ülkede kabul gören rehber haline gelmiştir. Yapıların aşamalı göçmeye karşı direncini ölçme ya da belirleme konusunda birkaç Avrupa ülkesi ve Kanada ile birlikte Amerika’da çeşitli rehberler yayımlanmışsa da A.B.D Savunma Bakanlığının yayımları daha ön plana çıkmıştır. Bakanlığın yayımladığı UFC rehberleri birbirine bağlı serilerden oluşmaktadır. Her biri anti-terörizm, güvenlik, detaylı tasarım ve yapı planı konusunda birbiriyle ilişkilidir. Bu nedenle UFC rehberlerini tek başına düşünmek

yanlış olacaktır. UFC 4-023-03 rehberi UFC 4-010-01 ‘Binalar için Minimum Antiterörizm Standartı’, UFC 4-010-02 ‘Binalar için Minimum Antiterörizm Emniyet Mesafesi Standartı’ UFC 4-020-01 ‘Güvenlik Mühendisliği Tesisi Planlama Rehberi’ ve UFC 4-020-02 ‘Güvenlik Mühendisliği Konsept ve Tasarım’ ile yakından ilişkilidir.

2001 yılında WTC binalarına yapılan terör saldırısıyla araştırmacıların artan ilgisine maruz kalan aşamalı göçmeye dirençli yapı tasarımı, son yıllarda özellikle UFC 4-023-03 rehberi kullanılarak gerçekleştirilen birçok deneysel ve numerik çalışmalara konu olmuştur. Bu rehberin amacı farklı türdeki yapıların uzun hizmet süreleri boyunca projelendirme aşamasında dikkate alınmayan yüklemelere maruz kalması durumunda yapının toptan ya da kısmen göçmesini önlemektir. Oluşabilecek ilk hasarın yayılımını sınırlamak için seçilen taşıyıcı sistemin yeterli devamlılık ve sürekliliğe sahip olması gereklidir. Böylelikle rehber, ülkeler için kritik öneme sahip askeri, kamu, ticaret ve turizm gibi katma değeri yüksek ve önemli yapıların birçok olağan dışı olay karşısında ayakta kalmasını sağlayacaktır. Her ülke için bu tür yapıların hasar görmesi, bölgesel göçmesi ya da tamamen göçmesi itibar ve gelir kaybına yol açarak uzun vadeli ülkelerin politikalarını etkileyecektir.

Amerikan Savunma Bakanlığı tarafından yayımlanan UFC serisi rehberler yapının şekli, yerleşimi ve fonksiyonuna göre değişiklik göstermektedir. 3 veya daha yüksek katlı yapılara uygulanabilen bu tasarım kriterleri yapının içerisindeki insan yoğunluğuna göre farklı yaklaşımlar sunmaktadır. Ayrıca yapılarda bulunması muhtemel asma kat, bodrum kat, yangından kaçış güzergâhları, garaj ve makine dairesi gibi elektrik ve makine tesisatı için kullanılan mahaller içinde farklı yaklaşımlar sunulmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerde ortaya çıkan mevcut bina üzerine projelendirme yapılmadan kat sayısını artırma durumu içinde dikkat edilmesi gereken kriterlerden bahsedilmektedir.

Yapıların kullanım fonksiyonu, yoğunluğu, kamusal ya da özel müteşebbis olmasına bağlı olarak 4 farklı risk kategorisine ayrılmıştır. Bu kategoriler kullanıcıları bina özelliğine göre kullanılacak metotlara yönlendirmektedir. Böylece var olan ya da yeni yapılacak binaların risk seviyeleri tablolara bağlı olarak açık ve anlaşılır şekilde sunulmaktadır.

UFC 4-023-03’de yapıların aşamalı göçme ihtimalini azaltmak için 2 genel yaklaşım sunmaktadır. Bunlar, direkt ve dolaylı dizayn yaklaşımlarıdır. Tasarım mühendisleri var olan ya da yeni inşa edilecek yapılarının malzeme türü, yüksekliği, hizmet amacı, planı ve komşu yapılara mesafelerini dikkate alarak bu dizayn yaklaşımlarının izin verdiği aşamalı göçme metotlarını kullanabilmektedirler. Bu metotlar daha sonraki bölümlerde açıklanacak olan

Bağ Kuvvetleri metodu (TF), Alternatif Yol metodu (APM) ve Bölgesel Direnç metodudur (ELR).

1.4. Alternatif Yol Metodu

UFC 4-023-03 rehberi aşamalı göçme hesabı için 3 analiz metodu önermektedir. Bunlar Bağ Kuvvetleri metodu, Alternatif Yol metodu ve Bölgesel Direnç metodudur. Bu metotlardan Alternatif Yol metodu literatürde bulunan akademik çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir yöntem olsa da Bağ Kuvvetleri metodu ve Bölgesel Direnç metodu da yapı düzensizliklerine göre analizlere dâhil edilebilmektedir.

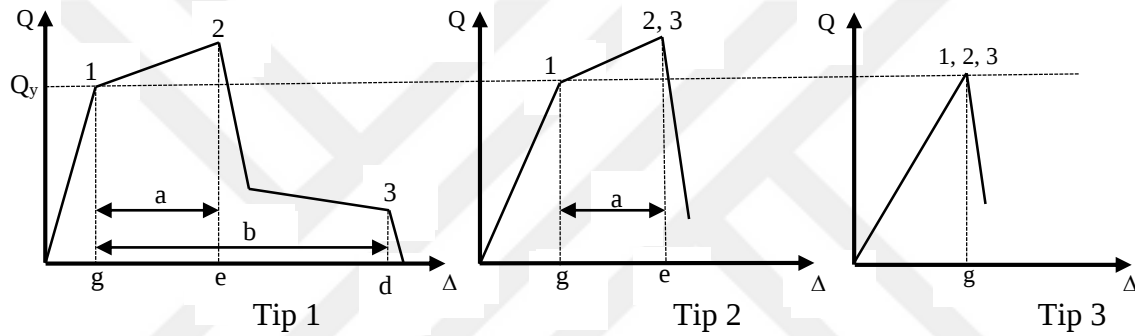
Bağ Kuvvetleri metodu, yapı elemanlarının birbirine mekanik olarak bağlı olduğunu ifade eder. Genel anlamda Bağ Kuvvetleri metodu yapıların sünek ve taşıyıcı elemanlarının devamlılığı esasına dayanmaktadır. Bu bağlar yatay ve düşey olmak üzere iki farklı şekilde yer almaktadır. Yatay bağlarda kendi içerisinde çevresel, boylamsal ve enine bağlardan oluşmaktadır. Bağ kuvvetleri kabullerine göre yapı içerisinde yük taşıyan ya da aktaran elemanların serbestçe kendi etrafında dönmesi istenmeyen bir durumdur. Çünkü bu noktalarda elemanlar moment aktarmaz ve bağ kuvvetinin temel esaslarından olan devamlılık kuralı bozulmuş olur. Bağlar arasında devamlı ve kesintisiz yük aktarımı bu metotta beklenmektedir. Aksi halde Bağ Kuvvetleri metodu kullanılamamaktadır.

Bölgesel Direnç metodu, yapıda bulunan kolon ve duvarların yatay kuvvetler altında kesme kırılmasına maruz kalmadan sünek davranış göstermesidir. Başka bir deyişle, kolon ve duvarların maksimum eğilme dayanımına ulaşmadan kesme etkili gevrek kırılmanın önüne geçmeyi hedefler. Bu metot, duvar ve kolonların yanı sıra özellikle birleşim yerleri ve temel plakası ya da döşeme plağı ile de ilgilenmektedir.

Alternatif Yol metodu hem kullanılabilirliğinin kolaylığı hem de araştırmalarda en çok kullanılan metot olması nedeniyle bu tezde de tercih edilmiştir. Metot, yapı taşıyıcı sisteminden bir kolonun eksilmesi durumunda bu kolona bağlanan kirişlerin yük aktarımına devam etmesi ve sistemin yükü yeni durum için tekrar taşıyıcı elemanlar arasında dağıtarak bütün elemanların yeni yükleri emniyetli şekilde taşıması esasına dayanmaktadır. Kullanıcılar bir veya daha fazla kolon kaldırma senaryosu seçerek yapı sisteminin aşamalı göçme direncini belirleyebilir. Bunu yaparken Alternatif Yol metodu 3 farklı analiz yöntemi önermektedir. Bunlar; doğrusal statik, doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleridir. Bu yöntemler farklı işlem adımları içerse de yapı sisteminde ki birincil

(kolon, kiriş ve döşemeler) ve ikincil elemanlar (taşıyıcı olmayan duvarlar vb.) benzerdir. Birincil eleman, genellikle yapı içerisinde yük taşıyan ve göçmeye karşı direnç gösteren elemanlardır. İkincil eleman ise yük taşımayıp mimari detayları plana yansıtan ara elemanlardır. Ancak ikincil elemanlarda istenildiği takdirde yük taşıma yeteneği kazandırılarak birincil eleman olarak adlandırılabilir.

Alternatif yol metodu, kullanıcılara bazı eğriler sunmaktadır. Bunlar yapıdaki birincil ya da ikincil eleman davranışlarına göre 3 tip olarak verilmektedir. Sırasıyla deformasyon kontrollü ya da kuvvet kontrollü olarak adlandırılırlar. ASCE 41'e göre deformasyon ve kuvvet kontrollü eğriler Şekil 10'da görüldüğü gibidir.



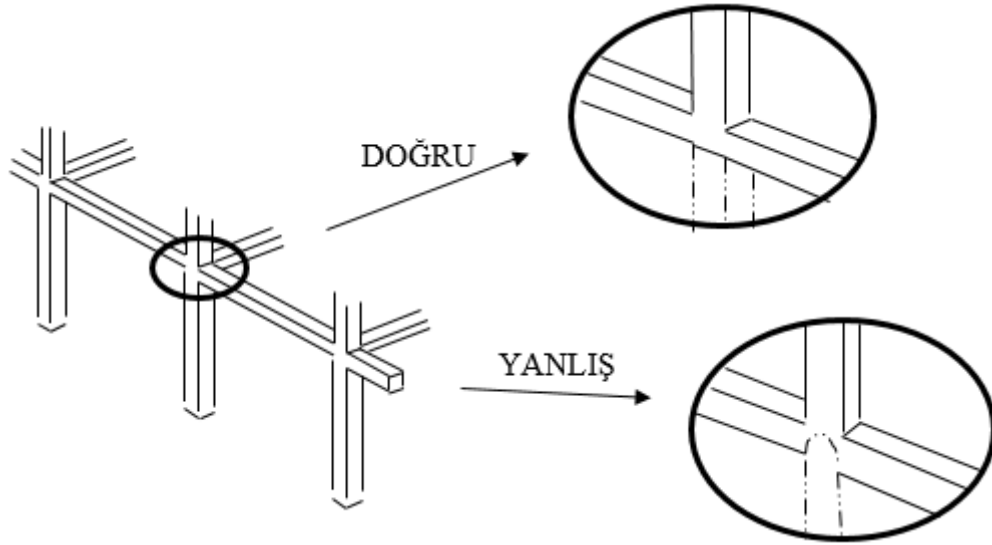
Şekil 10. Deformasyon ve kuvvet kontrollü davranış (ASCE 41)

Birincil elemanların tip eğrisi Tip 1'de $e \geq 2g$ ya da Tip 2'de $e \geq 2g$ ise deformasyon kontrol olarak, Tip 1 ya da Tip 2 davranışına sahip ve $e < 2g$ ise veya Tip 3 eğrisine sahipse kuvvet kontrollü olarak değerlendirilir. Burada Q , kuvveti Δ , deformasyonu Q_y , kesitin akmasını ifade etmektedir.

Tüm bu bilgiler ışığında Alternatif Yol metoduna ait kolon kaldırma senaryosu, tez kapsamında kullanılan analiz yöntemleri ve detayları 1.5 ve 1.6 başlığı altında verilmektedir.

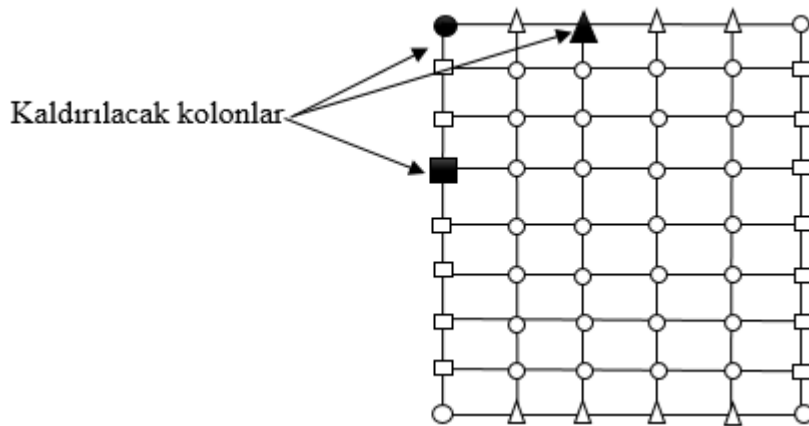
1.5. Kolon Kaldırma Senaryosu

Kolon kaldırma senaryosu hem iç kolonlara hem de dış kolonlara uygulanabilmektedir. Ancak kolonun kaldırma biçimi ve sınırları büyük önem arz etmektedir. Şekil 11'de taşıyıcı sistemden hayali olarak kaldırıldığı düşünülen bir kolon şeması görülmektedir.

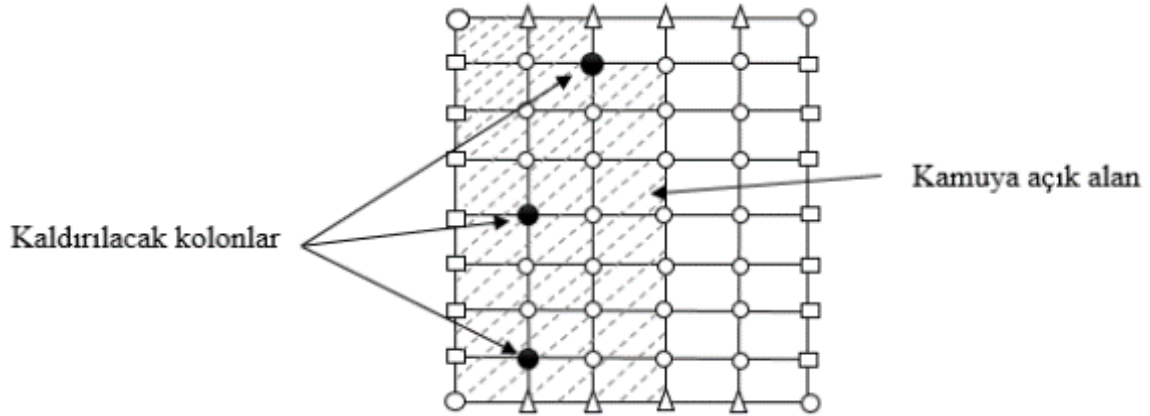


Şekil 11. Kolon kaldırma şekli ve sınırları

UFC'ye göre kaldırılacak dış kolonlar plandan ve şeklinden bağımsız olarak en az 1 kat için 3 adettir. Köşe kolon, kısa kenarın ortasında bulunan kolon ve uzun kenarın ortasında yer alan kolon sistemden sırasıyla çıkarılmalıdır. Ayrıca kaldırılacak kolonun bulunduğu konuma komşu en büyük açıklığın %30'u kadar yakın mesafede bulunan kolon/kolonlar eş zamanlı olarak kaldırılmalıdır. Tüm bunların dışında yapının geometrisinde önemli değişiklikler olduğunda, ani süreksizliklerde, kat planında boşluk bulunması durumunda, asansör ya da farklı uygulamalarda mühendis bilgi ve tecrübesine göre kolon kaldırma senaryosu sayısı artırılabilir. Kat planında çevresel (dış) ve iç kolon kaldırma konumları Şekil 12 ve Şekil 13'de sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 12. Dış kolon kaldırma konumu



Şekil 13. İç kolon kaldırma konumu

UFC 4-023-03, giriş kat, bina yüksekliğinin yarısı (orta kat), kolon değişimi olan katlarda da kolon kaldırma senaryolarının uygulanmasını mecburi tutmuştur. Genellikle perde duvarlar ve taşıyıcı duvarlar için de aynı şartlar ve kısıtlamalar geçerlidir.

1.6. Analiz Yöntemleri

Alternatif Yol metodu, rehber de belirtildiği gibi, doğrusal statik, doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri kullanılarak uygulanabilir. Bu yöntemler ile incelenen yapının birincil ve ikincil elemanlarının aşamalı göçmeye karşı davranışını anlamak mümkündür. Ancak her analiz yönteminin kendi içerisinde kısıtları ve yöntem farklılıkları vardır. UFC’de de belirtildiği üzere doğrusal olmayan statik analiz yöntemi, 3 boyutlu yapılara uygulanabilirken, 2 boyutlu çerçeve sistemlere uygulanmamaktadır. Yapı sisteminde ikincil elemanlar (duvar vb.) bulunması durumunda ise doğrusal olmayan statik analiz yöntemi kullanma seçeneği mühendislere bırakılmış, herhangi bir şart konulmamıştır.

Bu çalışmada Alternatif Yol metodu kullanılarak yapıların aşamalı göçme potansiyeli araştırılmaktadır. Analiz yöntemi olarak doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik yöntemler tercih edilmiştir. Bu şekilde analiz yöntemleri arasında da karşılaştırmalar yapmak amaçlanmaktadır. Doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerinin hangi şartlarda kullanılabileceği ve işlem adımları aşağıda özetlenmektedir. Her iki yöntemle yapı modellemesine ilişkin detaylı adımlar UFC 4-023-03 rehberinde ve tasarım mühendislerine rehber olması amacıyla Özgan vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen TÜBİTAK-118M998 proje raporunda açıklanmaktadır.

1.6.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi

Doğrusal statik analiz yöntemi, sadece üç boyutlu modellere uygulanabilmektedir. Diğer yöntemlere göre daha basit ve kolay uygulanabilir olmasına rağmen analiz sonuçlarının yeterli hassaslıktan uzak olması en büyük dezavantajıdır. Bu nedenle araştırmacılar tarafından çok sık kullanılmayan bir analiz yöntemidir.

Araştırmacılar bir yapı modelini doğrusal statik analiz göre incelemek istediğinde 2 yöntem karşısına çıkmaktadır. Bunlar DCR (Talep-kapasite oranı) ve m katsayısı yöntemidir. Eğer yapıda, süreksizlik, düzlem dışı kolonlar, asma kat bulunması, köşe kolonları hariç diğer kolonların aks rijitlik oranları diğer akslara göre %50'den az olması ve eğimli taşıyıcı eleman bulunması durumlarında Denklem 1'de verilen DCR oranı kullanılır.

$$DCR = \frac{Q_{UDLim}}{Q_{CE}} \quad (1)$$

Burada, Q_{UDLim} , dış yüklere maruz kalan taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen iç kuvvetleri, Q_{CE} ise taşıyıcı sistem elemanlarının her birinin dayanımını ifade etmektedir. Tanımlardan anlaşılacağı üzere yapı sistemindeki ilgili kirişlerin iç kuvvetlerinin kiriş elemanın kapasite dayanımına oranıdır.

Yapıda, DCR kullanımının mümkün olmadığı durumların tümünde ' m ' oranı yöntemi kullanılır. Deformasyon kontrollü analizlerde birincil ve ikincil taşıyıcı sistem elemanları m oranı aşağıdaki gibi belirlenir;

$$\Phi m Q_{CE} \geq Q_{UD} \quad (2)$$

kontrollü yapılmalıdır. Burada Φ malzemeye bağlı dayanım azaltma katsayısını, m katsayısı, Q_{CE} taşıyıcı sistem elemanlarının her birinin dayanımını, Q_{UD} ise deformasyon kontrol durumunda dış yüklere maruz kalan taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen iç kuvvetleri ifade etmektedir. Kuvvet kontrollü analizlerde ise;

$$\Phi Q_{CL} \geq Q_{UF} \quad (3)$$

koşulu sağlanmalıdır. Burada Q_{CL} taşıyıcı sistem elemanlarının her birinin dayanımını, Q_{UF} ise kuvvet kontrol durumunda dış yüklere maruz kalan taşıyıcı sistem elemanlarında meydana gelen iç kuvvetleri ifade etmektedir.

Doğrusal statik analiz yöntemi kullanılacak ise kaldırılan taşıyıcı elemana komşu alanlar;

$$G_{LD} = \Omega_{LD}[1.2D + (0.5L \text{ ya da } 0.2S)] \quad (4)$$

yük birleşimi ile yüklenmektedir. Burada G_{LD} düşey yükü, Ω_{LD} yük artırım faktörünü, D ölü ve cephe yüklerini, L azaltılmış hareketli yükü, S kar yükünü ifade etmektedir. Kaldırılan taşıyıcı elemana uzak alanlarda ise düşey yükler,

$$G = 1.2D + (0.5L \text{ ya da } 0.2S) \quad (5)$$

ifadesi ile hesaplanarak sisteme eklenmektedir. Burada G düşey yükünü, L hareketli yükü, S kar yükünü ifade etmektedir.

Modellenen yapı sadece Denklem 4 kullanılarak G düşey yükü elde edilir. Bu yük model döşemelerine etkitilerek analiz gerçekleştirilir. İncelenecek kirişlerin analiz sonucu elde edilen kesit tesirleri okunur ve bu kirişlerin donatı oranları ve kesme kuvvetleri kullanılarak m-faktör değeri betonarme yapılar için Tablo 1'den, çelik yapılar için Tablo 2 ve çelik yapıları bağlantı elemanları için ise Tablo 3'den alınır. Tablodan alınan değerler o yapı elemanları için m oranlarının üst değerlerini göstermektedir.

Tablo 1. Betonarme kirişlerin kabul kriterleri (UFC 4-023-03, Table 4-2)

Koşullar			<i>m</i> -faktör ¹		
			Eleman tipi		
			Birincil	İkincil	
i. Eğilme etkin kirişler²					
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Enine ³ Donatı	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ ⁴			
≤ 0.0	C	≤ 3	16	19	
≤ 0.0	C	≤ 6	9	9	
≥ 0.5	C	≤ 3	9	9	
≥ 0.5	C	≤ 6	6	7	
≤ 0.0	NC	≤ 3	9	9	
≤ 0.0	NC	≤ 6	6	7	
≥ 0.5	NC	≤ 3	6	7	
≥ 0.5	NC	≤ 6	4	5	
ii. Kesme etkin kirişler²					
Etriye aralığı $\leq d/2$			1.5	3	
Etriye aralığı $\geq d/2$			1.5	2	
iii. Yetersiz kesitli veya açıklık boyunca ek yapılmış kirişler²					
Etriye aralığı $\leq d/2$			1.5	3	
Etriye aralığı $\geq d/2$			1.5	2	
iv. Kiriş-kolon birleşim bölgelerinde yetersiz kenetlenme kontrollü kirişler²					
			2	3	
1. Tablodaki değerler arasında lineer enterpolasyon yapılabilir. Birincil ve ikincil elemanların tanımı için Bölüm 3.2.4.'e bakınız. 2. Bir eleman için birden fazla koşul uygun olursa tablodan uygun olan en küçük değer kullanılmalıdır. 3. C ve NC enine donatıların şartlara uygun olup ve olmadığını gösteren kısaltmalarıdır. Bir elemanın plastik mafsallık bölgesinde $< d/3$ aralığında etriyeler varsa ve etriyeler tarafından sağlanan dayanım tasarım kesme kuvvetinin en az $3/4$ ise uygundur. Aksi halde uygun olmadığı kabul edilir. 4. V, ASCE-41 Bölüm 10.4.2.4.1.'e uygun olarak sınır durum analiz prosedürleri kullanılarak hesaplanan tasarım kesme kuvvetidir.					

Tablo 2. Çelik çerçeve bağlantılarının kabul kriterleri (UFC 4-023-03, Table 5-1)

Birleşim Tipi	Doğrusal Kabul Kriterleri	
	<i>m</i> -faktörler	
	Birincil ⁽¹⁾	İkincil ⁽¹⁾
Moment Aktaran Tam Rijit Birleşimler (Tam rijit)		
Gövdede bulunlu güçlendirilmemiş kaynaklı başlık	$2.3 - 0.021d$	$4.9 - 0.048d$
Zayıflatılmış kiriş kesiti	$4.9 - 0.025d$	$6.5 - 0.025d$
Güçlendirilmemiş kaynaklı başlık	$4.3 - 0.083d$	$4.3 - 0.048d$
Kenar plak	$6.7 - 0.039d^{(2)}$	$11.1 - 0.062d$
Kısmen Moment Aktaran Birleşimler (Kısmen rijit)		
Çift T profili		
a. Bulonda kesme	4	6
b. Bulonda çekme	1.5	4
c. T profilinde çekme	1.5	4
d. T profilinde eğilme	5	7
Mafsallı Birleşimler (Rijit olmayan)		
Çift korniyer		
a. Bulonda kesme	$5.8 - 0.107d_{bg}^{(3)}$	$8.7 - 0.161d_{bg}$
b. Bulonda çekme	1.5	4
c. Korniyerde eğilme	$8.9 - 0.193d_{bg}$	$13.0 - 0.290d_{bg}$
Basit Kesme	$5.8 - 0.107d_{bg}$	$8.7 - 0.161d_{bg}$

(1) Birincil ve ikincil sınıflandırması için Bölüm3-2.4'e bakınız

(2) d = kiriş yüksekliği, inç(3) d_{bg} = Bulon grubunun derinliği, inç

Tablo 3. Çelik yapı kabul kriterleri (ASCE 41-13 Table 9-4)

Eleman/Etki	Lineer prosedürler için <i>m</i> -Faktörler				
	Birincil			İkincil	
	SH	KH	GÖ	KH	GÖ
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{F_{ye}}$ ve $\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{F_{ye}}$	2	6	8	10	12
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{F_{ye}}$ ve $\frac{h}{t_w} \leq \frac{640}{F_{ye}}$	1.25	2	3	3	4
c. Diğer	a ve b de verilen başlık narinlikleri ve gövde narinlikleri arasında lineer enterpolasyon yapılabilir. Bu durumda en küçük değer kullanılmalıdır.				

Yukarıda verilen tablolardan kirişler için *m* değerlerinin üst limiti alınmakta ve bu limit değere *m*-faktör adı verilmektedir. Denklem 4 'ün hesaplanabilmesi için *m*-faktör değeri kullanılarak Ω_{LD} değeri UFC 4-023-03 (2016) rehberi Table 3-4'den alınır (Tablo 4) Ω_{LD} ve Ω_{LF} yük artırım faktörlerinin hesaplanma şekil Tablo 3'de görülmektedir.

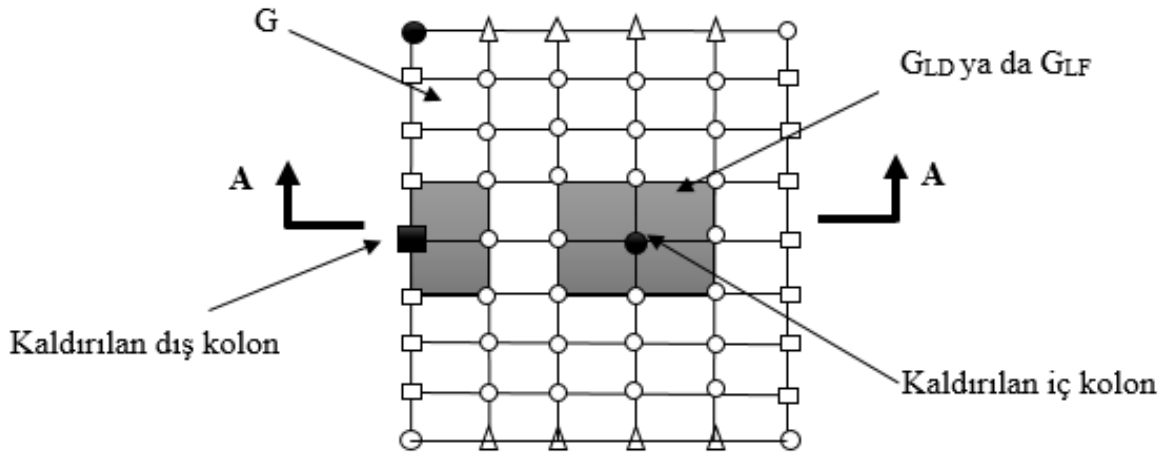
Tablo 4. Doğrusal statik analiz yöntemi için yük aktarım faktörleri

Malzeme	Yapı Tipi	Ω_{LD} , Deformasyon kontrollü	Ω_{LF} , Kuvvet kontrollü
Çelik	Çerçeve	$0.9m_{LIF} + 1.1$	2.0
Betonarme	Çerçeve ^A	$1.2m_{LIF} + 0.80$	2.0
	Taşıyıcı duvar	$2.0m_{LIF}$	2.0
Yığma	Taşıyıcı duvar	$2.0m_{LIF}$	2.0
Ahşap	Taşıyıcı duvar	$2.0m_{LIF}$	2.0
Soğuk şekillendirilmiş çelik	Taşıyıcı duvar	$2.0m_{LIF}$	2.0

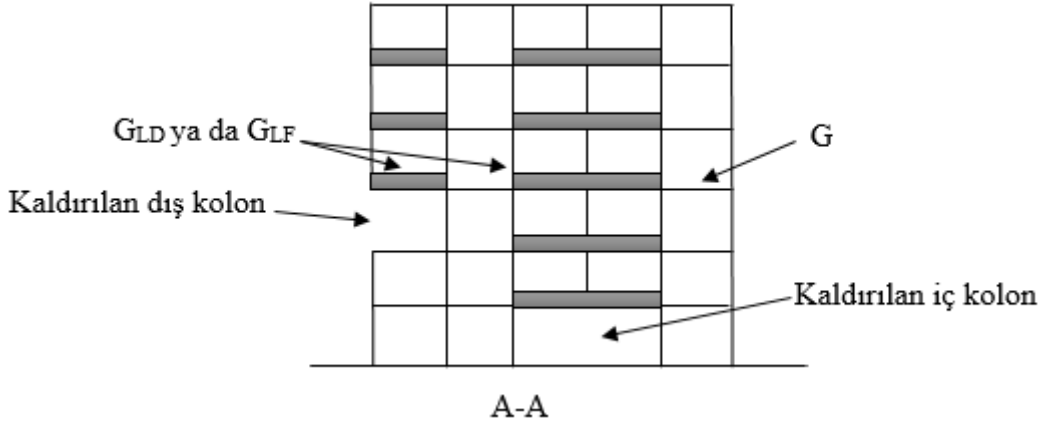
^AASCE-41'e göre kiriş-kolon bağlantıları kuvvet kontrollü değerlendirilmektedir; ancak kirişte kolona yakın oluşan mafsallar deformasyon kontrollüdür ve deformasyon kontrollü yük artış faktörünün Ω_{LD} hesaplanmasında UFC'nin 4. Bölümünden alınan m -faktör kullanılacaktır.

Tablo 4 yardımıyla Denklem 4 hesaplanır. Denklem 4 ile elde edilen G_{LD} düşey yükü kaldırılacak kolona yakın alanlarda, Denklem 5 ile hesaplanan G düşey yükü uzak alanlar için döşemelere etkitilir (Şekil 14 ve Şekil 15).

Doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yönteminde kaldırılan kolona yakın ve uzak alanlar için hesaplanan düşey yüklerin kat planının ve A-A kesiti üzerindeki gösterimi Şekil 14 ve Şekil 15'de gösterilmektedir.



Şekil 14. Kat planında yük ve yük yerleşimi



Şekil 15. A-A kesiti yük ve yük yerleşimi

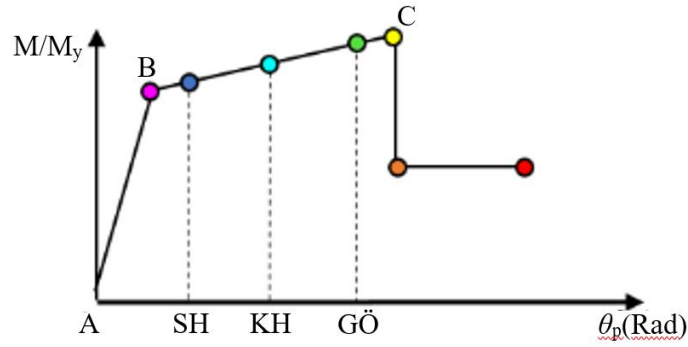
Artık yapı doğrusal statik analiz yöntemi için hazırdır. Model analize tabi tutularak incelenecek kirişlere ait maksimum eğilme momentleri programdan okunur (Q_{UD}). Ayrıca hesaplanan beklenen (ortalama) moment dayanımları da (Q_{CE}) kullanılarak Denklem 2 yardımıyla her bir kiriş için m değerleri hesaplanır. Her bir kiriş için hesaplanacak m oranları m -faktör değerini aşmadığı sürece söz konusu elamanın aşamalı göçmeye karşı dirençli olduğu kabul edilir.

1.6.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi

Doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi rehberde verilen diğer iki analiz yöntemine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Ancak işlem yoğunluğu daha fazladır. Sadece 3 boyutlu sistemler için kullanılmasına izin verilmektedir. Yöntemin yapının geometrik özelliklerine bağlı kısıtlamaları da yoktur. İkincil yapı elemanlarının aşamalı göçme direncini belirlemek mühendisin tercihinin bırakılmakta ve herhangi bir zorunluluk bulunmamaktadır. Ancak birincil elemanlar rehber kurallarına uygun denetlenmelidir.

Doğrusal olmayan dinamik analiz metodunda dinamik yük artımı faktörü kullanılmamaktadır. Ancak sistemin büyük yer değiştirme yapması öngörüldüğü için ikinci mertebe momentleri (P- Δ etkisi) dikkate alınmalıdır. Analizlerde doğrusal olmayan davranış plastik mafsalları teorisi kullanılarak hesaba katılmaktadır.

SAP2000v21.2.0 programı ASCE 41-13 yönetmeliğini esas alarak performans düzeylerini SH (Sınırlı Hasar), KH (Kontrollü Hasar), GÖ (Göçmenin Önlenmesi) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada da SAP2000 programı kullanılacağı için programın esas aldığı renk skalası ve moment-dönme ilişkisi Şekil 16'da verilmektedir.



Şekil 16. Moment-plastik dönme ilişkisi

Moment-dönme eğrisine göre B noktasına kadar olan lineer kısım elastik davranışı temsil etmektedir. B noktasından sonra (pembe) ilgili elemanda plastik mafsall oluşmaya başlamakta ve elemanda elastik ötesi davranış görülmektedir. B noktası ile SH (lacivert) noktası arası oluşan hasar görece sınırlı ve onarılabilir düzeydedir 'minimum hasar bölgesi' olarak adlandırılmaktadır. KH (turkuaz) noktası yapının hasar gördüğünü ifade etmektedir. SH ve KH arasındaki bölgeye "belirgin hasar bölgesi" denilmektedir. GÖ (yeşil) yapısal elemanların ağır hasar gördüğünü ifade etmektedir. KH ve GÖ arasındaki bölge "ileri hasar bölgesi" olarak adlandırılmaktadır. GÖ ile kırmızı mafsall arasındaki bölgeye "göçme bölgesi" adı verilmektedir.

UFC 4-023-03 Fig. E-18'e göre kuvvet-deformasyon ilişkisinde 'a' noktası Şekil 16'daki C noktasına tekabül etmektedir. Bu noktalar sınır değeri temsil etmektedir. Yani 'a' noktasının aşılması halinde elemanın aşamalı göçme direnci bakımından güvensiz olduğu anlaşılmaktadır. Diğer durumlarda yapı hasar görmüş olabilir ancak aşamalı göçme riski bulunmamaktadır. Bu sınır değeri SAP2000 programı için Şekil 16'da verilen kuvvet-deformasyon ilişkisinin C noktasına denk gelmektedir. Dolayısıyla analizler neticesinde plastik dönmelerin C noktası hasar seviyesine ulaşması istenmeyen durumu göstermektedir (plastik mafsalların sarı rengi alması durumu). Bu durumda elemanın aşamalı göçme direncini kaybettiği kabul edilmektedir.

Doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminde düşey yük, alanın kaldırılan kolona komşu olmasına ya da komşu olmamasına bakılmaksızın, tüm döşemeler için;

$$G_N = 1.2D + (0.5L \text{ ya da } 0.2S) \quad (6)$$

birleşimi ile hesaplanmaktadır. Burada G_N doğrusal olmayan dinamik analiz için düşey yükü, D Ölü ve cephe yüklerini, L azaltılmış hareketli yükü, S kar yükünü ifade etmektedir.

Aşamalı göçme analizlerinde kullanılan yatay yükler tüm katlar için;

$$\sum P = G_N \times A \quad (7)$$

$$LLAT = 0.002 \times \sum P \quad (8)$$

birleşimi ile hesaplanmaktadır. Burada G_N doğrusal olmayan dinamik analiz için düşey yükü, A kat alanını, $\sum P$ kat yükü, $LLAT$ her kat için yatay tekil yükü ifade etmektedir.

Kolon kaldırma işleminin yapıda meydana getireceği şok etkisini uygulayabilmek için paket programda saniyenin onda biri kadar süre için simultane edilmelidir. Böylece yapı çok kısa zamanda taşıyıcı bir elemanını kaybetmiş olacak ve tekrar dengeye gelmek isteyip yükleri kendi içerisinde diğer elemanlara yeniden dağıtması beklenecektir. Sistemin tekrar dengeye gelip/gelememesi aşamalı göçme direnci ile ilgili mühendisler bilgi vermektedir.

1.7. Zemin-Yapı Etkileşim Modelleri

Yapılar genellikle tabanda ankastre kabulü ile alt zemin etkilerini dikkate almadan projelendirilmektedir. Oysaki yapılar, üzerlerine etkiyen yükleri en kısa ve en güvenli yoldan temele ve oradan da zemine iletecek şekilde tasarlanırlar. Üst yapıdan aktarılan yükler zeminde belirli etkiler oluşturmakta ve zeminin vermiş olduğu tepkiler üst yapıyı etkileyerek yapının davranışını değiştirebilmektedir.

Zemin-yapı etkileşimini anlayabilmek için birçok teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Zeminin homojen ve lineer olmayan yapısı zemin davranışının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Dolayısı ile zeminin yapıda oluşturacağı etkileri ortaya koyacak modeller ancak birtakım idealleştirmeler ile mümkün olabilmektedir.

Literatürde kullanılan çok sayıda zemin modeli bulunmasına rağmen basitliğinden dolayı elastik zemin modelleri daha geniş kullanım alanı bulmaktadır. Zemin içerisindeki değişimi dikkate almayan bu modeller genel olarak bir parametrelili, iki parametrelili ve üç parametrelili modeller olarak sınıflandırılabilirler.

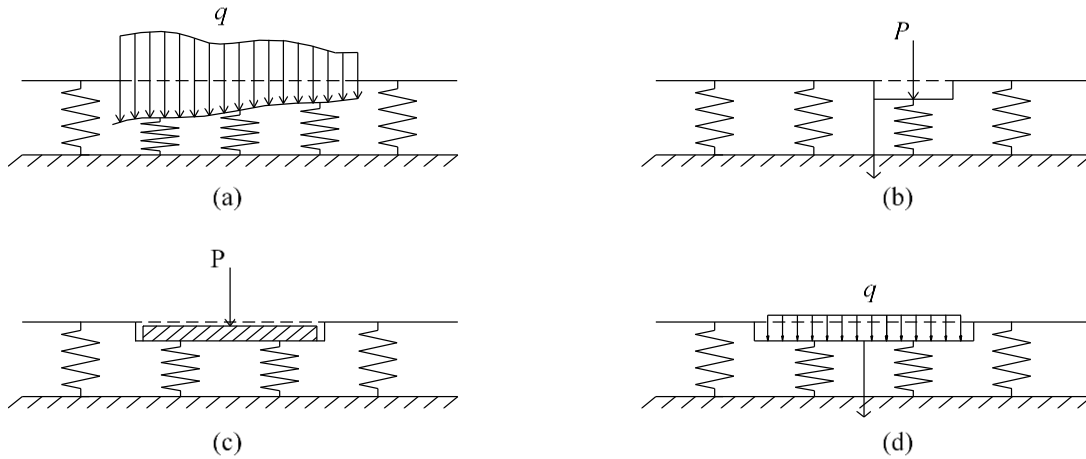
1.7.1. Bir Parametrelili Zemin Modelleri

Yapı-temel-zemin arasındaki etkileşim 1867 yılında Winkler tarafından ortaya konmuştur. Kendi ismi ile anılan modelde; zemin birbirine sonsuz yakın, lineer ve yaylar ile temsil edilmiştir. Zeminin düşey yer değiştirmesinin, w , sadece o noktaya etki eden taban basıncı p , ile idealleştirilmiş zemindeki yay sabitine, k , bağlı olduğu kabul edilmektedir. Winkler, zemin tepki fonksiyonunu Denklem 9'daki gibi ifade etmektedir (Winkler, 1867).

$$p(x, y) = kw(x, y) \quad (9)$$

Winkler modelinde zemini temsil edebilmek için yatak katsayısı, k , kullanılmaktadır. Bu parametre, bir birim düşey yer değiştirmenin birim alana gelen tepki kuvvetini ifade etmektedir. Birçok değişkenin etkilediği yatak katsayısını belirleyebilmek oldukça güçtür. Ancak Bowles (1996) gevşek kum, orta sıkılıkta kum, sıkı kum, killi orta sıkılıkta kum ve siltli orta sıkılıkta kum için geniş değer aralıkları için yatak katsayısı değerleri yayımlamıştır.

Modelin bir diğer eksikliği yayların birbirinden bağımsız olması nedeniyle bir noktaya etkiyen yükün farklı bölgelerdeki yaylara etkisinin olmamasıdır. Yük sadece etkidiği alandaki yayı sıkıştırmaktadır. Komşu yaylar bu yüklemekten etkilenmemektedir. Şekil 17'de bir parametrelili zemin modeline göre yer değiştirme durumları gösterilmektedir.



Şekil 17. Bir parametrelili zemin modeline göre yer değiştirme durumları, (a) Düzgün olmayan yayılı yük durumunda zeminin yer değiştirmesi, (b) Tekil yük durumunda zeminin yer değiştirmesi, (c) Rijit tabaka ile aktarılan yük altında zeminin yer değiştirmesi, (d) Düzgün yayılı yük altında zeminin yer değiştirmesi

Komşu yayların birbirine etkisi olmadığından düzgün yaylı yük altında plağın her noktasındaki yer değiştirmeler eşit çıkmakta, dolayısı ile dönme ve eğilme momenti oluşmamaktadır (Özgan, 2000). Model tekil yükler için kabul edilebilir sonuçlar verse de yaylı yük durumunda doğru ve gerçekçi sonuçlardan uzaklaşmaktadır. Winkler modelinin bu zaafılarına karşın, günümüzde ticari paket programların birçoğunda kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Computers and Structures Inc, 2020).

1.7.2. İki Parametrelili Zemin Modelleri

Bir parametrelili zemin modellerindeki eksiklikler ve tek parametreye bağlı oluşu nedeniyle bazı yük durumları için gerçek davranışı yansıtmadığını gören araştırmacılar iki parametrelili zemin modelleri geliştirmişlerdir. Bunlardan bazıları; Filonenko-Borodich modeli, Hetenyi modeli, Pasternak modeli ve Vlasov modelidir (Selvaduari, 1979).

İki parametrelili modeller adından da anlaşılacağı üzere iki parametreden oluşmaktadır. İlki, Winkler modelinde de bulunan yay sabiti, diğeri ise yaylar arasındaki etkileşimin temsil eden kayma tabakasıdır.

Filonenko-Borodich (1940) bir parametrelili zemin modelinin eksikliği olan yayların birbirinden bağımsız hareketini, T gerilmesine sahip elastik bir zar ile yaylar arasında süreklilik sağlayarak gidermeye çalışmıştır. Yatak katsayısının yanı sıra Denklem 10'dan de anlaşıldığı üzere T parametresi eklenmiştir. Zemin tepki fonksiyonu bu modelde;

$$p(x, y) = kw(x, y) - T\nabla^2 w(x, y) \quad (10)$$

ile ifade edilmektedir.

Hetenyi (1946) yaylar arasında ki sürekliliği sağlama için Winkler yayları üzerine D eğilme rijitliğine sahip bir plak olduğunu varsaymaktadır. Zemin tepki fonksiyonu;

$$p(x, y) = kw(x, y) - D\nabla^2 w(x, y) \quad (11)$$

ile ifade edilmektedir.

Pasternak (1954) Winkler yayları üzerinde sıkışmayan, sadece düşey yönde yer değiştirme yapabilen, kesme etkisinde deformasyona uğrayabilen bir kesme tabakası, G_s , dikkate alarak yaylar arasındaki sürekliliği sağlamıştır. Pasternak modeline ait denklem;

$$p(x, y) = kw(x, y) - G_S \nabla^2 w(x, y) \quad (12)$$

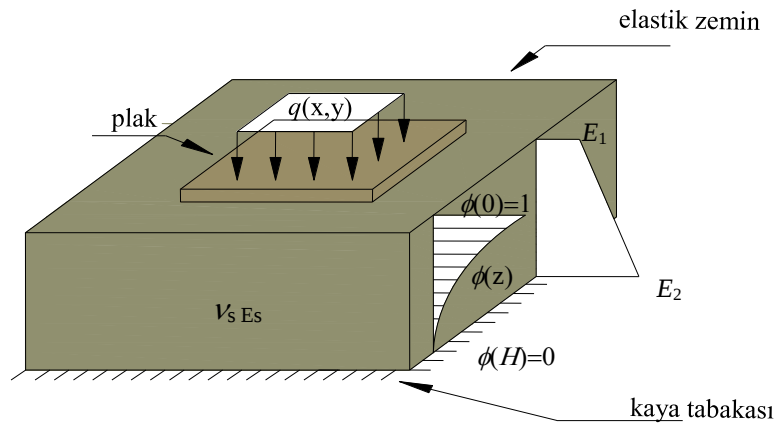
şeklinde ifade edilmektedir. Kayma tabakası izotropik olduğundan $G_X = G_Y = G_S$ 'dir.

Vlasov ve Leont'ev (1966) zemin modelinde, bir parametrelili zemin modellerine bir iyileştirme olarak zemin kayma parametresi, $2t$, ekleyerek yaylar arasındaki sürekliliği sağlamıştır.

İki parametrelili zemin modelleri Winkler modeline ek olarak yaylar arasındaki sürekliliği farklı yöntemlerle sağlamaya çalışmışlardır. Bu sayede kayma şekil değişimlerinde dikkate alınmıştır. Ancak modellerde bulunan parametrelerin sayısal değerlerini elde etmek güçtür. Bu sebeple hem bir parametrelili hem de iki parametrelili zemin modellerindeki eksiklikler araştırmacıları yeni modeller aramaya itmiştir.

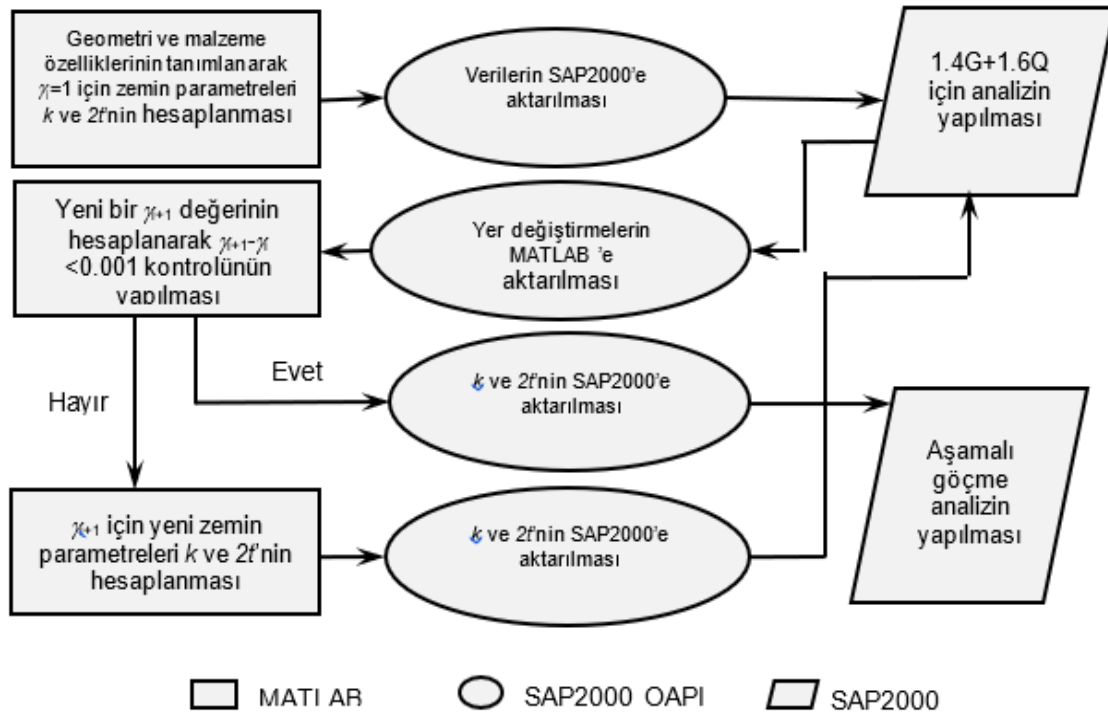
1.7.3. Geliştirilmiş Vlasov Modeli

Üç parametrelili zemin modeli, bir ve iki parametrelili zemin modelinde bulunan yay katsayısı k ve kayma parametresine, $2t$ ek olarak Vlasov ve Leont'ev tarafından tanımlanan γ boyutsuz parametresini de kullanmaktadır. Bu ifade zeminin k ve $2t$ parametrelerine bağlı olarak düşey yer değiştirme değişimini göstermektedir ancak yazarlar bu ifadenin nasıl hesaplanacağı konusunu eksik bırakmışlardır. Jones ve Xenophontos (1977) yapıda meydana gelen yer değiştirmeler ile γ arasındaki ilişkiden bahsetmişlerdir. Vallabhan ve Das (1988) ise Şekil 18'de görüldüğü gibi zemin parametreleri, geometriye, yükleme cinsine, malzeme özelliklerine ve zemin derinliği ile ilişkili bir yöntem geliştirmişlerdir.



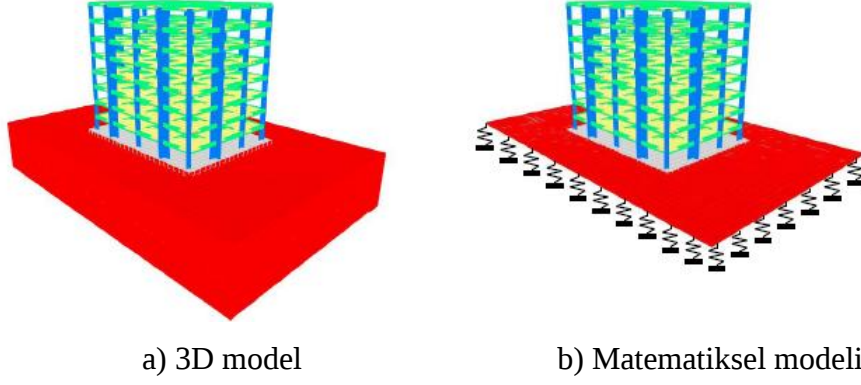
Şekil 18. Elastik zemine oturan plak şeması

Bu tezde Hamarat (2012)'in yaklaşımı kullanılarak MATLAB'de geliştirilen bir arayüz SAP2000 OAPI fonksiyonları sayesinde eş zamanlı kullanılmaktadır (Kılıçer, 2016). Geliştirilen bu arayüz ile MATLAB'te hesaplanan zemin parametreleri SAP2000 modeline girdi olarak verilmekte ve modelden çıktı olarak alınan yer değiştirmeler ile MATLAB'te yeni zemin parametreleri hesaplanmaktadır. Zemin yüzey parametresi daha önceden kullanıcı tarafından belirlenen bir hassasiyetle yakınsayana kadar bu ardışık işlem devam etmektedir. Bu tezde kullanılan hesap modeli Şekil 19'da verilmektedir. SAP2000 ortamında zeminin Geliştirilmiş Vlasov yöntemi ile modellenmesine ilişkin detaylara Hamarat (2012)'in çalışmasından ulaşılabilir.



Şekil 19. Zemin-yapı etkileşimine ait akış şeması

Yukarıda verilen diyagrama göre zemin parametreleri hesaplanan model aşamalı göçme analizine tabi tutulmaktadır. Şekil 20'de elastik zemine oturan çok katlı bir yapı örneği görülmektedir.



Şekil 20. Elastik zemine oturan plak örnekleri

1.8. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Günümüzde her ülkenin kendine özgü tasarım standartları bulunmaktadır. Genellikle bu standartlar, ölü yükler, hareketli yükler, deprem yükleri, rüzgâr yükleri gibi geleneksel yüklemeler altında tasarım ilkelerini içermektedir. Kimi ülkeler bulundukları coğrafyalara göre tsunami ve volkanik yüklemeleri de dikkate almaktadırlar. Oysaki bazı yapılar olağan dışı yük etkilerine maruz kalabilmektedir. Tüm yapı gruplarını bu olağanüstü yükleri dikkate alarak tasarlamak ekonomik olmaz. Ancak bu durumun önem derecesi yüksek binalar için büyük güvenlik zafiyetine yol açabilecek bir eksiklik oluşturabileceği tarihte yaşanan örneklerden anlaşılmaktadır.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında aşamalı göçme analizlerinde zemin etkilerinin dikkate alınmadığı görülmektedir. Oysaki zemin özelliklerinin yapının davranışını önemli derecede etkilediği çeşitli çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Özellikle zemin yumuşadıkça etkiler artmaktadır.

Bu tezde, yapılara etkiyen olağan dışı yüklemelerin yol açabileceği hasarı ve devamında meydana gelebilecek zincirleme göçme mekanizmasını zemin etkilerini de dikkate alarak değerlendirmek amaçlanmıştır. Aşamalı göçme analizleri UFC 4-023-03 rehberi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından desteklenen; 118M998 no'lu 'Yapı-Zemin Etkileşimini Dikkate Alarak Yapıların Aşamalı Göçme Riskinin Belirlenmesi' adlı proje ile eş zamanlı yürütülmüştür. Zemin-yapı etkileşimi, MATLAB ve SAP2000 programının OAPI fonksiyonları yardımıyla hazırlanan arayüzün eş zamanlı kullanılması ile hesaplamalara dâhil edilmiştir.

Sayısal örnekler için 2 adet betonarme, 2 adet çelik yapı olmak üzere 4 adet yapı seçilmiştir. Doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri dikkate alınarak SAP2000 programında farklı kolon kaldırma senaryolarında hem ankastre (zeminde) hem de farklı zemin tiplerinde analizler yapılmıştır.

İlk model 6 katlı betonarme konut binasıdır. 3 farklı kolon kaldırma senaryosu dikkate alınmıştır. İkinci modelde, hâlihazırda ülkemizde Millî Eğitim Bakanlığı tarafından inşa edilen betonarme tip okul projesi aşamalı göçme analizlerine tabi tutulmuştur. 2 farklı kolon kaldırma senaryosu uygulanmıştır. Üçüncü model, konut olarak kullanılan 10 katlı çelik bir yapıdır. 3 farklı kolon kaldırma senaryosu uygulanmıştır. Son modelde ise ofis olarak kullanılan 20 katlı çelik bir yapı dikkate alınmıştır. 2 farklı kolon kaldırma senaryosu uygulanmıştır. Diğer örneklerden farklı olarak her bir senaryoda 2 adet kolon aynı anda kaldırılmıştır. Farklı kolon kaldırma senaryolarında yapıların aşamalı göçme dayanımları karşılaştırılmış, zemin etkileri incelenmiştir. Statik çözümler için, düğüm noktası yer değiştirmeleri, yer değiştirme-zaman grafikleri ve moment değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Dinamik çözümlerde ise yapıların plastik mafsallı durumları, düğüm noktası yer değiştirmeleri, yer değiştirme-zaman grafikleri ve moment değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu bölümde, 2 adet çelik ve 2 adet betonarme olmak üzere toplam 4 adet yapı örneği belirlenmiş ve aşamalı göçme riskleri araştırılmıştır. Yapıların aşamalı göçme analizleri UFC 4-023-03 rehberinde yer alan doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Örnek yapılar, 3 farklı zemin tipi ve ankastre olmak üzere çeşitli kolon kaldırma senaryoları için incelenmiştir. Aşamalı göçme analizlerinden önce yapılar ideCAD-Statik.v10 ile modellenerek yürürlükteki yönetmeliklere uygun hale getirilmiştir. İncelenen örnekler,

- Doğrusal statik analiz yöntemi kullanılarak,
 - ✓ Tabanda ankastre varsayımı ile,
 - ✓ Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak,
- Doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi kullanılarak,
 - ✓ Tabanda ankastre varsayımı ile,
 - ✓ Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak,

ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Zemin etkisi altında incelenen modeller farklı zemin tipleri kullanılarak analizler çeşitlendirilmiştir.

Tez kapsamında seçilen ilk örnek, analiz prosedürünün daha iyi anlaşılabilmesi için planda simetrik olan 6 katlı betonarme konut binasıdır. 3 farklı kolon kaldırma senaryosu için incelenmiştir. İkinci örnek, ülkemizin birçok bölgesinde hâlihazırda uygulanmış tipik bir ilköğretim okulu binasıdır. Bodrum, zemin ve 3 kattan oluşmakta, asimetrik bir geometriye sahip betonarme yapı perde, kolon ve kirişlerden oluşmaktadır. Farklı katlarda 2 kolon kaldırma senaryosu için aşamalı göçme analizleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü örnek, çelik taşıyıcı sisteme sahip bir yapıdır. Konut olarak tasarlanan yapı, 10 katlıdır. Kolon kesitleri yükseklik arttıkça azalan yapı 3 farklı kolon kaldırma senaryosu için incelenmiştir. Son örnekte ise merkezi çaprazlı 20 katlı bir çelik ofis binası incelenmiştir. Yapının giriş kat yüksekliği diğer katlara göre farklılık göstermektedir. 3 farklı kolon kaldırma senaryosu dikkate alınmıştır.

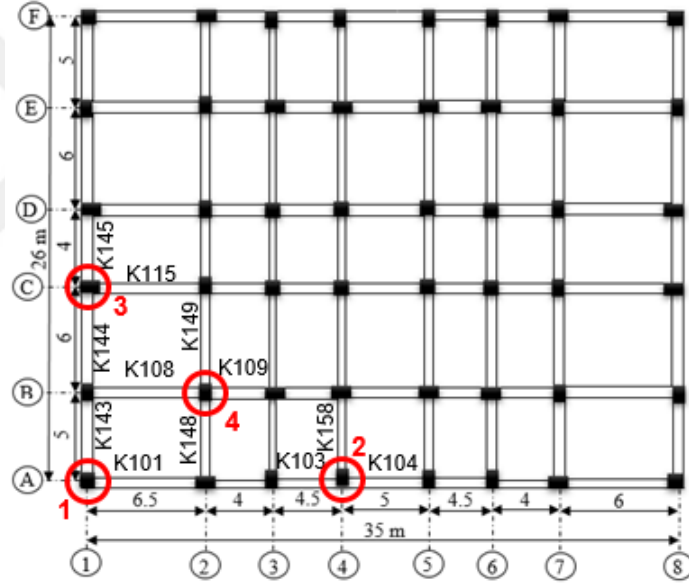
SAP2000 programında kolonlar ve kirişler çubuk elemanlar ile döşemeler ve zemin alan elemanlar ile modellenmiştir. MATLAB programında kodlanan bir arayüz ile iki program arasında veri alışverişine olanak sağlanarak zemin etkileri analizlerde hesaba

katılmıştır. Alan elemanlarının sonlu eleman ağına karar vermeden önce bir yakınsama çalışması yapılmış ve her iki doğrultuda 0.5 m'lik sonlu elemanlara bölünmüştür.

2.1. 6 Katlı Betonarme Konut Binası

İlk sayısal örnek Yön (2017)'ün çalışmasından alınmıştır. Betonarme olan 6 katlı yapı konut olarak tasarlanmış olup her iki yönde simetriktir (Şekil 21). Betonun Elastisite Modülü 31 GPa, birim hacim ağırlığı ise 25 kN/m³ alınmıştır.

UFC 4-023-03 (2016) rehberinin Alternatif Yol metodu başlığı altında çeşitli kolon kaldırma senaryoları önerilmektedir. Birinci bölümde 1.5 başlığı altında da bahsedilen bu öneriler doğrultusunda belirlenen kolon kaldırma senaryoları Şekil 21'de verilmektedir.



Şekil 21. 6 katlı betonarme konut binası kolon kaldırma senaryoları

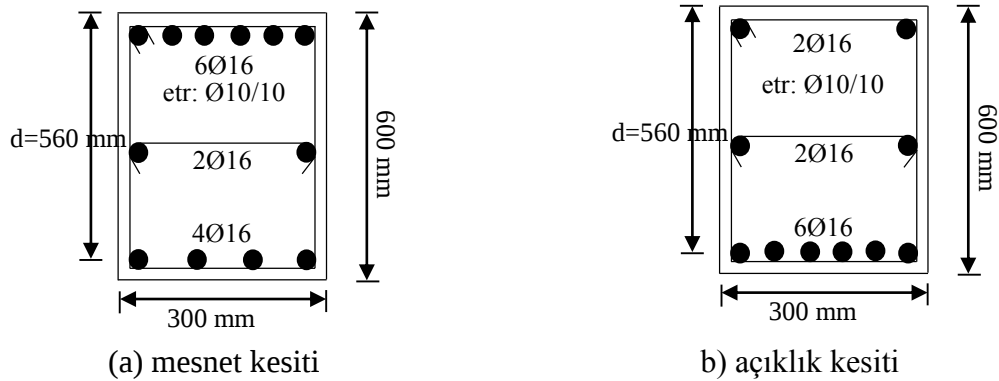
Şekilden de görüldüğü gibi köşe kolon (Senaryo 1), bina uzun kenarının ortasından bir dış kolon (Senaryo 2), bina kısa kenarının ortasından bir dış kolon (Senaryo 3) ve iç kolon (Senaryo 4) olmak üzere 4 farklı şekilde birbirlerinden bağımsız kolon kaldırma senaryonu belirlenmiştir.

Çerçeve sistemi oluşturan kolon ve kirişlerin donatı detayları Şekil 22 ve Şekil 23'te verilmektedir. Tüm kirişlerin mesnet kesitlerinde donatı düzeni aynıdır. Kolonların boyut ve donatı düzeni tüm katlar boyunca sabittir.

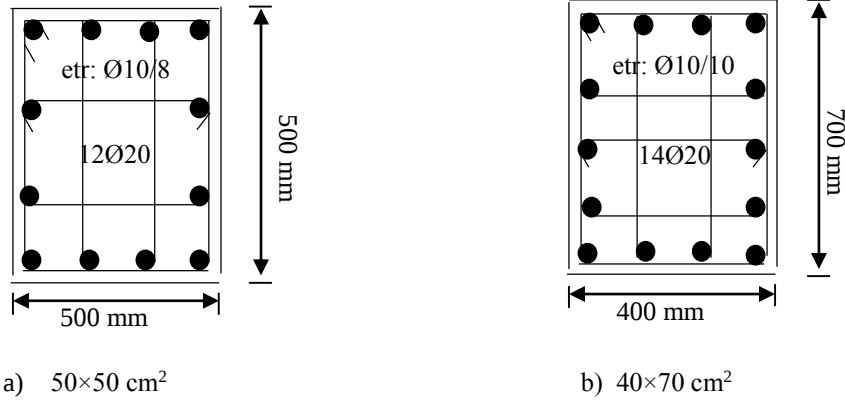
Tablo 5. 6 katlı betonarme konut binasına ait geometri ve malzeme özellikleri

	Özellikler
Yapı cinsi	Konut
Malzemesi	Betonarme
Kat adeti	6 kat
Planda boyutları (m)	26×35
Beton sınıfı	C25
Donatı sınıfı	B420C
Kat yüksekliği (m)	3
Kolon boyutları (cm)	50×50, 40×70 ve 70×40
Kiriş boyutları (cm)	30×60
Paspayı (cm)	4
Döşeme kalınlığı (cm)	15
Bulunduğu bölge	Ankara-Kızılay
Yapı süneklik düzeyi	Yüksek
Deprem yer hareketi düzeyi	DD-2
Yerel zemin sınıfı	ZC
Enlem	39.920812
Boylam	32.854067
Zemin derinliği (m)	25
Zemin Poisson oranı	0.35
Zemin elastisite modülü (kN/m ²)	18000 kN/m ² (gevşek kum) 90000 kN/m ² (yoğun kum ve çakıl) 180000 kN/m ² (sert kil)
Döşeme ve perde sonlu eleman ağı	1 m × 1 m

Tablo 5’de ilk betonarme konut binasına ait geometrik ve malzeme özelliklerinin yanı sıra zemin özellikleri de verilmektedir. Yukarıda görüldüğü gibi örnekte 3 farklı zemin elastisite modülü belirlenmiştir.



Şekil 22. 6 katlı betonarme konut binası kiriş kesitleri ve donatı detayları



Şekil 23. 6 katlı betonarme konut binası kolon kesitleri ve donatı detayları

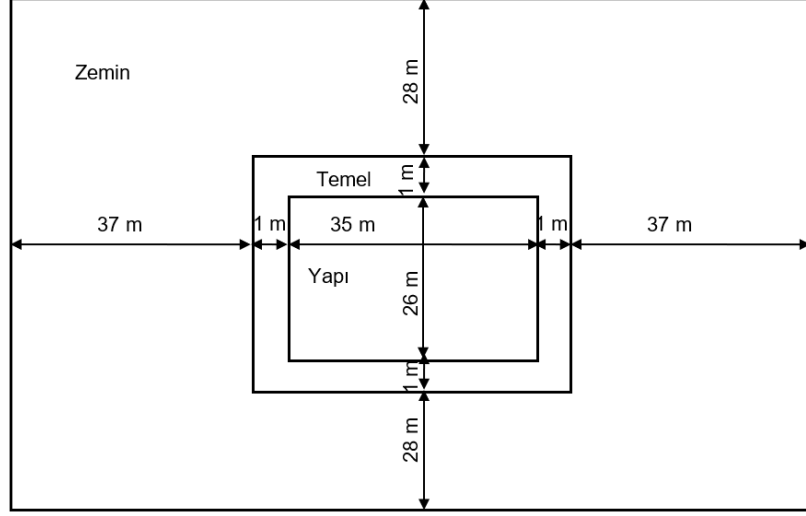
Bilindiği gibi SAP2000 programı, girilen malzeme ve kesit özelliklerine göre yapı öz ağırlığını otomatik olarak hesaplayabilmektedir. Ancak yapının kendi ağırlığı, SAP2000 programının ‘Self Weight Multiplier’ kısmına ‘0’ girilerek otomatik hesaplattırılmamış, elle yapılan hesaplar sonucunda dış yük olarak modele tanımlanmıştır. Çatı katı için sabit yük 6.80 kN/m², hareketli yük 1.5 kN/m² ara katlar için sabit yük 7.87 kN/m² hareketli yük 2.0 kN/m² dikkate alınmıştır.

Tüm döşemelere çatı ve ara katlar için yukarıda verilen yükler, Denklem 4 ve Denklem 5’de verilen yük birleşimleri kullanılarak kirişlere etkitilmiştir. Ayrıca kiriş üzerinde 9 kN/m çizgisel yük dikkate alınmıştır. Döşemeler her iki doğrultuda 0.5 m’lik sonlu elemanlara bölünmüştür.

Tablo 5’de verilen bilgiler dikkate alınarak yapı TBDY2018’e göre analiz edilmiştir. Yapı elemanlarının boyutlarının ve donatı miktarlarının deprem yönetmeliğimize göre yeterli olduğu, düzensizlik durumlarını içermediği ve görelî kat ötelemelerinin yönetmelik sınırlarını aşmadığı görülmüştür.

Yapısal analizlerde zemin etkilerinin üst yapıda çeşitli değişikliklere yol açtığı bilinmektedir. Bu nedenle zemin etkisini görebilmek adına yapı temel altı zemini dikkate alınmadan ve alınarak ayrı ayrı modellenmiştir. Zemin etkisi dikkate alınarak yapılan analizlerde Geliştirilmiş Vlasov yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilmiş Vlasov Zemin modelinin detayları 1.7.3 başlığı altında verilmektedir.

Dikkate alınan yapı, temel ve zemin sisteminin üstten görünüşü ve boyutları Şekil 24’de verilmektedir.



Şekil 24. Tanımlanan temel zemin boyutları

Yapı 26×35 m ölçülerine sahiptir. Tanımlanan temel, yapının oturma alanından her iki yönde 1'er metre ampaktan yapacak şekilde boyutlandırılmış ve temel kalınlığı 0.75 m olarak dikkate alınmıştır. Zemin etki alanı ise temelin 3 katı olacak şekilde x yönünde 111m y yönünde ise 84 metre'dir.

2.1.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm

Doğrusal statik analiz yöntemi ile ilgili hesap adımları 1.6.1. başlığı altında açıklanmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında Tablo 1'den doğrusal betonarme kiriş modelleri için m faktörün üst limiti alınması gerekmektedir. Bunun için öncelikle kiriş donatı oranları ve tabloda verilen bazı ifadeler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{6 \times \pi \times \frac{16^2}{4}}{300 \times 560} = 0.00718$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{b_w d} = \frac{4 \times \pi \times \frac{16^2}{4}}{300 \times 560} = 0.00479$$

$$\rho_{bal} = 0.85 k_1 \frac{f_c}{f_y} \left(\frac{700}{700 + f_y} \right) = 0.85 \times 0.85 \times \frac{25}{420} \times \left(\frac{700}{700 + 420} \right) = 0.02688$$

$$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}} = \frac{0.00718 - 0.00479}{0.02688} = 0.089$$

$$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}} = \frac{209024}{300 \times 560 \times \sqrt{25}} = 0.248$$

0.089 ve 0.248 oranları kullanılarak ve Tablo 1’de verilen değerler arasında doğrusal oranlama yaparak m değerinin üst limiti 10.32 olarak hesaplanmıştır.

İncelenen yapı betonarme çerçevesi bir yapı olduğu için yük artım faktörü (Q_{LD}) Tablo 2’den 13.19 olarak hesaplanmıştır. Kolon kaldırma senaryoları uygulandığında, kaldırılan kolon etrafındaki döşemelere (G_{LD}) ve uzak döşemelere atanacak düşey yükler (G), yük artırım faktörü (Q_{LD}), Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılarak Tablo 6’daki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 6. G ve G_{LD} döşeme yükleri

	G (kN/m ²)	G_{LD} (kN/m ²)
Çatı katı	12.51	165.01
Ara katlar	14.06	185.45

Tüm bu hususlar dikkate alınarak A1 kolonu kaldırma senaryosu için model hem ankastre hem de 3 farklı zemin türleri dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Doğrusal statik analize göre farklı zemin tipleri için elde edilen m değerleri Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo incelendiğinde A1 ve A4 kolon kaldırma senaryolarında zeminli ve ankastre analizler için elde edilen m oranlarının $\pm$ %5 oranında değiştiği görülmüştür. A1 ve C1 kolon kaldırma senaryolarında 10’ar adet kiriş başarısız olurken en üst kat kirişleri sınır değerinin altında kalmıştır. Son olarak B2 iç kolonu kaldırma senaryosundan elde edilen m değerleri tabanda ankastre kabulü ile elde edilenlere oldukça yakındır. Bütün kirişlerin m değerleri, m -faktör değerinden yüksek elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen m değerli tüm çözümlerde birbirine çok yakındır.

Dolayısıyla, bu örnek özelinde, LSP yöntemi kullanılarak analiz edilen her bir kolon kaldırma senaryosu birlikte değerlendirildiğinde, zemin-yapı etkileşiminin ya da zemin türündeki değişimin aşamalı göçme riski üzerinde kayda değer ölçüde bir etki oluşturmadığı söylenebilir.

Tablo 7. A1, A4, C1 ve B2 kolonları kaldırma senaryoları m oranlarının zemin cinsi ile değişimi

A1 kolon kaldırma senaryosu					A4 kolon kaldırma senaryosu				
Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)				Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)			
	Ankastre	180000	90000	18000		Ankastre	180000	90000	18000
K101	11.59	11.15	11.14	11.10	K103-4	9.41	9.34	9.38	9.48
K201	11.36	11.14	11.13	11.08	K203-4	9.18	9.19	9.24	9.33
K301	11.06	10.85	10.84	10.80	K303-4	8.63	8.67	8.72	8.81
K401	10.78	10.65	10.64	10.61	K403-4	8.26	8.32	8.37	8.46
K501	10.48	10.64	10.51	10.63	K503-4	8.15	8.27	8.31	8.40
K601	8.71	8.95	8.95	8.92	K603-4	6.37	6.37	6.39	6.44
K143	12.57	12.06	12.06	12.08	K158	9.65	9.45	9.36	9.19
K243	12.30	11.84	12.26	12.29	K258	9.52	9.28	9.20	9.04
K343	11.78	11.71	11.72	11.75	K358	9.01	8.75	8.67	8.51
K443	11.30	11.36	11.37	11.39	K458	8.56	8.39	8.31	8.16
K543	10.83	11.33	11.34	11.36	K558	8.30	8.33	8.25	8.10
K643	8.61	9.05	9.05	9.07	K658	6.35	6.32	6.26	6.15
C1 kolon kaldırma senaryosu					B2 kolon kaldırma senaryosu				
Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)				Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)			
	Ankastre	180000	90000	18000		Ankastre	180000	90000	18000
K144-5	14.37	14.29	14.31	14.34	K108-9	20.93	20.40	20.29	20.03
K244-5	14.36	14.48	14.29	14.11	K208-9	20.63	20.56	20.01	20.15
K344-5	13.54	13.62	13.63	13.66	K308-9	19.36	19.32	19.21	18.94
K444-5	12.98	13.06	13.07	13.09	K408-9	18.42	18.52	18.41	18.16
K544-5	12.95	13.05	13.06	13.08	K508-9	18.08	18.55	18.36	18.20
K644-5	9.80	9.72	9.71	9.71	K608-9	13.95	14.28	14.20	14.01
K115	13.95	13.44	13.34	13.12	K148-9	18.35	18.05	17.99	17.85
K215	13.51	13.13	13.02	12.81	K248-9	17.81	17.58	17.51	17.35
K315	12.93	12.63	12.53	12.33	K348-9	17.09	17.03	16.95	16.81
K415	12.51	12.29	12.19	11.99	K448-9	16.59	16.62	16.55	16.41
K515	12.34	12.24	12.14	11.93	K548-9	16.50	16.67	16.19	16.26
K615	9.83	9.68	9.60	9.44	K648-9	13.69	13.79	13.72	13.60

Seçilen 4 adet kolon kaldırma senaryoları hem ankastre hem de 3 farklı zeminli durumları için yapıldığında kolonun kaldırıldığı düğüm noktasında elde edilen düşey yer değiştirme değerleri Tablo 8’de verilmektedir.

Tablo 8. LSP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)

	A1 kolonu	A4 kolonu	C1 kolonu	B2 kolonu
Ankastre	9.89	6.34	9.48	11.90
$E_s = 180000 \text{ kN/m}^2$	10.28	7.82	11.26	14.33
$E_s = 90000 \text{ kN/m}^2$	10.78	8.44	11.95	15.34
$E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$	12.57	10.61	14.36	18.83

Ankastre ve zemin elastisite modülü sırasıyla 180000 kN/m², 90000 kN/m², 18000 kN/m² olarak dikkate alınan yapı modellerinin kaldırılan kolana bağlanan düğüm noktalarının düşey yer değiştirmeleri beklenildiği gibi zemin yumuşadıkça artmaktadır.

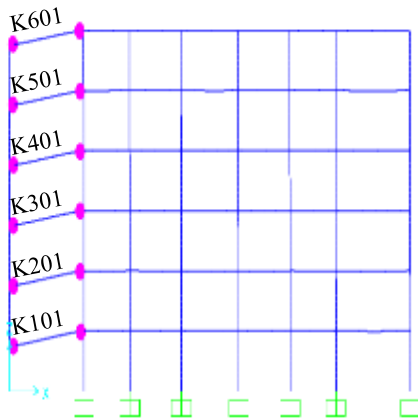
2.1.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm

Model, aynı zemin türleri ve kolon kaldırma senaryoları için doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ile yeniden incelenmiştir. Zeminli ve ankastre çözümlerden elde edilen periyotlar Tablo 9’da verilmektedir.

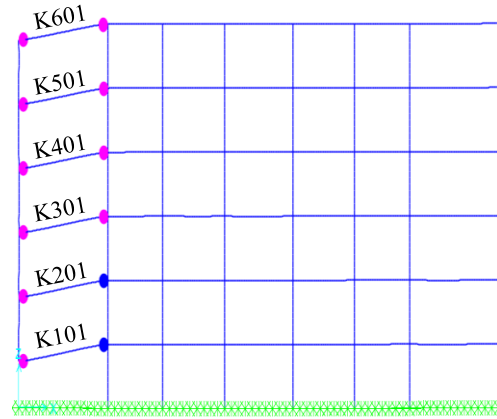
Tablo 9. Doğal titreşim periyotları

	$T_{1x}(sn)$	$T_{1y}(sn)$	$T_{2x}(sn)$	$T_{2y}(sn)$
Ankastre	0.73448	0.74301	0.23674	0.23753
$E_s = 180000 \text{ kN/m}^2$	0.74405	0.75684	0.23792	0.23881
$E_s = 90000 \text{ kN/m}^2$	0.75026	0.76607	0.23821	0.23907
$E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$	0.79845	0.83405	0.28114	0.38340

Zemin cinsi yumuşadıkça periyotlar da artış olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi sert zeminlerde doğal titreşim periyodu daha az elde edilmiştir. A1 köşe kolonu kaldırma senaryosu için 3 farklı zemin türü ve ankastre model dikkate alınarak doğrusal olmayan dinamik analize göre elde edilen plastik mafsalları x-z düzlemi için Şekil 25’de y-z düzlemi için Şekil 26’da, +3.00 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 27’de verilmektedir.



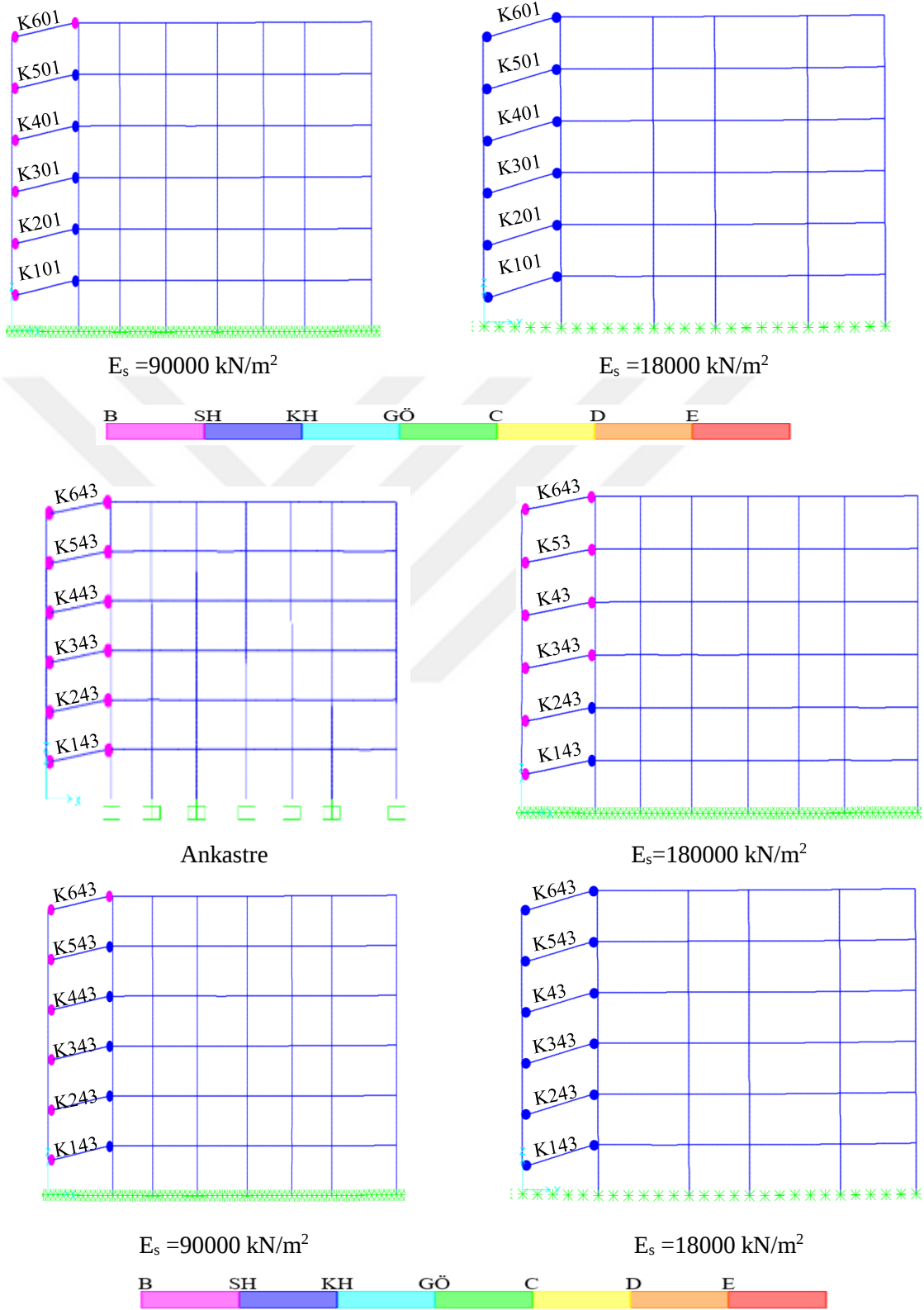
Ankastre



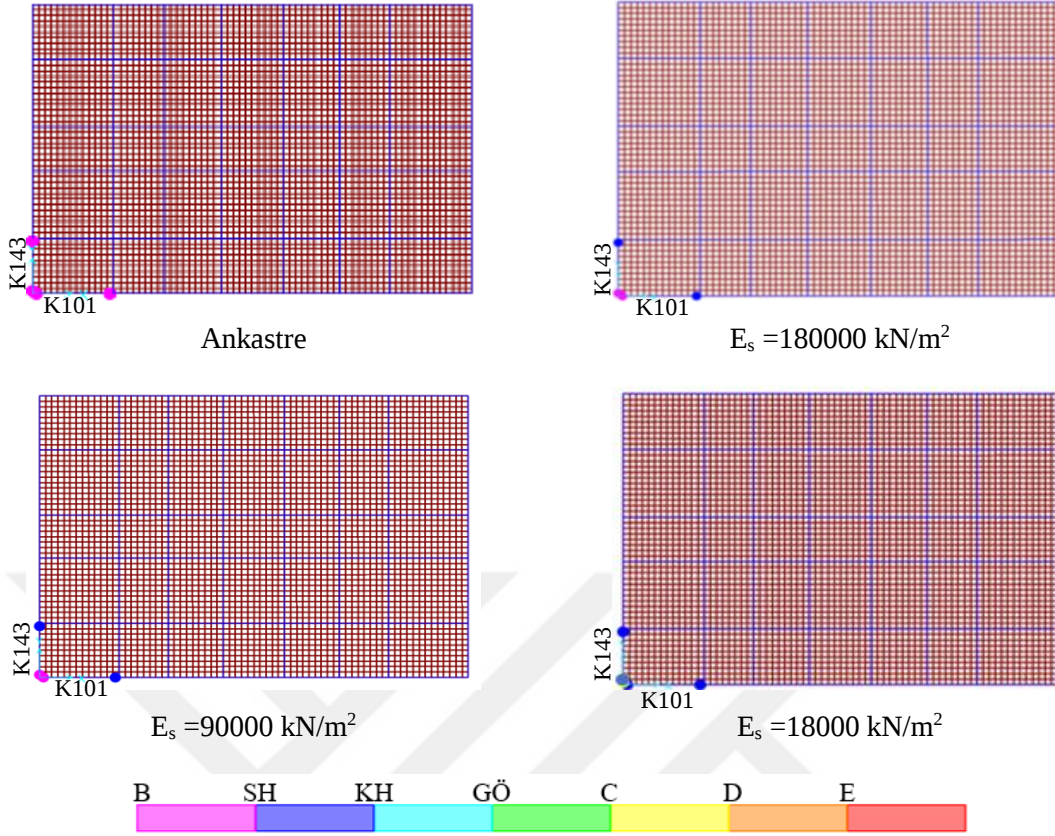
$E_s = 180000 \text{ kN/m}^2$

Şekil 25. A1 kolonu kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsalları oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Şekil 25'in devamı



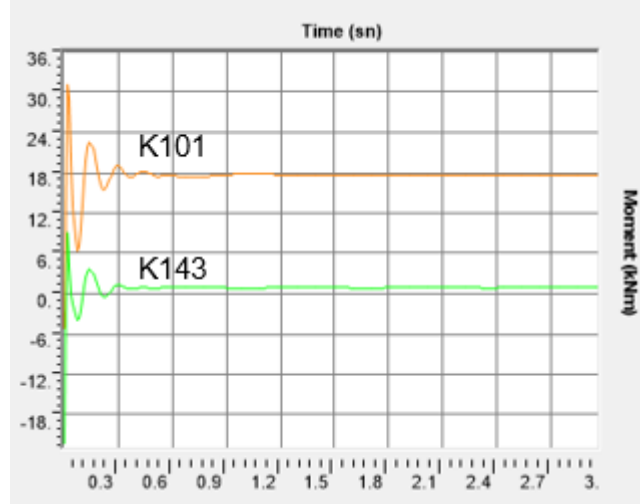
Şekil 26. A1 kolonu kaldırma senaryosu için y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 27. A1 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

A1 köşe kolonu kaldırma senaryosu analiz sonuçlarından görüldüğü üzere zemin yumuşadıkça (zemin elastisite modülü azaldıkça) her iki düzleminde de kiriş plastik mafsallarında dönmeler artmış ve oluşan hasarlar belirgin hasar bölgesine geçmiştir. Bu durum zemin yumuşadıkça plastik dönmelerin daha da büyüdüğünü göstermektedir. x-y düzlemi +3.00 kotunda ise yapının kat seviyesi boyunca sadece kaldırılan kolona bağlanan tüm kirişlerde plastik mafsall (pembe ve mavi) oluşumu gözlenmiştir. Mafsallaşma yapının diğer kısımlarına yayılmamıştır.

Tabanda ankastre kabulü ile yapılan analiz sonucunda kaldırılan köşe kolonuna bağlanan birinci kat K101 ve K143 kirişleri için açıklık momentlerinin 0-3 sn'lik zaman dilimindeki değişimi Şekil 28'de görülmektedir.



Şekil 28. A1 kolonunun kaldırılması halinde K101 ve K143 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi

K101 kirişi kolonun kaldırıldığı anda -5.087 kNm’lik momente maruz kalmaktadır. 0.02 sn civarında ise 31.12 kNm’lik ters işaretli moment oluşmaktadır. Benzer durum K143 kirişinde de görülmektedir. Kolon kaldırılır kaldırılmaz oluşan moment değeri -22.20 kNm iken 0.02 sn civarlarında moment işaret değiştirerek 8.99 kNm değerine ulaşmaktadır. Her iki kiriş moment değerlerindeki salınım yaklaşık 0.3 sn’den sonra azalarak neredeyse sabit bir değer almaktadır. Bu durum ani etkinin ortadan kalktığını ve elemanın denge durumuna geldiğini göstermektedir.

A1 kolonu kaldırılma senaryosu doğrusal statik analiz yöntemi kullanılarak uygulandığında mevcut hali ile yetersiz görünen yapının doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemine göre analizinde aşamalı göçme riskinin bulunmadığı ve kiriş kesitlerinin projedeki hali ile yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

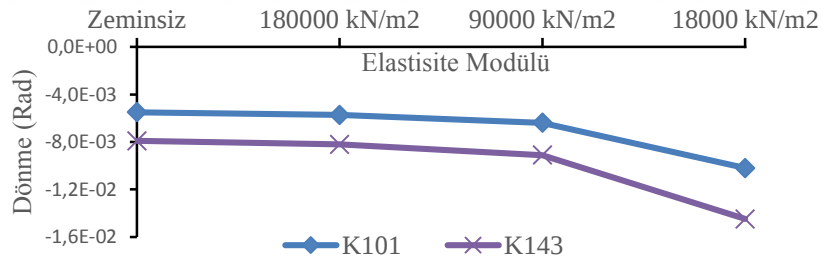
Doğrusal statik analiz yöntemi ile çözümde yetersiz kalan kirişler boyut ve donatıları artırılarak aşamalı göçmeye dirençli hale getirilmiştir. Her iki analiz yöntemi için yeterli kesitler ve donatılar Tablo 10’da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 10. Aşamalı göçme direncini sağlayan kirişlerin kesit ve donatıları

	LSP		NDP	
	Boyut	Donatı	Boyut	Donatı
K101	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K201	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K301	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K401	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K501	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K601	30×60	6Ø16	30×60	6Ø16
K143	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K243	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K343	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K443	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K543	30×80	6Ø18	30×60	6Ø16
K643	30×60	6Ø16	30×60	6Ø16

Tablodan görüldüğü gibi doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi için gerekli koşulları sağlayan kirişlerden bazıları doğrusal statik analiz yöntemi için yetersiz kalmış ve kesit ya da donatı miktarları değiştirilmiştir.

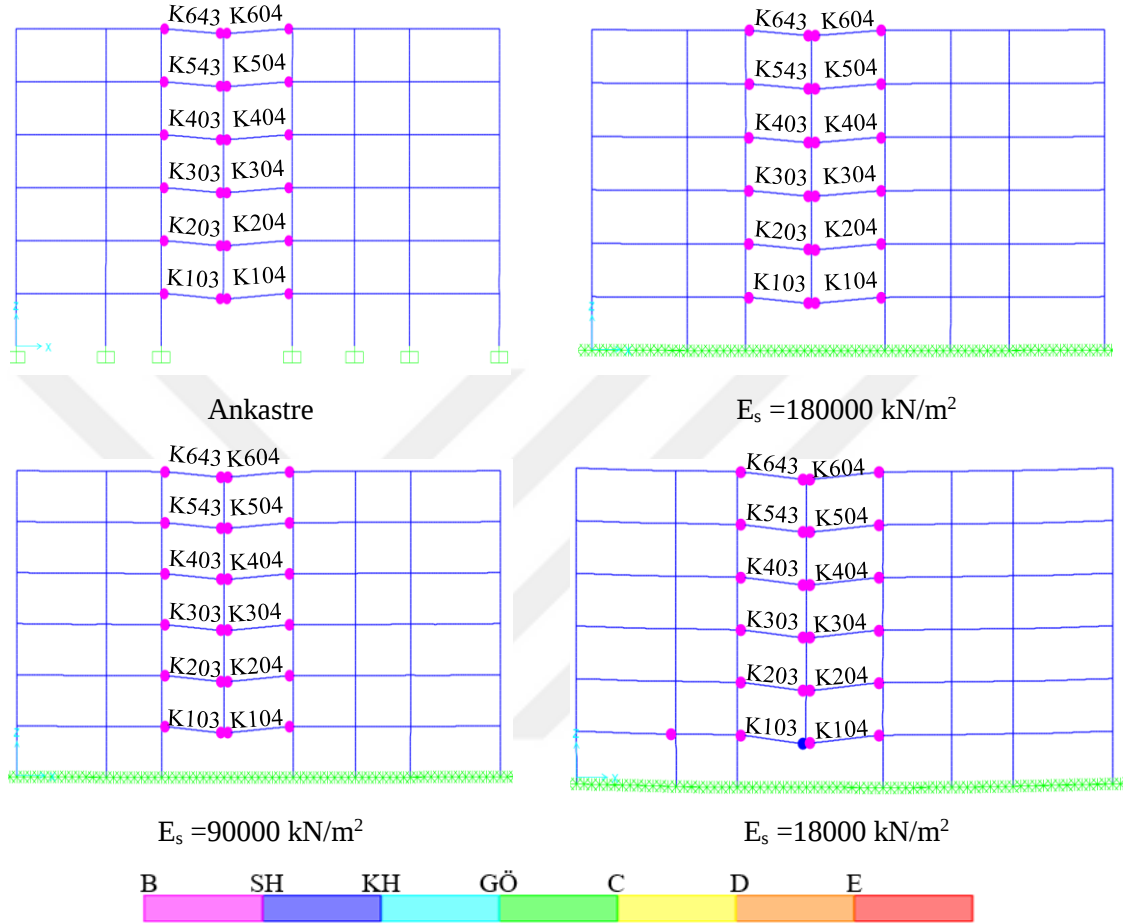
Kaldırılan kolona bağlanan (K101 ve K143) kirişlerin uzak düğüm noktası için plastik dönme değerleri Şekil 29’da verilmektedir.



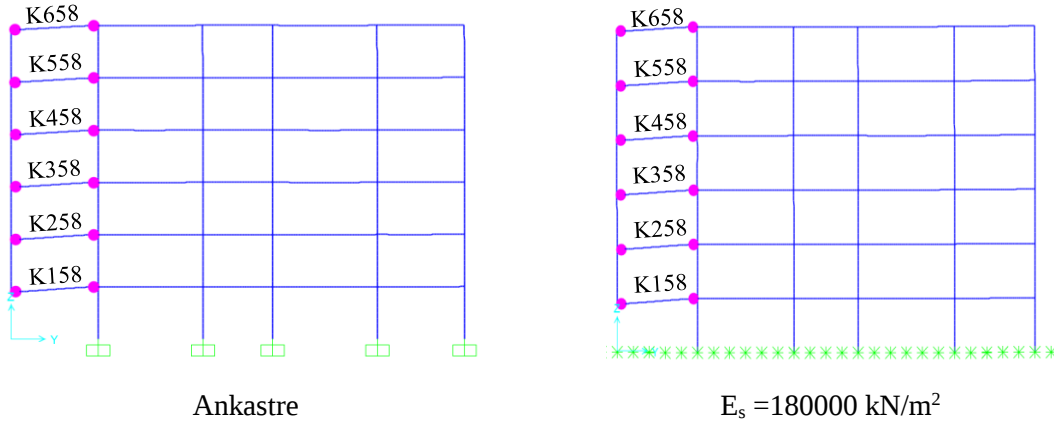
Şekil 29. A1 kolonunun kaldırılması halinde K101 ve K143 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi

Görüldüğü gibi plastik dönmelerin sayısal değerleri de yukarıda plastik mafsallara göre yapılan yorumlara benzerlik taşımaktadır. Zemin elastisite modülü azaldıkça, yani tabanda ankastre varsayımından uzaklaşıldıkça, dönmeler artmaktadır. Özellikle elastisite modülü en düşük zeminde kiriş dönme değerleri sert zemine göre yaklaşık 2 katından fazla artmıştır. Grafikten yapı-zemin etkileşiminin aşamalı göçme analizi sonuçları üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir.

İkinci olarak seçilen A4 kolon kaldırma senaryosu için doğrusal olmayan dinamik analize göre elde edilen plastik mafsalları gösteren x-z düzlemi için Şekil 30'da y-z düzlemi için Şekil 31'de, +3.00 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 32'de verilmektedir.

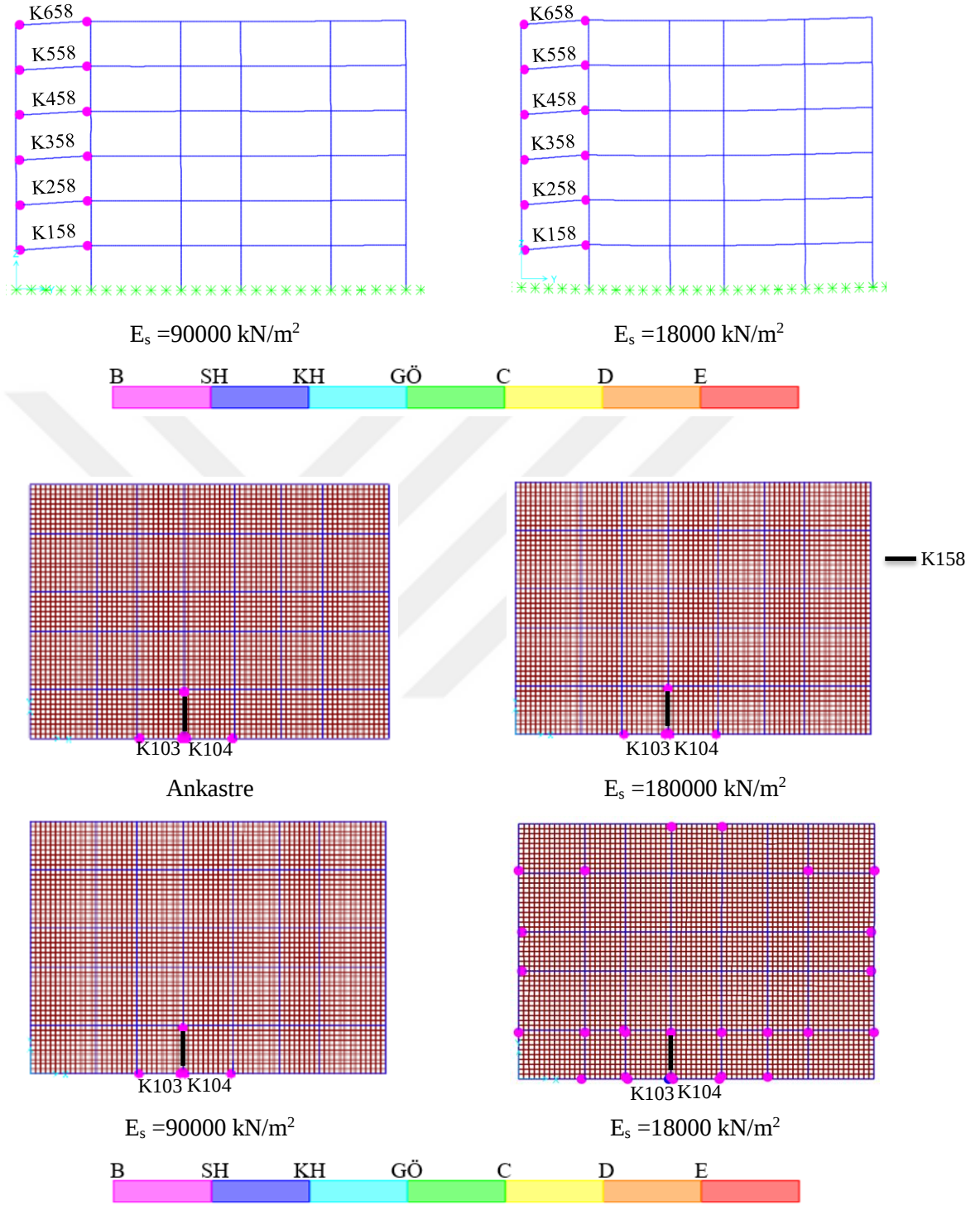


Şekil 30. A4 kolonu kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsalları oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 31. A4 kolonu kaldırma senaryosu için y-z düzleminde plastik mafsalları oluşumlarının zemin cinsi ile değişim

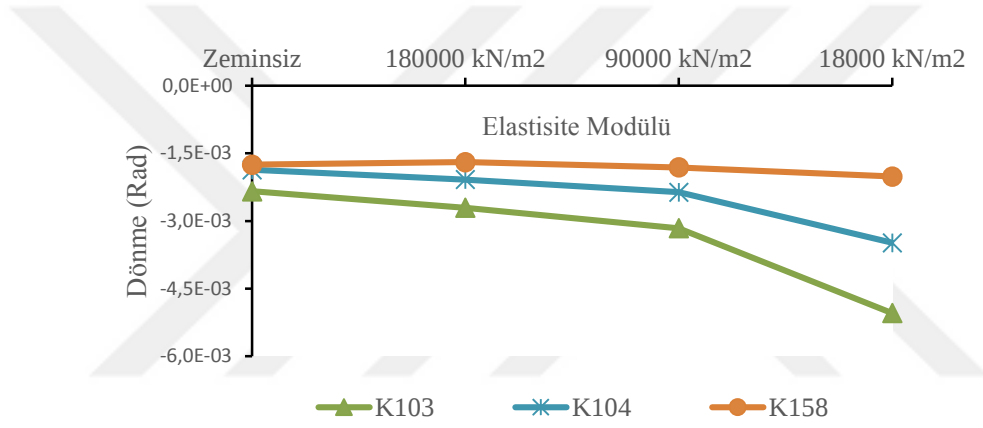
Şekil 31'in devamı



Şekil 32. A4 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Zemin elastisite modülünün azalması (zemin yumuşaması) plastik dönmeleri arttırmış ancak bu artış plastik mafsal hasar seviyelerinin değişmesine neden olacak mertebelere ulaşmamıştır. x-z düzleminde verilen çerçevelere bakıldığında yumuşak zemin olan $E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$ için yapının ilk kat kirişinde plastik mafsal dönmesi (mavi) belirgin hasar seviyesine geçmiştir. Özellikle x-y düzlemi +3.00 kotu $E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$ plastik mafsal durumuna bakıldığında yapının diğer kısımlarında mafsallaşmalar da görülmüştür. K103, K104 ve K158 kirişleri yapının diğer elemanlarına yükü paylaştırarak hasarı yaymış ve ayakta kalmayı başarmıştır.

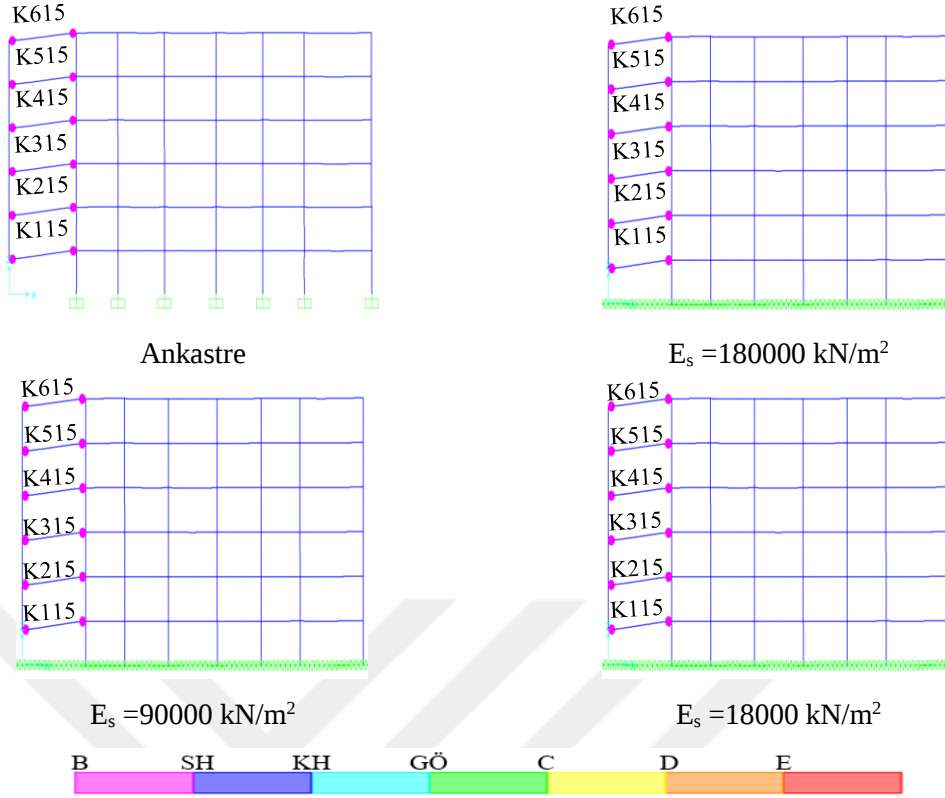
A4 kolonuna bağlanan K103, K104 ve K158 kirişlere ait plastik dönme değerleri farklı zemin elastisite modülü için Şekil 33’de verilmektedir.



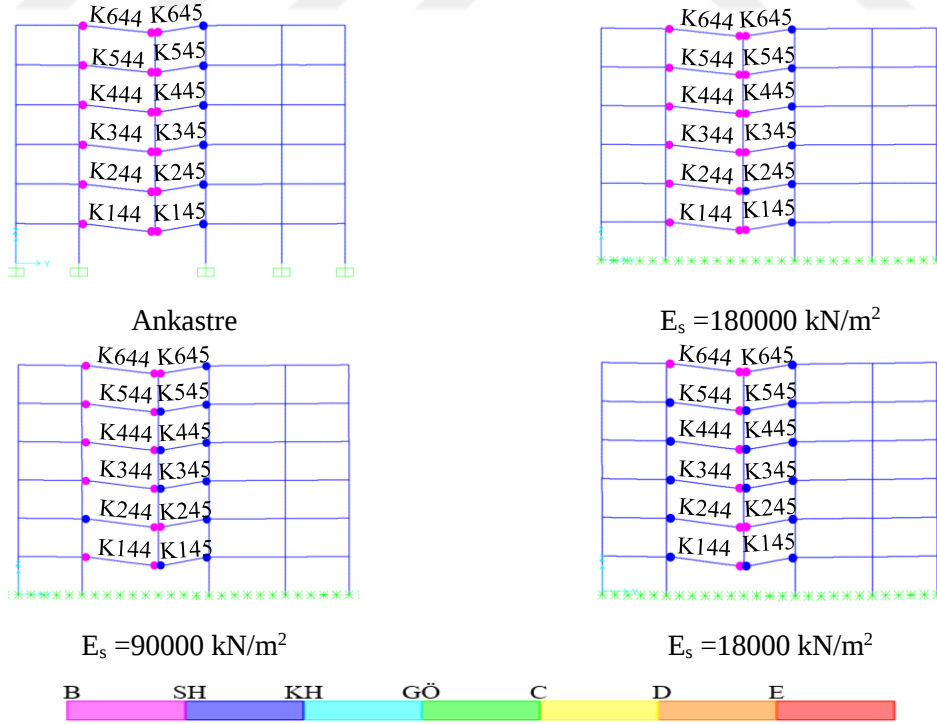
Şekil 33. A4 kolonunun kaldırılması halinde K103, K104 ve K158 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi

Şekilden anlaşılabileceği üzere en büyük plastik dönme x-z düzleminde bulunan K103 kirişinde meydana gelmiştir. $E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$ olduğunda K103 kirişinde plastik mafsal dönmesi belirgin hasar bölgesine geçmiştir. K104 kirişi de K103 benzer davranışa da y-z düzleminde bulunan K158 kirişinde zemine bağlı plastik dönme artışı sınırlı kalmıştır. Zemin etkisinin kirişler üzerindeki etkisi kolaylıkla görülebilmektedir.

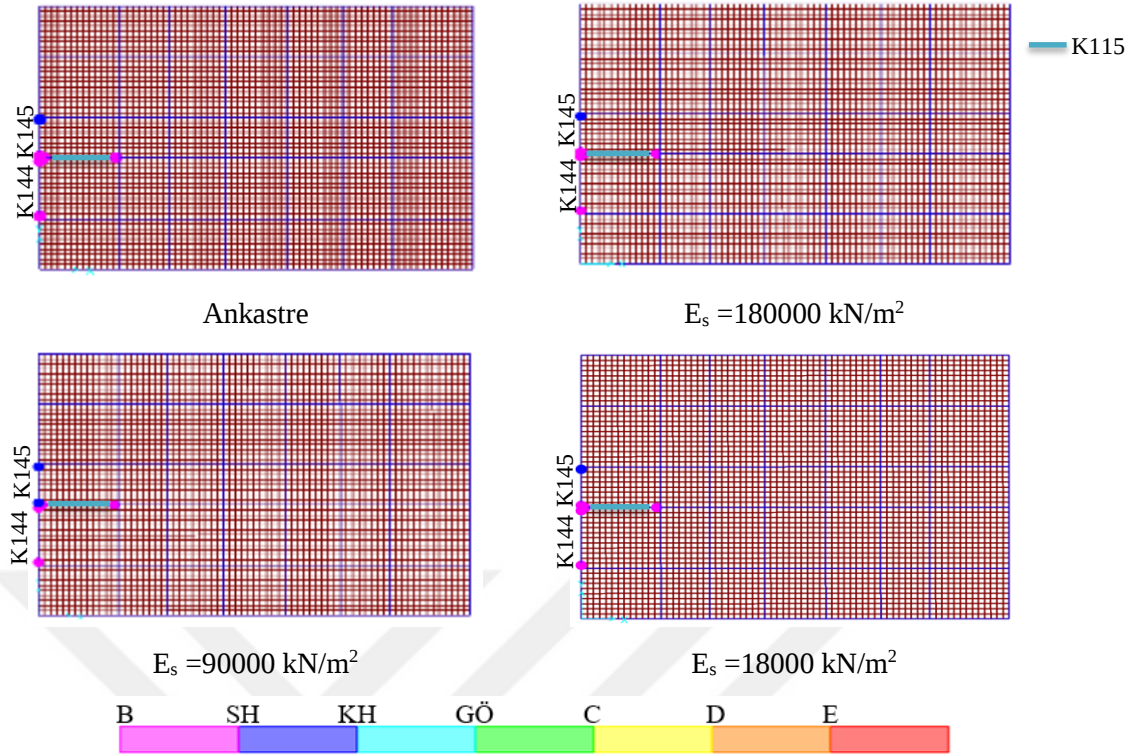
Üçüncü olarak seçilen C1 kolonu kaldırma senaryosu için doğrusal olmayan dinamik analize göre elde edilen plastik mafsal görüntüleri x-z düzlemi için Şekil 34’de y-z düzlemi için Şekil 35’de, +3.00 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 36’da verilmektedir.



Şekil 34. C1 kolonu kaldırma senaryosu için x - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 35. C1 kolonu kaldırma senaryosu için y - z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 36. C1 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

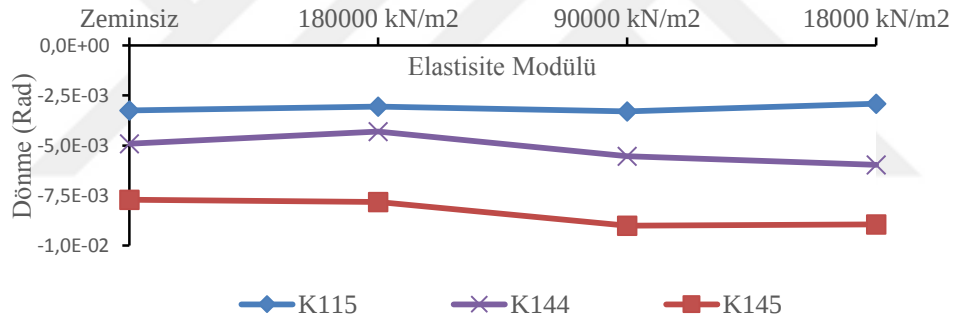
C1 kolon kaldırma senaryosuna göre zemin yumuşadıkça A1 ve A4 kolon kaldırma senaryolarındakine benzer şekilde kirişlerde plastik dönmeler dolayısıyla oluşan hasar artmıştır. Plastik mafsallar üzerindeki zemin etkisinin ne denli fazla olduğu y-z düzleminde görülmektedir. Minimum hasar seviyesinde olan plastik dönmeler belirgin hasar bölgesine geçmeye başlamıştır. Elastisite modülü en düşük zemin türünde neredeyse mafsalların çoğu belirgin hasar bölgesine geçmiştir.

C1 kolonu kaldırılma senaryosu doğrusal statik analiz yöntemi kullanılarak uygulandığında mevcut hali ile yetersiz kalan yapının doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemine göre analizinde aşamalı göçme riskinin bulunmadığı ve kiriş kesitlerinin mevcut hali ile yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Aşamalı göçme riskinin doğrusal statik analiz yöntemi ile değerlendirildiği örnekte yetersiz kalan kiriş kesit ve donatıları değiştirilmesine rağmen istenen güvenlik sağlanamamıştır. C1 kolonu kaldırma senaryosu için doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerine göre kaldırılan kolona bağlanan kirişlerde elde edilen sonuçlar Tablo 11’de verilmektedir.

Tablo 11. Aşamalı göçme direncini sağlayan kirişlerin kesit ve donatıları

	LSP		NDP	
	Boyut	Donatı	Boyut	Donatı
K144-5	Yetersiz		30×60	6Ø16
K244-5			30×60	6Ø16
K344-5			30×60	6Ø16
K444-5			30×60	6Ø16
K544-5			30×60	6Ø16
K644-5	30×60	6Ø16	30×60	6Ø16
K115	Yetersiz		30×60	6Ø16
K215			30×60	6Ø16
K315			30×60	6Ø16
K415			30×60	6Ø16
K515			30×60	6Ø16
K615	30×60	6Ø16	30×60	6Ø16

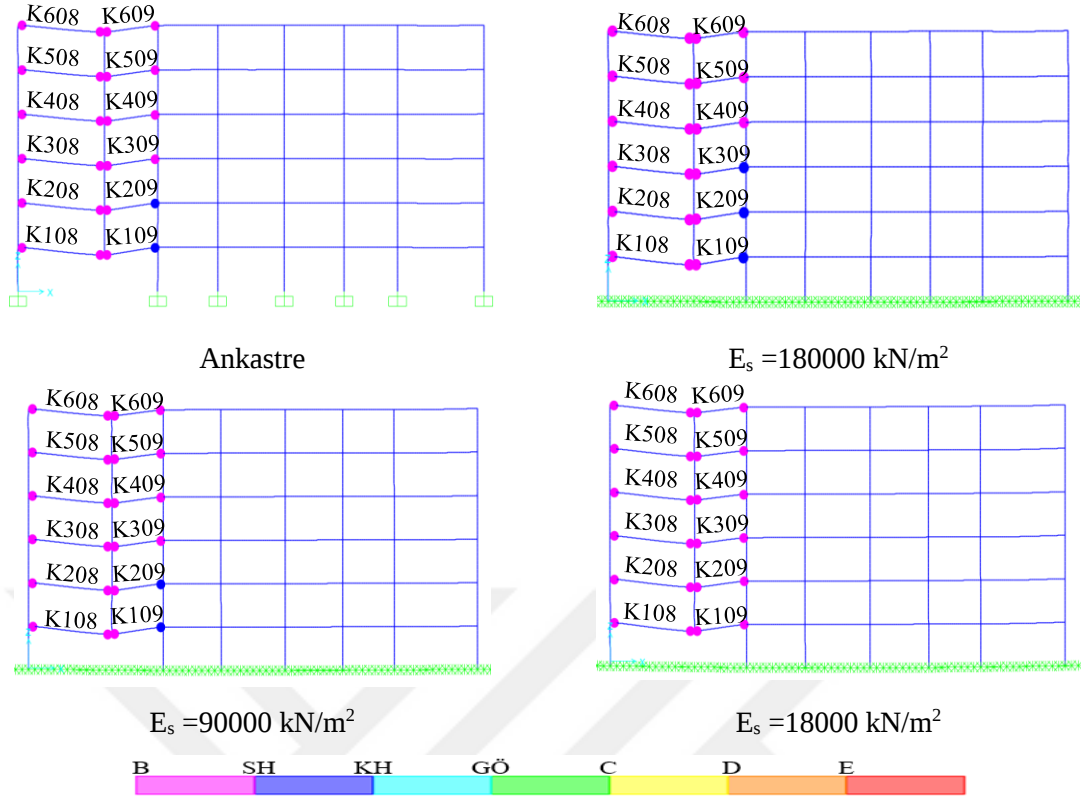
x-z düzlemindeki K115 ve y-z düzlemindeki K144 ile K145 kirişlerine ait plastik dönme değerlerinin zemin elastisite modülüne göre değişimi Şekil 37'deki gibidir.



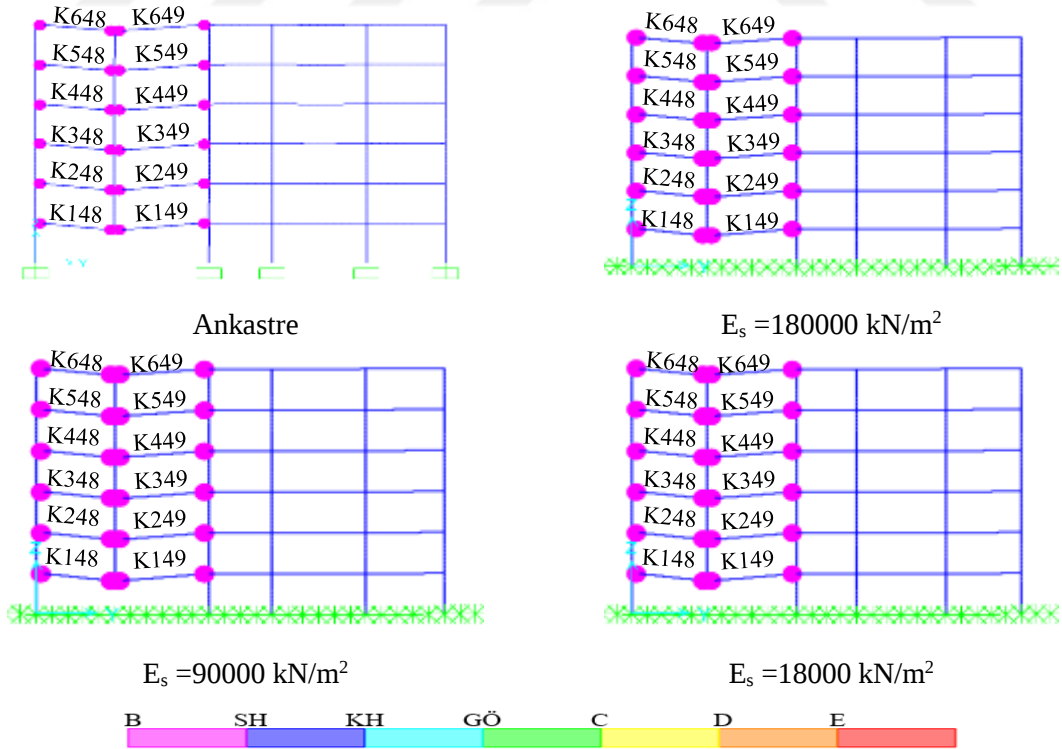
Şekil 37. C1 kolonunun kaldırılması halinde K115, K144 ve K145 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi

y-z düzleminde bulunan K144 ve K145 kirişleri zemin elastisite modülü azaldıkça dönme değerlerinin arttığı görülmektedir. Oysa ki, x-z düzlemindeki K115 kirişinde değişiklik ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır.

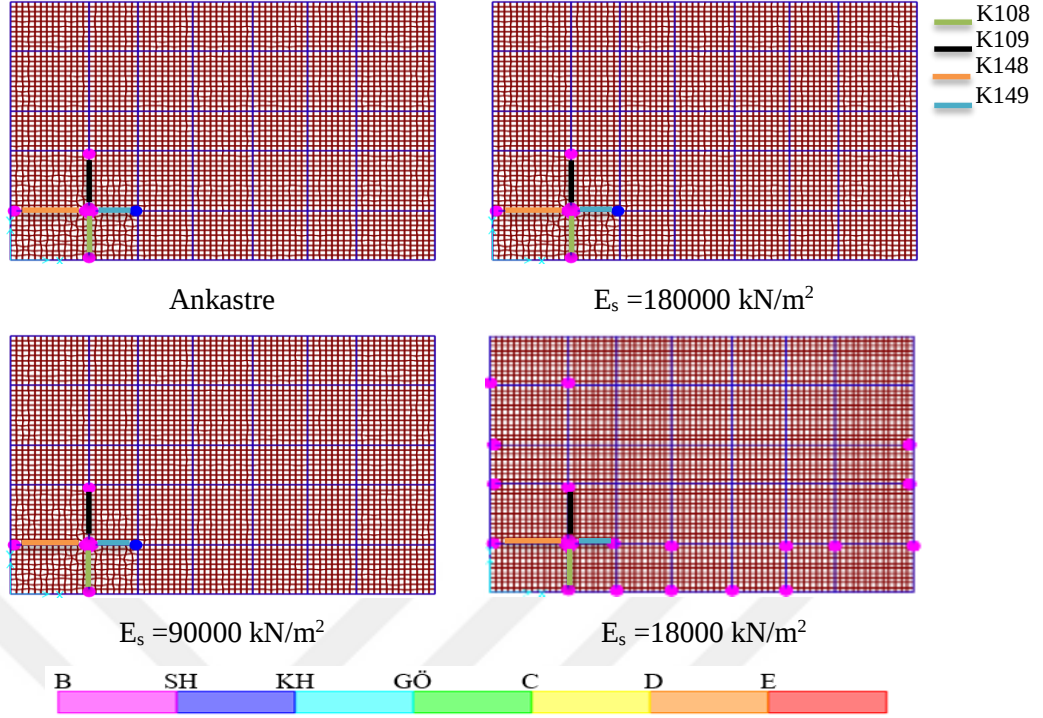
Son olarak seçilen B2 kolonu kaldırma senaryosu için doğrusal olmayan dinamik analize göre elde edilen plastik mafsalları görüntüleri x-z düzlemi için Şekil 38'de y-z düzlemi için Şekil 39'da, +3.00 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 40'da verilmektedir.



Şekil 38. B2 kolonu kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



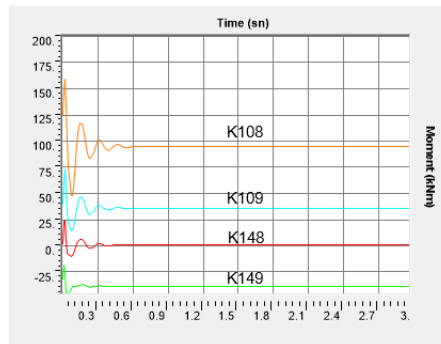
Şekil 39. B2 kolonu kaldırma senaryosu için y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 40. B2 kolonu kaldırma senaryosu için +3.00 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

B2 kolon kaldırma senaryosuna göre kaldırılan kolona bağlanan K108, K109, K148 ve K149 dönmeler plastik sınırı çok az aştığı görülmektedir. Özellikle $E_s=18000 \text{ kN/m}^2$ olan zeminde sistemin geri kalanına yeniden dağılım sonrası plastikleşen kesit ve eleman sayısının arttığı ancak zorlanmaların azaldığı görülmektedir.

Yapı tabanda ankastre kabul edilen modeli analiz edildiğinde kolona bağlanan K108, K109, K148 ve K149 kirişleri için açıklık momentlerinin 3 sn'lik zaman dilimindeki etki süresince değişimi Şekil 41'de verilmektedir.



Şekil 41. B2 kolonunun kaldırılması halinde K108, K109, K148 ve K149 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi

Grafiğe bakıldığında tüm kirişlerin yaklaşık 0.3 sn mertebelerinde moment salınımlarının durduğu ve denge konumuna ulaştığı görülmektedir.

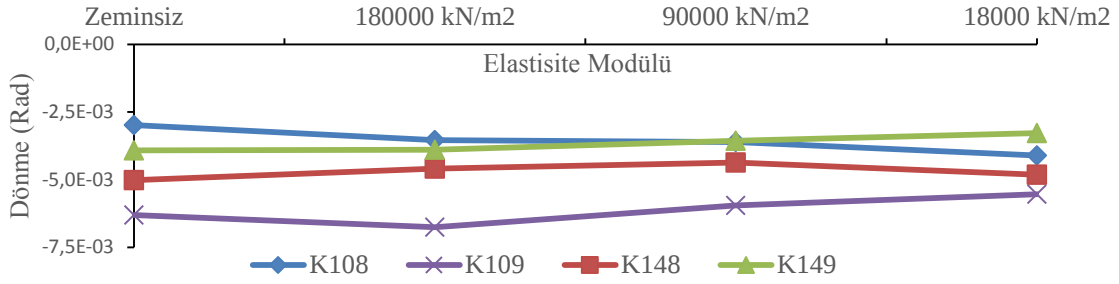
B2 kolon kaldırma senaryosunda diğer senaryolara benzer şekilde doğrusal statik analiz yöntemi kullanıldığında yapı mevcut hali ile yetersiz kalırken doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemine göre analizinde aşamalı göçme riskinin bulunmadığı ve kiriş kesitlerinin mevcut hali ile yeterli olduğu anlaşılmaktadır. B2 kolonu kaldırma senaryosu için doğrusal statik analize göre yeterli hale getirilen kesitler ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerine göre kaldırılan kolona bağlanan kirişlerin donatı ve kesitleri Tablo 12’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 12. Aşamalı göçme direncini sağlayan kirişlerin kesit ve donatıları

	LSP		NDP	
	Boyut	Donatı	Boyut	Donatı
K108-9	Yetersiz		30×60	6Ø16
K208-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K308-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K408-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K508-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K608-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K148-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K248-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K348-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K448-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K548-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16
K648-9	40×110	5Ø20	30×60	6Ø16

B2 kolon kaldırma senaryosunun statik analiz yöntemi ile aşamalı göçme hesapları sonucunda K108-9 kiriş elemanın yeterli güvenlik sağlanamamıştır. Diğer tüm kirişler için ise kiriş kesitlerinin 40×110 cm² boyut 5Ø20 donatı ile revize edilmesinin yeterli olduğu görülmüştür. Doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminde tüm kirişlerin mevcut hali ile aşamalı göçme riski açısından yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki gibi doğrusal olmayan dinamik yönteminin daha gerçekçi sonuçlar yanında daha ekonomik sonuçlar da verdiği söylenebilir.

K108, K109, K148 ile K149 kirişlerine ait plastik dönme değerlerinin zemin elastisite modülüne göre değişimi Şekil 42’deki gibidir.



Şekil 42. B2 kolonunun kaldırılması halinde K108, K109, K148 ve K149 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi

Yapı 1.katında bulunan K108 ile K148 kirişleri yapının kenar aksına yakın olduğundan yükleri yeniden dağıtabilecek yeteri kadar yapı elemanı bulunmadığından elastisite modülü 18000 kN/m² ve 90000 kN/m² olan zeminlerde dönme miktarında artış olduğu görülmüştür. 1. Katta bulunan K109 ile K149 kirişleri yapının orta bölgesine yakın olması ve devamında yapı elemanların bulunması nedeniyle yükler sistemin geri kalanına kararlı bir şekilde dağıtılmış, dönme değerleri belirli aralıklarda kalmıştır.

Zemin elastisite modülü ile kaldırılan kolonun üst ucunda meydana gelen düşey yer değiştirmelerin değişimi Tablo 13’de verilmektedir.

Tablo 13. NDP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)

	A1 kolonu	A4 kolonu	C1 kolonu	B2 kolonu
Ankastre	4.96	2.09	4.01	3.55
$E_s = 180000 \text{ kN/m}^2$	5.69	2.77	4.64	4.24
$E_s = 90000 \text{ kN/m}^2$	6.52	3.30	5.29	4.41
$E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$	10.81	7.24	7.00	6.10

Tablodan görüldüğü gibi tüm kolon kaldırma senaryoları için ankastre modelden daha az elastisite modülüne sahip zemine doğru gidildikçe elde edilen düşey yer değiştirme değerleri beklenildiği gibi artmaktadır. Ankastre durum mesnet şartlarının en rijit olduğu duruma karşılık geldiğinden en küçük düşey yer değiştirme değerleri burada elde edilmiştir.

Zemin etkileri dikkate alınan doğrusal olmayan dinamik analizin yapı üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Her ne kadar incelenen örnekte aşamalı göçme direncine sahip bir zemin-yapı etkisi altında analiz edildiğinde riskli duruma düşmese de oluşan plastik mafsallı düzeylerinin ve plastik dönmelerin değiştiği görülmektedir. Bu durum zeminin yapı üzerinde ne denli etkili olduğunu göstermektedir. LSP ve NDP yöntemleri ile yapılan aşamalı göçme analizleri sonuçları bir arada Tablo 14’de verilmektedir.

Tablo 14. LSP ve NDP yöntemlerinin karşılaştırılması

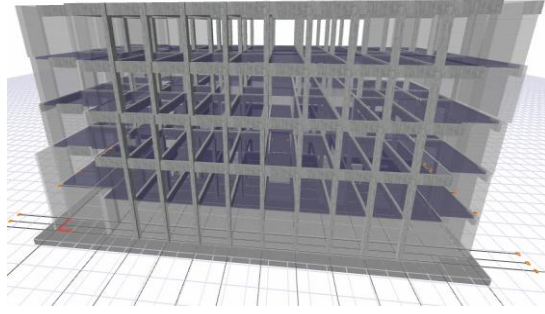
Analiz Türü	Mesnet Koşulu	Senaryo	Aşamalı Göçme Güvenliği
LSP	Ankastre	A1 senaryosu	Her iki ekseninde 5'er kırış güvensizdir.
		A4 senaryosu	Güvenlidir
		C1 senaryosu	Her iki ekseninde 5'er kırış güvensizdir.
		B2 senaryosu	Güvensizdir
	Zeminli	A1 senaryosu	Her iki ekseninde 5'er kırış güvensizdir.
		A4 senaryosu	Güvenlidir
		C1 senaryosu	Her iki ekseninde 5'er kırış güvensizdir.
		B2 senaryosu	Güvensizdir
NDP	Ankastre	A1 senaryosu	Güvenlidir
		A4 senaryosu	Güvenlidir
		C1 senaryosu	Güvenlidir
		B2 senaryosu	Güvenlidir
	Zeminli	A1 senaryosu	Güvenlidir
		A4 senaryosu	Güvenlidir
		C1 senaryosu	Güvenlidir
		B2 senaryosu	Güvenlidir

Yukarıdaki tablodan anlaşılacağı üzere doğrusal statik analiz yöntemi doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminin sonuçları arasında farklılıklar vardır. Doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminin daha doğru sonuçlar verdiği ve daha güvenilir olduğundan bahsedilmiştir. Bunun nedeni yapının inelastik bir davranış göstermesidir. Bu davranış doğrusal olmayan dinamik yöntem ile daha doğru bir şekilde dikkate alınabilmektedir. Doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ile ayrıca ikinci mertebe etkileri de göz önüne alınabilmektedir. Ancak doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminde elemanların güvenilir çıkmasının en önemli nedenlerinden biri yöntemin elemanlar arası yük aktarımını yapabiliyor olmasıdır. Gerilmelerin akma gerilmelerini aştığı kesitlerde şekil değiştirmeler daha fazla olmaktadır. Yeniden dağılım ve adaptasyon kesitin göçmeye ulaşmasını bir süre engellemektedir. Doğrusal statik analiz yönteminde ise tüm etkiler belirli katsayılar yardımıyla kabaca hesaba katılmaktadır.

2.2. 5 Katlı Betonarme Eğitim Binası

İkinci yapı olarak ülkemizde uygulanan Millî Eğitim Bakanlığının tip ilköğretim okul projelerinden biri seçilmiştir. Bodrum+Zemin+3 kat olarak uygulanan proje halen faal olarak kullanılmaktadır.

Yapıya ait üç boyutlu ideCAD-Statik.v10 modeli Şekil 43'de verilmektedir.



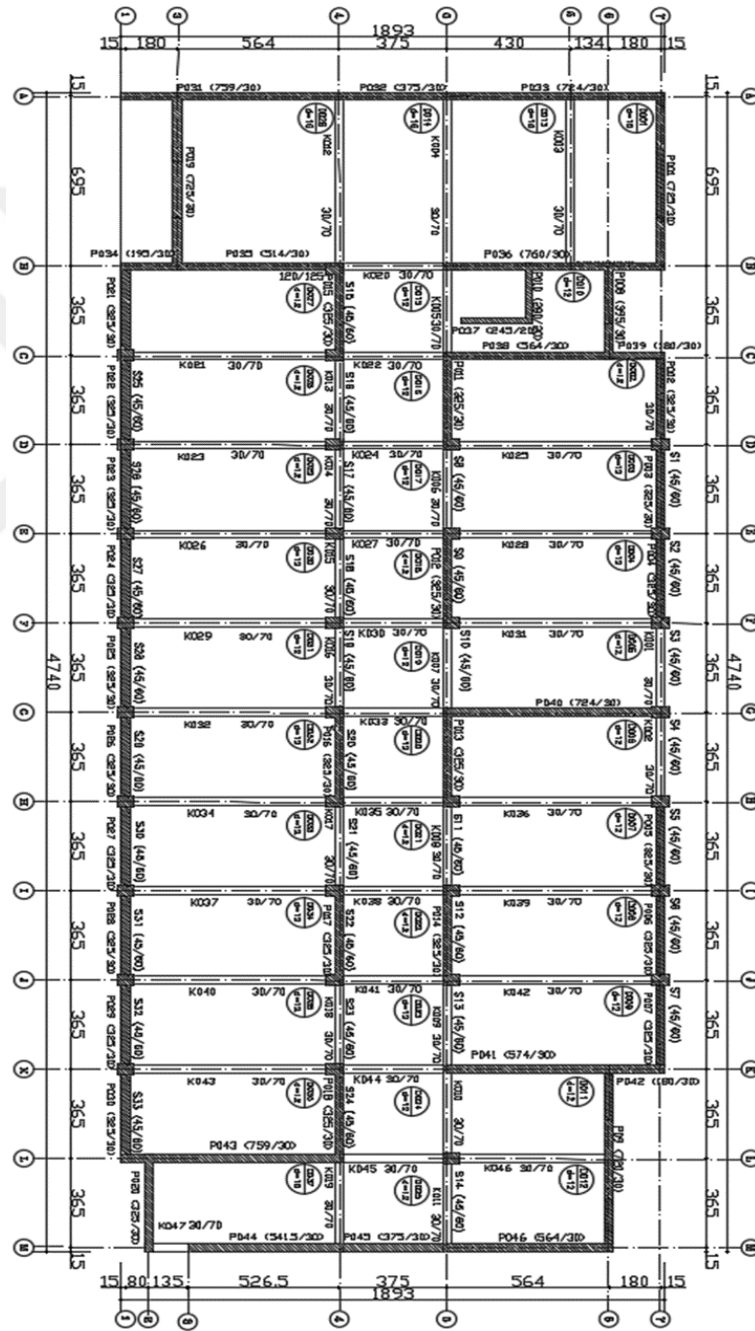
Şekil 43. Okul binası üç boyutlu İdeCAD modeli

Okul binası; derslikler, laboratuvarlar, anasınıfı, toplantı odaları, idari yapılardan oluşmaktadır. Yapıya ait geometrik ve malzeme özellikleri Tablo 15’de verilmektedir.

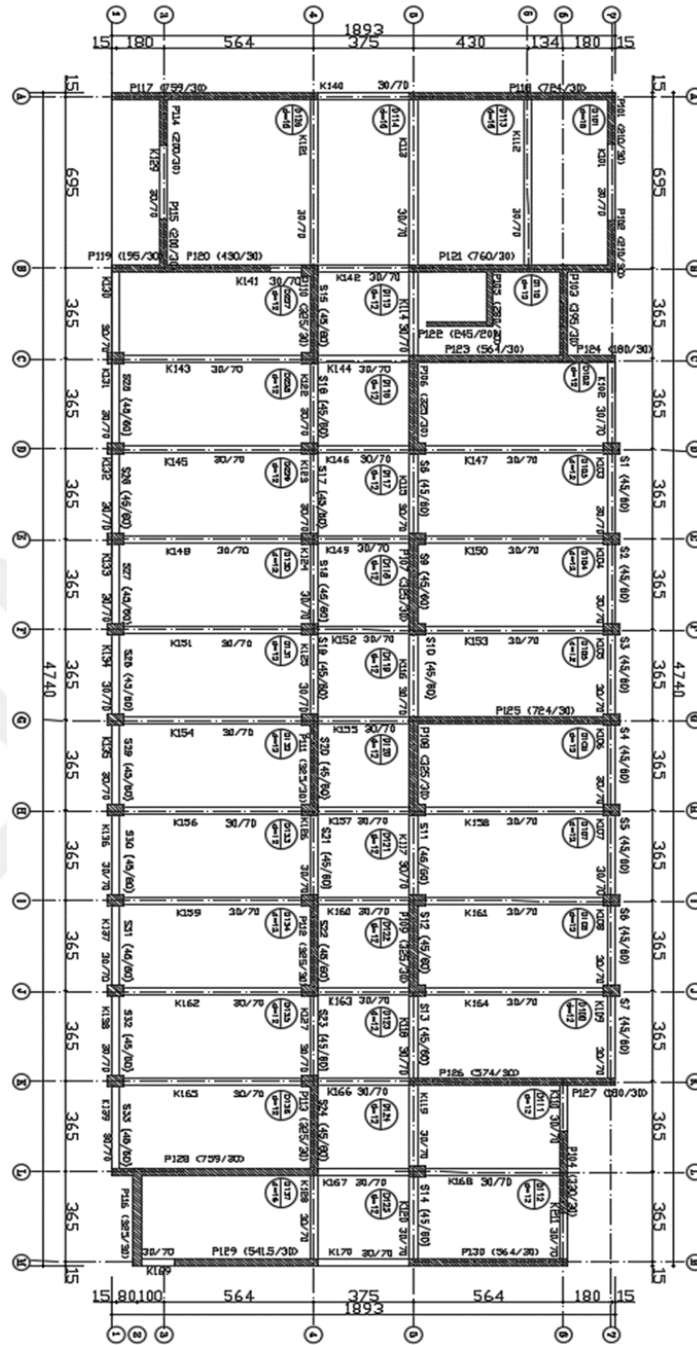
Tablo 15. 5 katlı betonarme eğitim binasına ait geometri ve malzeme özellikleri

	Özellikler
Yapı cinsi	Okul
Malzemesi	Betonarme
Kat adeti	Bodrum+ Zemin+ 3 kat
Planda boyutları (m)	18.93×47.40
Beton sınıfı	C30
Donatı sınıfı	B420C
Kat yüksekliği (m)	3.45
Kolon boyutları (cm)	45×60
Kiriş boyutları (cm)	30×70
Perde boyutları (cm)	Değişken
Paspayı (cm)	2.5
Döşeme kalınlığı (cm)	12 ve 16
Bulunduğu bölge	İstanbul-Kadıköy
Yapı süneklik düzeyi	Yüksek
Deprem yer hareketi düzeyi	DD-2
Yerel zemin sınıfı	ZD
Enlem	40.996958
Boylam	29.024067
Zemin elastisite modülü (kN/m ²)	10000 kN/m ² (gevşek kum), 50000 kN/m ² (orta kil) ve 100000 kN/m ² (yoğun kum ve çakıl)
Döşeme ve perde sonlu eleman ağı	1 m × 1 m

Aşamalı göçme analizi yapılacak okul binası öncelikle ideCAD-Statik.v10 paket programı kullanılarak modellenmiş ve TBDY2018 yeni deprem yönetmeliğine uygunluğu kontrol edilmiştir. Genel olarak eleman kesitlerinin ve donatı düzeninin yeterli olduğu, herhangi bir düzensizlik durumu içermediği ve görelî kat ötelemelerinin yönetmelik sınırlarını aşmadığı görülmüştür. Yapıya ait kalıp planları Şekil 44 ve Şekil 45’de verilmektedir.

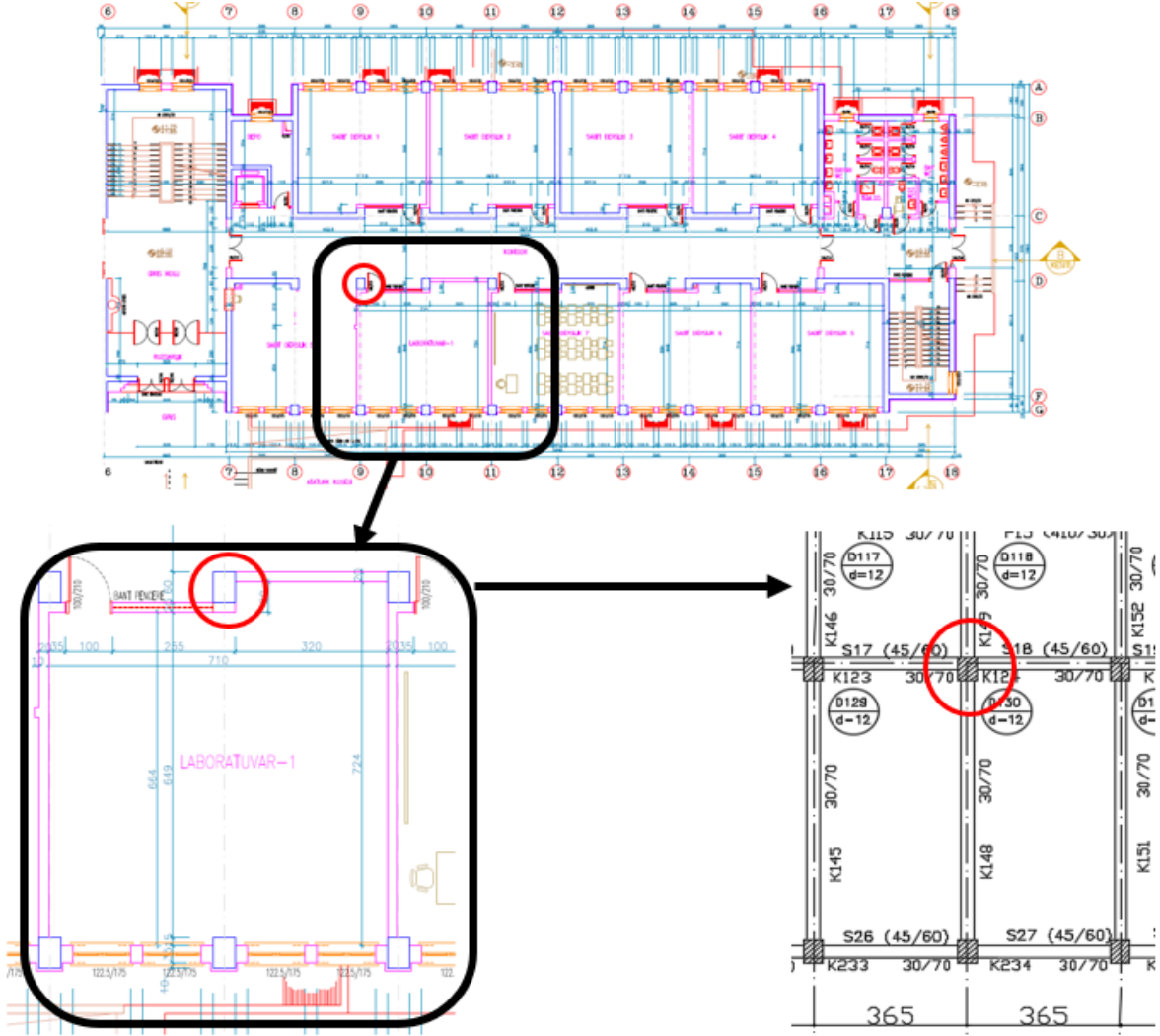


Şekil 44. Okul binası bodrum kat kalıp planı



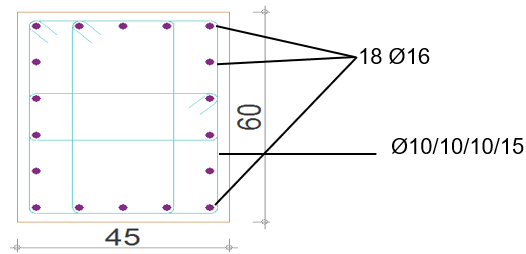
Şekil 45. Okul binası zemin, birinci, ikinci ve üçüncü kat planları

Bu örnek üzerinde iç kolon kaldırma senaryoları dikkate alınmıştır. Bu bağlamda okul binasının zemin katında bulunan laboratuvar dersliği ve 1. katta bulunan kantin bölümü patlama yüklerine maruz kalabilecek mahaller olarak düşünülmüştür. Bu düşünceden hareketle ilk kolon kaldırma senaryosu olarak, D ve F aksları ile 1 ve 4 aksları arasında bulunan laboratuvar dersliğinde meydana gelebilecek bir kaza ihtimaline karşı, hasar görmesi muhtemel olan S18 (E4) kolonu seçilmiştir (Şekil 46).

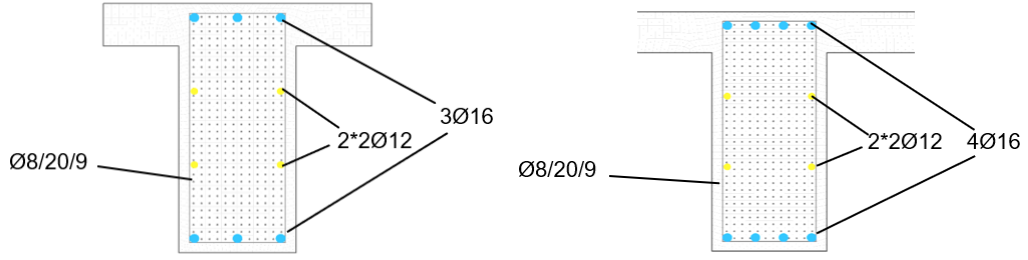


Şekil 46. Okul binası E4 kolonu yerleşim detayı

E4 kolonuna bağlanan 1. kat K123, K124, K148 ve K149 kirişleri ile yapının 45×60 kesitli kolonlarına ait donatı yerleşimi Şekil 47 ve Şekil 48’de verilmektedir.

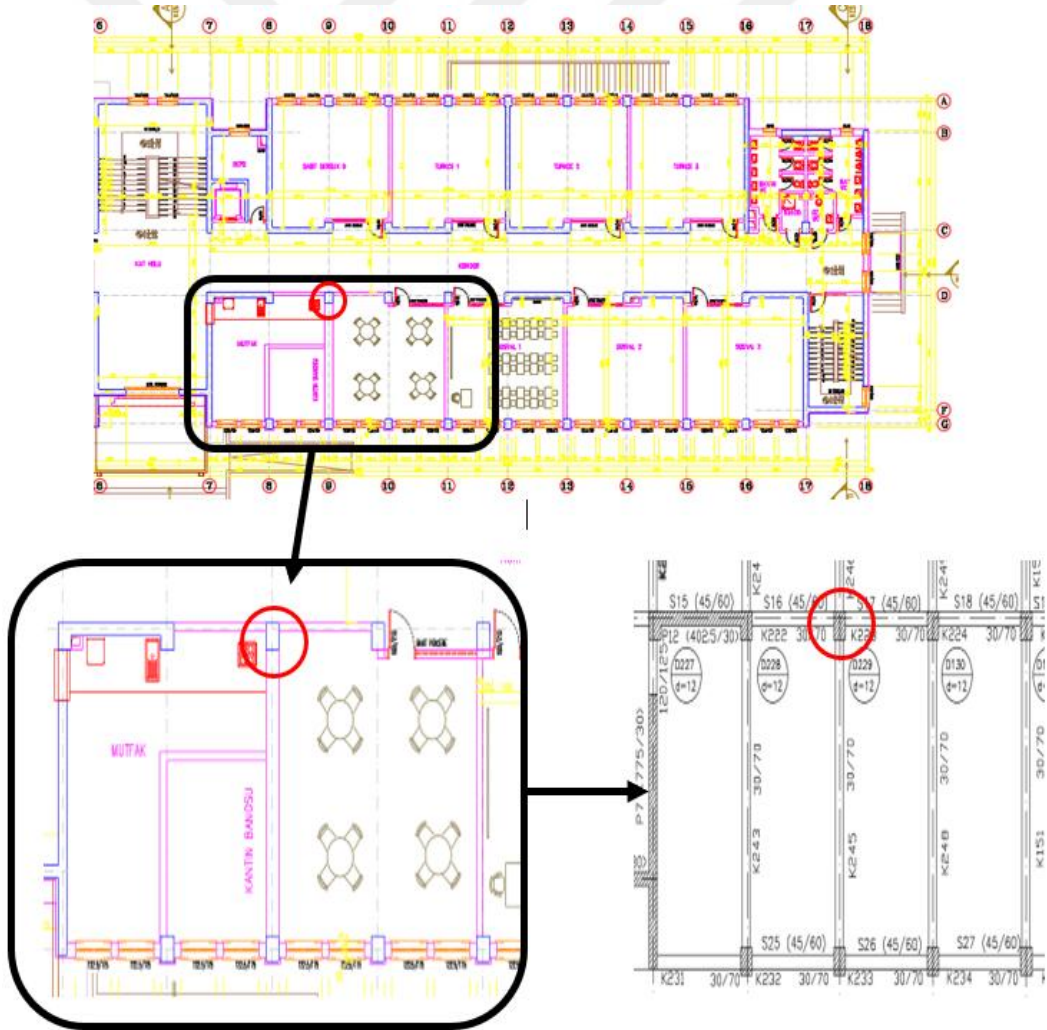


Şekil 47. Okul binası E4 kolonu kesiti ve donatı detayı



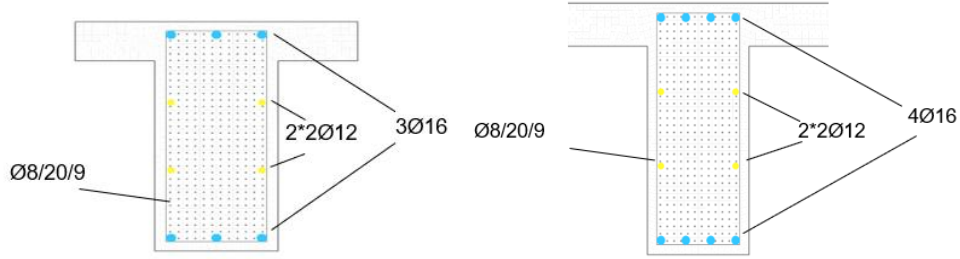
Şekil 48. Okul binası K123-K124 ve K148-K149 kiriş kesiti ve donatı detayı

İkinci senaryo için seçilen kolon ise yapının ilk katında kantin mahallinde bulunmaktadır. Diğer kısımlara nazaran daha tehlikeli bir mahal olarak değerlendirilmiştir. Kantin mahallinde meydana gelebilecek beklenmedik bir patlamada S17 (D4) kolonunun hasar görebileceği düşünülmektedir (Şekil 49).

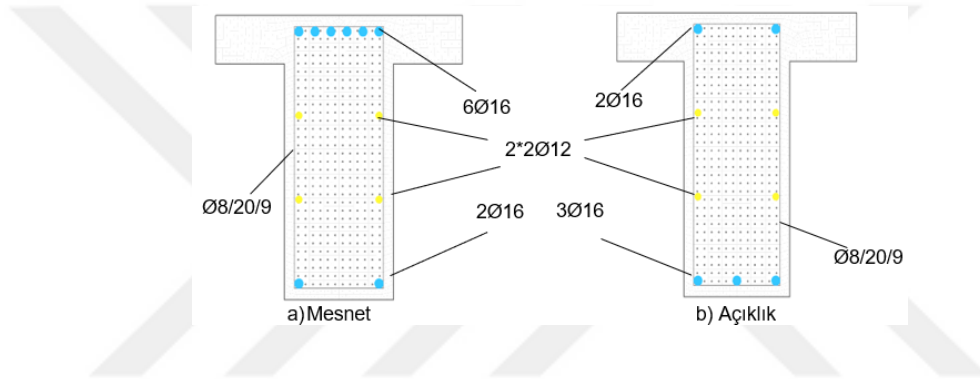


Şekil 49. Okul binası D4 kolonu yerleşim detayı

D4 kolonu ile E4 kolon detayı benzerdir. D4 kolonuna bağlanan K222, K223, K245 ve K246 kirişlerine ait donatı yerleşimi sırasıyla Şekil 50 ve Şekil 51’de verilmektedir.



Şekil 50. Okul binası K245 kiriş kesiti ve donatı detayı



Şekil 51. Okul binası K246 kiriş kesiti ve donatı detayı

Kirişlerin sarılma bölgelerinde etriye sıklaştırması yapılmıştır. K245 kirişi mesnet ve açıklıkta aynı donatı detayına sahiptir.

Kolonlar tüm yapıda 45×60 cm boyutlarında olup 18Ø16 boyuna donatıya ve Ø10/10/10/15 kesme donatısına sahiptir.

Çatı katı ve ara katlar için toplam G ve Q yüklemeleri aşağıda verilmektedir.

<u>Çatı katı sabit yükleri (G) kN/m²</u>	2.60 kN/m ²
İzolasyon	0.05
Tesviye betonu	1.00
Sıva	0.44
Döşeme betonu	1.11
<u>Çatı katı hareketli yükleri (Q) kN/m²</u>	2.00 kN/m ²
<u>Ara kat sabit yükleri (G) kN/m²</u>	3.45 kN/m ²
Döşeme kaplaması	0.88
Tesviye betonu	0.80
Sıva	0.44
Döşeme betonu	1.33

Ara kat hareketli yükleri (Q) kN/m²

Sınıflarda	3.50 kN/m ²
Koridorda	5.00 kN/m ²

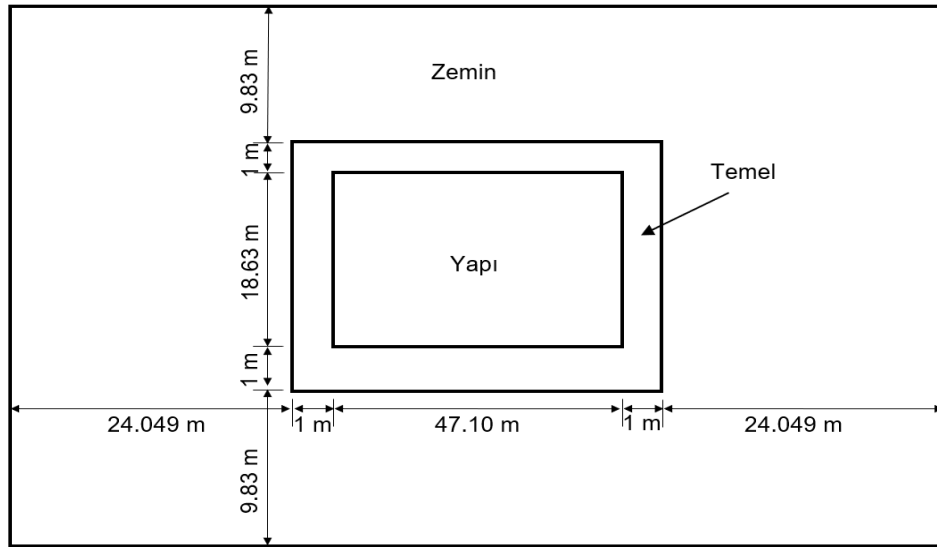
Bodrum kat sabit yükleri (G) kN/m²

Döşeme kaplaması	0.88
Tesviye betonu	0.80
Sıva	0.44
Döşeme betonu	3.20
	5.32 kN/m ²

Bodrum kat hareketli yükleri (Q) kN/m²

Sınıflarda	3.50 kN/m ²
Koridorda	5.00 kN/m ²

Analizlerde dikkate alınan üst yapı, temel ve zemin boyutları Şekil 52'de verilmektedir.



Şekil 52. Okul binası örneği için tanımlanan temel ve zemin boyutları

Zemin x yönünde 97.198 metre, y yönünde ise 40.29 metre olarak modellenmiştir. Yapının planda ölçüleri 47.10×18.63 metre şeklindedir. Yapının oturma alanından her iki yönde 1'er metre ampatman olacak şekilde alınan radye temelin kalınlığı 0.75 m olarak dikkate alınmıştır.

Birinci örnekte açıklanan adımlar takip edilerek yukarıda belirtilen kolon kaldırma senaryoları için sırasıyla doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analizler ayrı ayrı yapılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2.2.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm

Okul binası örneğinde kirişlerin tümü incelendiğinde 9 farklı donatı yerleşimine sahip kirişler bulunmaktadır. Bu nedenle Tablo 1 kullanılarak her bir kirişe ait m -faktör değerinin üst limiti ve beklenen (ortalama) moment dayanımı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 16’da verilmektedir.

Tablo 16. m faktör ve beklenen (ortalama) moment dayanımı değerleri

Çekme Donatısı	Basınç Donatısı	m	M_p (kNm)
6Ø16	5Ø16	9.47	331.31
5Ø16	3Ø16	9.95	276.37
5Ø16	4Ø16	9.47	276.54
5Ø16	5Ø16	16.00	276.62
3Ø16	3Ø16	16.00	166.98
4Ø16	5Ø16	16.00	221.83
4Ø16	4Ø16	16.00	221.81
4Ø16	3Ø16	9.47	221.77
3Ø16	5Ø16	16.00	167.01

9 farklı kiriş için hesaplanan m -faktör değerlerinin en küçüğü üst limit olarak tüm yapıda kullanılmaktadır. Tablo 16’da elde edilen en küçük m -faktör değeri 9.47’dir. Yük artırım faktörü (Ω) ise 12.164 olarak belirlenmiştir.

Kolon kaldırıldıktan sonra uygulanacak düşey yükler Tablo 17’deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 17. Okul binası örneği için hesaplanan G ve G_{LD} döşeme yükleri

		G (kN/m ²)	G_{LD} (kN/m ²)
Çatı katı		4.12	50.12
1. Kat, Zemin kat	Sınıflar	5.89	71.65
	Koridorlar	6.64	80.77
Bodrum kat	Sınıflar	8.13	98.94
	Koridorlar	8.88	108.02

G_{LD} , kaldırılan kolona komşu döşemelere, G ise kaldırılan kolona komşu olmayan döşemelere uygulanmaktadır.

Yapı tabanda ankastre, gevşek kum, orta kil ve yoğun kumlu çakıl zemin türleri dikkate alınarak ayrı ayrı aşamalı göçme analizine tabi tutulmuştur. E4 ve D4 kolon kaldırma senaryosuna göre yapılan doğrusal statik analize göre farklı zemin tipleri için elde edilen m değerleri Tablo 18’de verilmektedir.

Tablo 18. E4 ve D4 kolonları kaldırma senaryoları m oranlarının zemin cinsi ile değişimi

E4 kolon kaldırma senaryosu					D4 kolon kaldırma senaryosu				
Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)				Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)			
	Ankastre	100000	50000	10000		Ankastre	100000	50000	10000
K014	0.67	0.68	0.68	0.69	K013	0.16	0.18	0.18	0.20
K015	0.57	0.63	0.72	0.91	K014	0.30	0.35	0.34	0.37
K123	4.14	4.61	4.65	4.65	K122	0.37	0.47	0.47	0.48
K124	4.73	4.89	4.83	4.79	K123	0.53	0.52	0.51	0.53
K223	3.89	4.53	4.55	4.58	K222	1.51	1.66	1.67	1.67
K224	4.21	4.29	4.30	4.32	K223	1.11	1.14	1.13	1.14
K323	3.40	3.92	3.95	4.00	K322	2.30	2.31	2.34	2.35
K324	3.83	3.86	3.87	3.92	K323	1.44	1.44	1.45	1.46
K423	2.82	2.31	2.33	2.40	K422	1.31	1.41	1.43	1.45
K424	3.61	3.75	3.74	3.78	K423	0.73	0.75	0.75	0.76
K026	0.66	0.90	0.92	0.92	K023	0.50	0.58	0.55	0.58
K027	0.40	0.32	0.39	0.43	K024	0.26	0.28	0.27	0.29
K148	4.22	4.32	4.39	4.40	K145	0.48	0.49	0.49	0.50
K149	3.63	3.68	3.73	3.82	K146	0.31	0.33	0.33	0.34
K248	3.32	3.35	3.36	3.43	K245	3.50	3.47	3.50	3.51
K249	3.90	3.91	3.90	3.94	K246	2.23	2.25	2.26	2.27
K348	3.31	3.32	3.35	3.37	K345	3.78	3.79	3.79	3.78
K349	2.88	2.87	2.89	2.90	K346	1.87	1.89	1.90	1.91
K448	3.27	3.34	3.37	3.40	K445	2.94	2.93	2.93	2.95
K449	2.79	2.84	2.87	2.91	K446	1.34	1.33	1.35	1.37

Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak yapılan analizler, bazı kirişlerin m oranlarında E4 kolon kaldırma senaryosun için %60, D4 kolon kaldırma senaryosu için ise %30 civarında artışlara sebep olmuştur. Her iki senaryo genelinde zemin yumuşadıkça m oranlarında artış görülmüş ancak bu örnekler özelinde yapı sistemi güvenli olduğundan meydana gelen bu artış bir risk oluşturmamıştır ve bütün zemin türleri için tüm kirişler, üst sınır olan 9.47 değerinin altında kalmıştır.

Kolonun kaldırıldığı düğüm noktasında elde edilen düşey yer değiştirme değerleri Tablo 19’da verilmektedir. Yer değiştirmeler beklenildiği gibi zemin yumuşadıkça artmaktadır.

Tablo 19. Düşey yer değiştirme değerleri (cm)

	E4 kolonu	D4 kolonu
Ankastre	1.62	1.43
$E_s = 100000 \text{ kN/m}^2$	2.42	2.05
$E_s = 50000 \text{ kN/m}^2$	3.25	3.09
$E_s = 10000 \text{ kN/m}^2$	4.41	4.18

2.2.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm

Doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi için ilk örnekte detaylı olarak verilen işlem adımları uygulanarak okul binası örneği aşamalı göçme riski açısından değerlendirilmiştir.

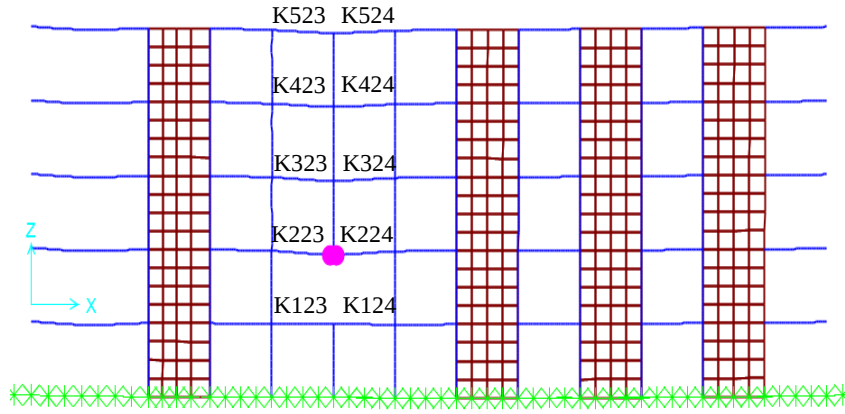
5 katlı betonarme eğitim binası için zeminli ve ankastre çözümlerden elde edilen periyotlar Tablo 20’de verilmektedir.

Tablo 20. Doğal titreşim periyotları

	$T_{1x}(\text{sn})$	$T_{1y}(\text{sn})$	$T_{2x}(\text{sn})$	$T_{2y}(\text{sn})$
Ankastre	0.22116	0.15692	0.04857	0.04113
$E_s = 100000 \text{ kN/m}^2$	0.24338	0.26821	0.05345	0.07029
$E_s = 50000 \text{ kN/m}^2$	0.27007	0.30968	0.05931	0.08116
$E_s = 10000 \text{ kN/m}^2$	0.39981	0.43987	0.08780	0.11528

Doğal titreşim periyotları beklenildiği gibi zemin elastisite modülü azaldıkça (zemin yumuşadıkça) artmaktadır.

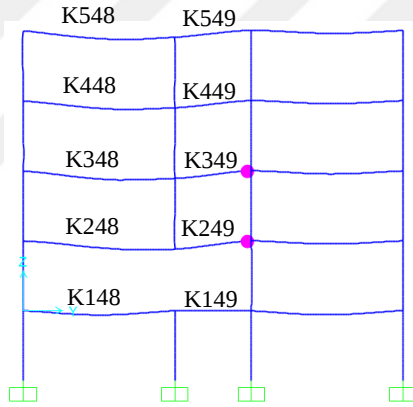
E4 kolonu kaldırma senaryosu uygulandığında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ile çözümden elde edilen plastik mafsalları x-z düzlemi için Şekil 53’de y-z düzlemi için Şekil 54’de ve +6.90 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 55’de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



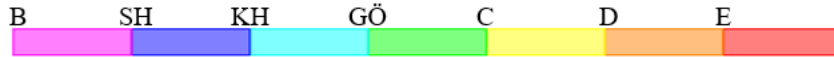
Ankastre, $E_s=100000 \text{ kN/m}^2$, $E_s=50000 \text{ kN/m}^2$ ve $E_s=10000 \text{ kN/m}^2$



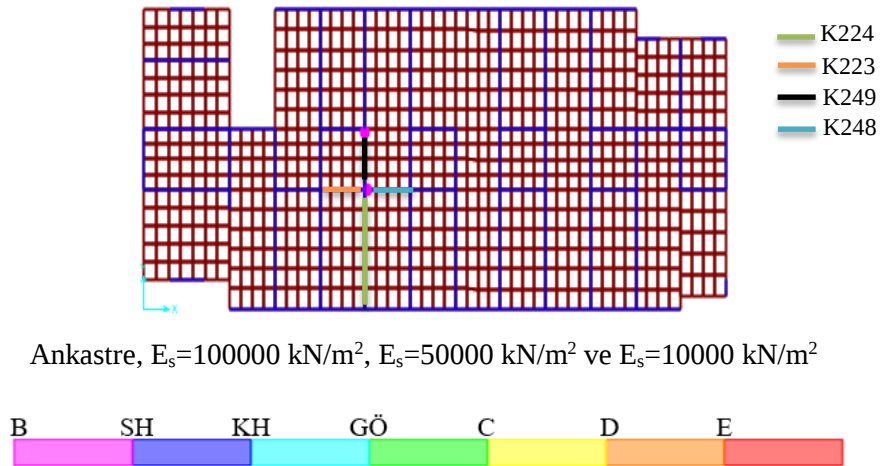
Şekil 53. E4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Ankastre, $E_s=100000 \text{ kN/m}^2$, $E_s=50000 \text{ kN/m}^2$ ve $E_s=10000 \text{ kN/m}^2$



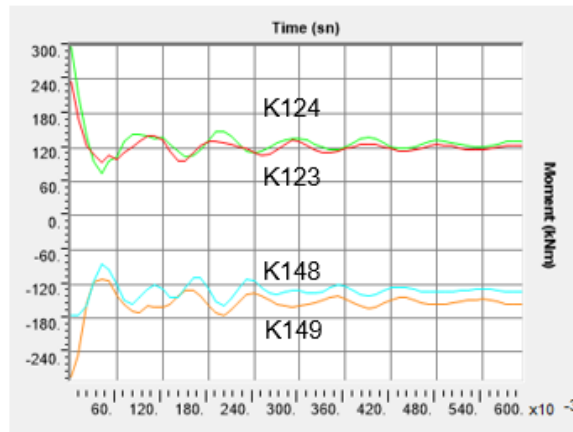
Şekil 54. E4 kolon kaldırma senaryosu için y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 55. E4 kolon kaldırma senaryosu için +6.90 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Hem zeminli hem de ankastre modellerde plastik mafsall sayısı ve hasar seviyesinde değişiklik olmamıştır. Yapının her durumda aşamalı göçmeye karşı dirençli olduğu görülmüştür. Kolonların projede sık konumlandırılmasından dolayı aşamalı göçme riskinin oluşmadığı düşünülmektedir. Ayrıca okul binası gibi yapılarda bina önem katsayısı diğer yapılara göre büyük alınmakta ve dolayısı ile daha büyük yükler altında tasarımı yapılmaktadır. Bu da taşıyıcı elemanların taşıma gücünü arttırmıştır.

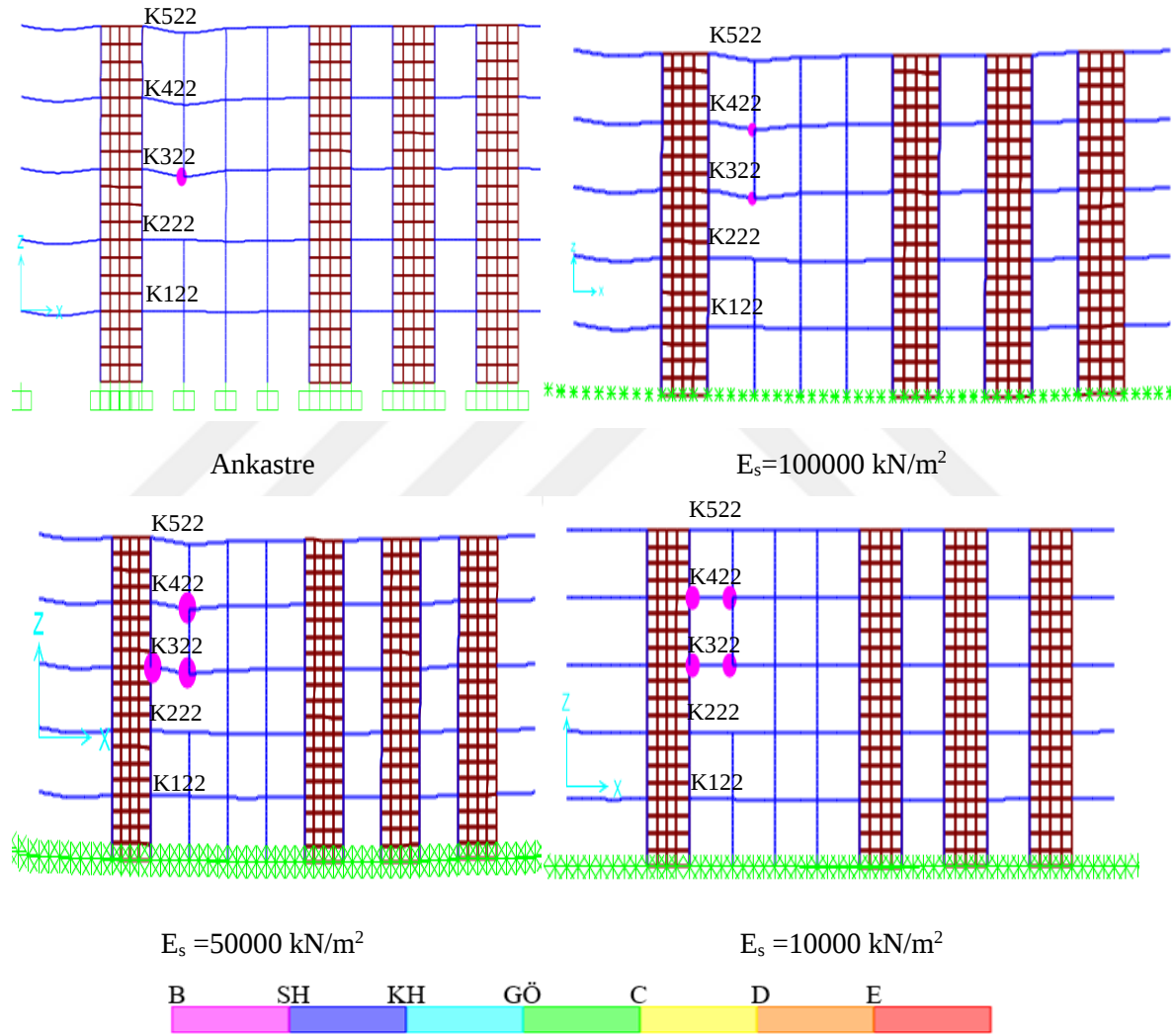
Kaldırılan E4 kolonuna bağlanan K123, K124, K148 ile K149 kirişlerinin ilk 0.6 sn'de moment değerlerindeki değişimi Şekil 56'da verilmektedir.



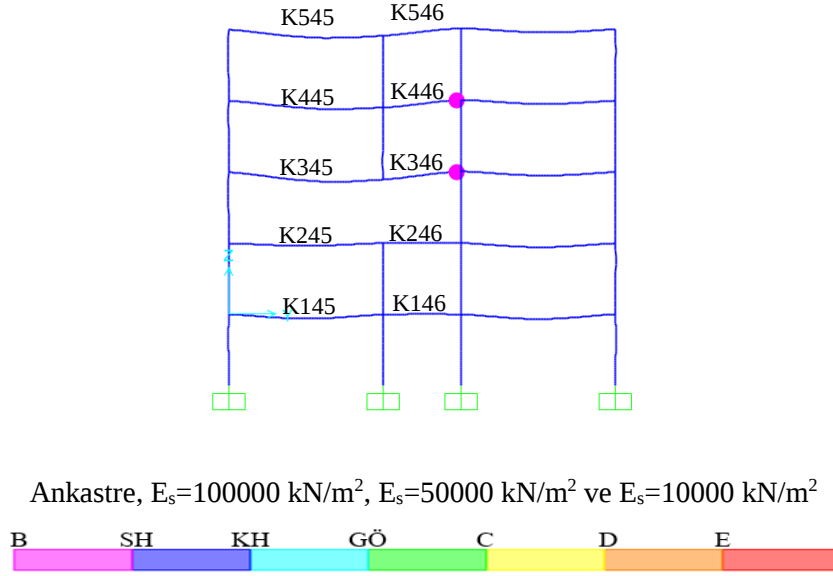
Şekil 56. E4 kolonunun kaldırılması halinde K123, K124, K148 ve K149 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi

Analiz sonuçları 3 sn için incelendiyse de 0.6 sn'den sonra moment değerlerinin zamana bağlı değişimi ihmal edilebilir seviyelere inmiştir. Şekilden görüldüğü gibi kısa süre içerisinde kiriş momentlerindeki dalgalanma durmakta ve sabit hale gelmektedir.

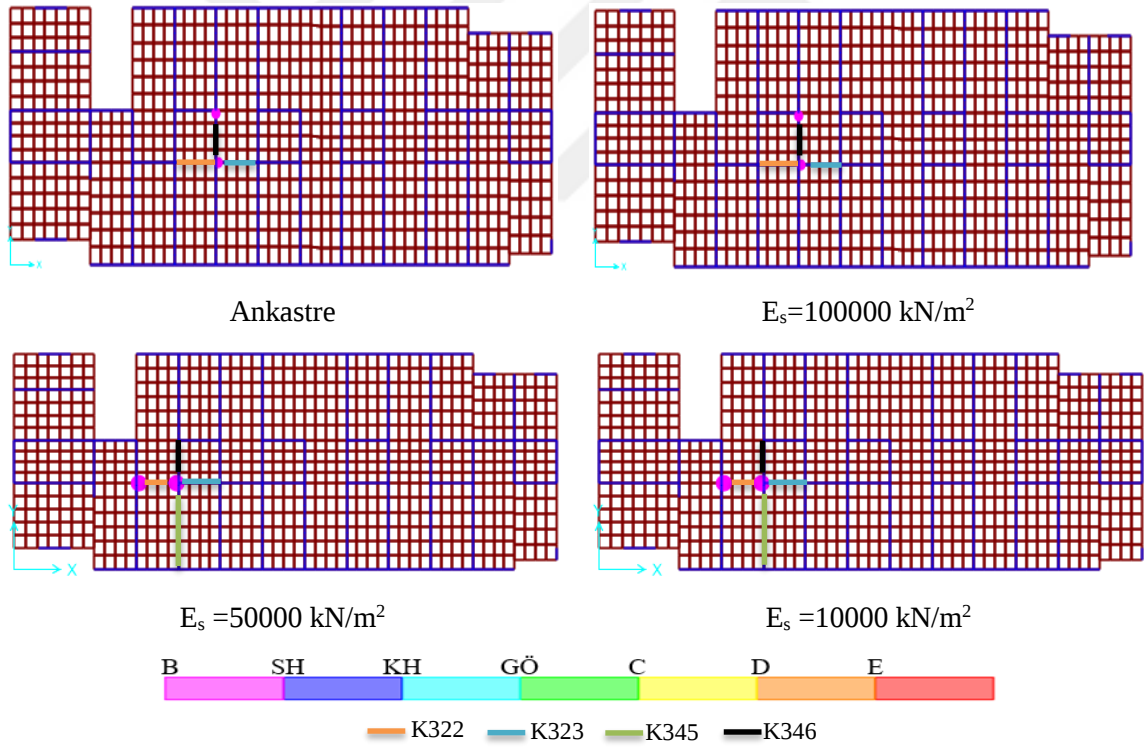
İkinci olarak seçilen D4 kolon kaldırma senaryosu uygulandığında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi ile çözümden elde edilen plastik mafsall oluşumları x-z düzlemi için Şekil 57'de y-z düzlemi için Şekil 58'de ve +10.35 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 59'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 57. D4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



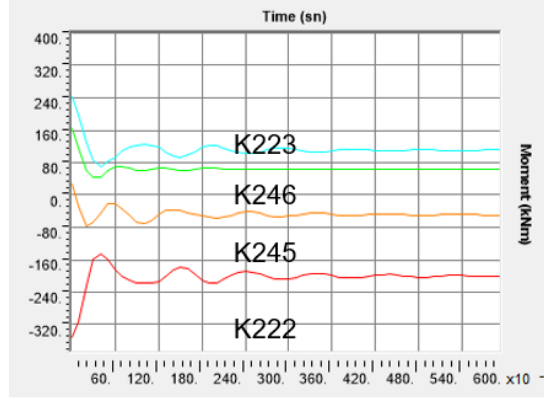
Şekil 58. D4 kolon kaldırma senaryosu için y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 59. D4 kolon kaldırma senaryosu için +10.35 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Tüm durumlar için yapı aşamalı göçmeye karşı dirençlidir. Hem kat sayısının az olması hem de açıklıkların görece daha kısa olması plastik dönmeleri sınırlamıştır. Zemin yumuşadıkça plastik mafsall sayısında artış gözlemlenmiştir.

Kaldırılan D4 kolonuna bağlanan K222, K223, K245 ile K246 kirişlerinin zamana bağlı moment değerlerindeki değişimi Şekil 60'daki gibidir.



Şekil 60. D4 kolonunun kaldırılması halinde K222, K223, K245 ve K246 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi

Plastik mafsallarda hasar seviyeleri benzer olmasına rağmen aradaki farkı görebilmek için kolona birleşen kiriş kesitlerinde elde edilen moment değerleri Tablo 21'de verilmektedir.

Tablo 21. Kaldırılan D4 kolonuna bağlanan kiriş kesitlerinde hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi

$M_y=273.28 \text{ kNm}$	Zemin elastisite modülü (kN/m^2)			
	Ankastre	100000	50000	10000
K222	297.65	298.12	298.44	298.11
K223	243.62	217.95	207.21	188.89
K245	221.19	244.13	250.32	259.70
K246	303.91	301.21	297.17	295.85

Tüm analizlerde K222 ve K246 kirişleri için elde edilen moment değerleri, kesitin akma momenti değeri olan 273.28 kNm 'yi aşmıştır. Tablodan anlaşılmaktadır ki zemin etkisi ile kiriş momentlerinde %20-25'lere varan değişimler meydana gelmiştir.

Her iki kolon kaldırma senaryosu için kolonların kaldırıldığı düğüm noktasında elde edilen düşey yer değiştirme değerleri Tablo 22'de verilmektedir.

Tablo 22. Okul binası örneğinde kaldırılan kolonların düğüm noktalarında NDP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)

	E4 kolonu	D4 kolonu
Ankastre	0.45	0.43
$E_s = 100000 \text{ kN/m}^2$	2.45	2.20
$E_s = 50000 \text{ kN/m}^2$	4.01	3.91
$E_s = 10000 \text{ kN/m}^2$	7.55	7.35

E4 ve D4 kolonu kaldırma senaryolarında zemin yumuşadıkça düşey yer değiştirme değerleri beklenildiği gibi artmaktadır. Ankastre durumda en küçük düşey yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Yer değiştirmelerin en fazla olduğu durum zemin elastisite modülünün 10000 kN/m^2 alındığı durumdur.

Genel olarak iki kolon kaldırma senaryosu için yapılan analizlerin tümünde yapının aşamalı göçmeye karşı dirençli olduğu anlaşılmıştır. Diğer bir deyişle yapı, aşamalı göçme riski taşımamaktadır. Ancak özellikle E4 kolon kaldırma senaryosu göstermiştir ki, zemin cinsine bağlı olmakla birlikte, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması yapının aşamalı göçme davranışını etkilemektedir.

Doğrusal statik analiz yöntemi ve doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminin karşılaştırması Tablo 23'deki gibidir.

Tablo 23. Okul binası yapı örneği için aşamalı göçme güvenliğinin karşılaştırması

Analiz Türü	Mesnet Koşulu	Senaryo	Aşamalı Göçme Güvenliği
LSP	Ankastre	E4 senaryosu	Güvenlidir
		D4 senaryosu	Güvenlidir
	Zeminli	E4 senaryosu	Güvenlidir
		D4 senaryosu	Güvenlidir
NDP	Ankastre	E4 senaryosu	Güvenlidir
		D4 senaryosu	Güvenlidir
	Zeminli	E4 senaryosu	Güvenlidir
		D4 senaryosu	Güvenlidir

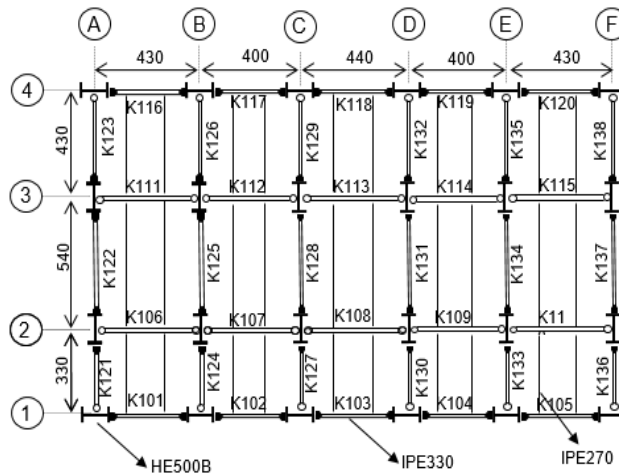
Bu örnekte hem statik analiz hem de doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminde aşamalı göçme riski değişmemiştir. Ancak burada incelenen okul binasının ilk örneğe kıyasla aşamalı göçme riskini olumlu etkileyen belirgin özellikleri vardır. Okul binası taşıyıcı sistemi son derece düzenli ve aks mesafeleri daha küçüktür. Yapıda her iki yönde

betonarme perdeler bulunmaktadır. Kullanım türü dolayısıyla yapı önem katsayısı daha büyüktür. Kat adedi de diğer örneğe göre azdır. Tüm bu bilgiler ışığında statik çözümlere bakıldığında yapının fazlasıyla güvenli olduğu da görülmektedir.

Genel olarak yapı davranışının zeminden doğrudan etkilendiği bilinmektedir. Ancak yukarıda bahsedildiği gibi yapı oldukça güvenli tasarlanmış olduğundan zeminin aşamalı göçme potansiyeli üzerindeki etkileri sınırlı kalmıştır. Ankastre mesnet kabulüne göre yapılan çözümlerle kıyaslandığında, gerek doğrusal statik analiz yöntemi sonucunda hesaplanan m oranlarında gerekse doğrusal olmayan dinamik analizler neticesinde mafsal kesitlerinde elde edilen eğilme momentlerinde yaklaşık olarak %20-25'lere varan değişiklikler görülmüştür. Zemin ortamında oluşan yer değiştirmeler, şekil değiştirmeler ve temel siteminde meydana gelen dönmeler yapı davranışını değiştirmekte ve dikkate alınan zemin rijitliği azaldıkça ortaya çıkan bu etkiler artma eğilimi göstermektedir. Bu durum yapı-zemin etkileşiminin yapının aşamalı göçme direnci üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle doğrusal olmayan dinamik analiz çözümlerinde zemin yumuşadıkça düşey yer değiştirmelerinin arttığı unutulmamalıdır.

2.3. 10 Katlı Çelik Konut Binası

Çalışma kapsamında üçüncü örnek olarak Tansel (2010)'in çalışmasından alınan ve kat planı aşağıda görülen bir çelik yapı modeli seçilmiştir. Konut olarak kullanılan bu yapı 21 m x 13 m kat alanına sahiptir. 10 katlı olan yapının, her bir kat yüksekliği 3.30 metre olup, bina toplam yüksekliği 33 metredir (Şekil 61).



Şekil 61. 10 katlı çelik konut binasına ait kalıp planı

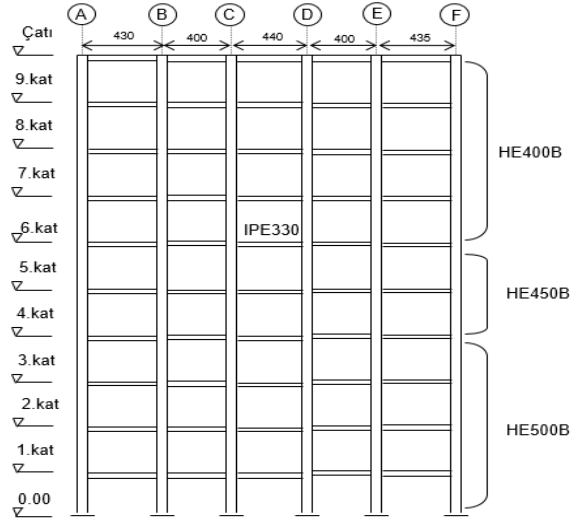
Aşamalı göçme analizine tabi tutulacak yapı öncelikle ideCAD-Statik.v10 programı ile yönetmeliklere uygunluğu kontrol edilmiştir. İhmal edilebilir bir kaç kesit düzenlemesi dışında genel olarak eleman kesitlerinin yeterli olduğu düzensizlik içermediği ve her bir kat için görelî kat ötelemelerinin yönetmelik sınırlarını aşmadığı görülmüştür. Yapıya ait geometrik ve malzeme özellikleri Tablo 24’de verilmektedir.

Tablo 24. 10 katlı çelik konut binasına ait geometri ve malzeme özellikleri

	Özellikler
Yapı cinsi	Konut
Malzemesi	Çelik
Beton sınıfı	C25
Çelik sınıfı	S355
Kolon kesitleri	HE500B, HE450B, HE400B
Kiriş kesitleri	IPE330
Tali kiriş kesitleri	IPE270
Döşeme kalınlığı (cm)	10
Trapez sac tipi	52/992
Bağlantı tipi (Moment aktaran)	Civatalı birleşim
Bağlantı tipi (Mafsallı)	Civatalı (Kesme etkisinde)
Bulunduğu bölge	Kayseri-Merkez
Yapı süneklik düzeyi	Yüksek
Deprem yer hareketi düzeyi	DD-2
Yerel zemin sınıfı	ZB
Enlem	38.720607
Boylam	35.478375
Zemin derinliği (m)	35
Zemin Poisson oranı	0.30
Zemin elastisite modülü	18000 kN/m ² (gevşek kum), 90000 kN/m ² (yoğun kum ve çakıl) ve 180000 kN/m ² (sert kil)

TBDY2018 yönetmeliğine uygunluğu kontrol edilen yapı yukarıda da belirtildiği gibi Kayseri ilinde bulunduğu varsayılmıştır. Deprem yer hareketi düzeyi, yerel zemin sınıfı, enlem ve boylam gibi bilgileride yukarıda verilmektedir. Tüm bu bilgiler ideCAD-Statik.v10 programında kullanılmıştır. Zemin derinliği, zemin poisson oranı ve zemin elastisite modülü ise MATLAB programında kullanılmıştır.

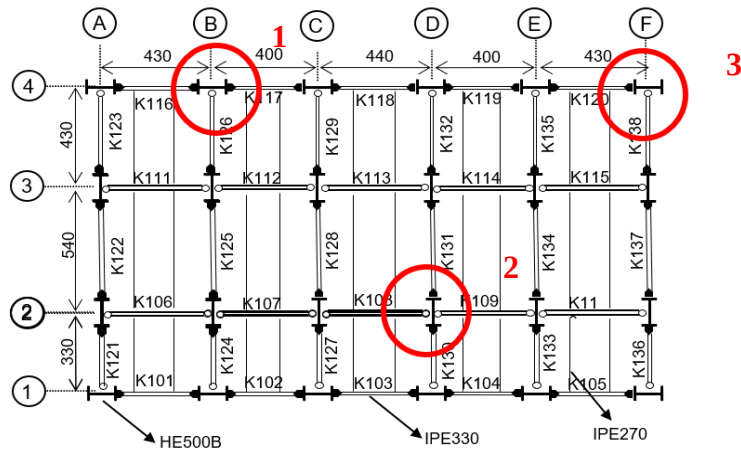
Yapıya ait 1-1 aksından alınan kesit Şekil 62’de verilmektedir.



Şekil 62. 10 katlı çelik yapı 1-1 aksı kesiti

Yapıda kat yüksekliğine göre 3 farklı çelik kolon profili kullanılmıştır. İlk 4 kat kolonları HE500B, 4. ve 5. kat kolonları HE450B ve son 4 kat kolonları HE400B kesitine sahiptir. Ana kirişler IPE330, tali kirişler ise IPE270 kesitlidir. Ana kirişler kolonların zayıf eksenlerine mafsallı, güçlü eksenlerine ise rijit olarak bağlanmışlardır.

UFC 4-023-03'de kolon kaldırma senaryolarına nasıl karar verileceği tarif edilmektedir. Aynı rehberde tasarımcı mühendisin riskli gördüğü kolonlar için de senaryo üretebileceği belirtilmektedir. Bu bağlamda 10 katlı çelik konut binası için kaldırıldığında daha fazla risk oluşturacağı düşünülen 3 farklı kolon seçilmiştir (Şekil 63). Seçilen kolonlar yapının giriş katında yer almaktadır. HE500B kesitine sahip kolonlar yerleştirildikleri aks isimlerine göre B4, D2 ve F4 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 63. 10 katlı çelik konut binası için kolon kaldırma senaryoları

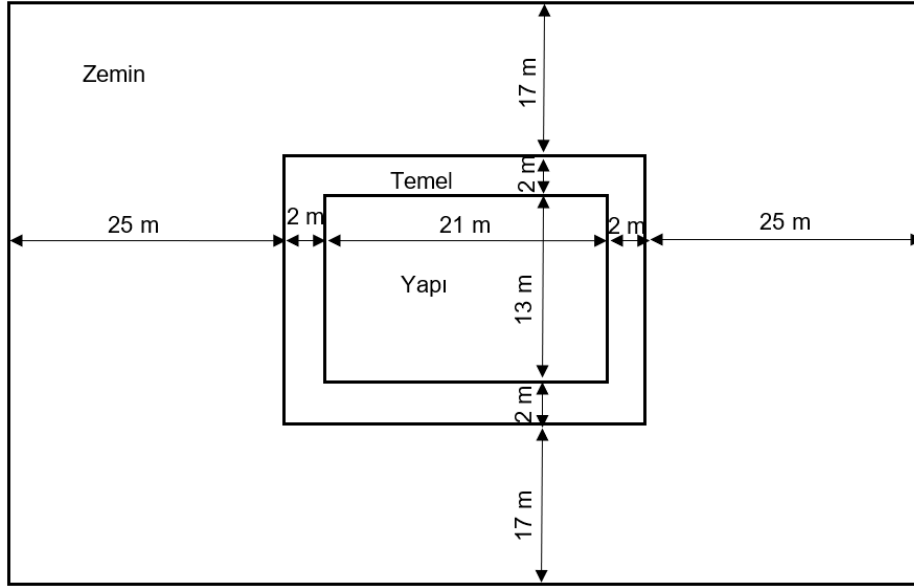
Aşamalı göçme analizlerinde kullanılacak olan yapısal yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Dikkate alınan örnekte yapıya etkiyen sabit ve hareketli yükler aşağıda verilmektedir.

<u>Çatı katı sabit yükleri (G) kN/m²</u>	5.00 kN/m ²
Ahşap çatı + kaplama	0.75
Tesviye betonu (5 cm)	1.10
Yalıtım malzemesi	0.15
Döşeme betonu (10 cm)	2.50
Beton altı trapez sac (1 mm)	0.10
Tesisat yükü	0.15
Asma tavan	0.25
<u>Çatı katı hareketli yükleri (Q) kN/m²</u>	1.50 kN/m ²
<u>Ara kat sabit yükleri (G) kN/m²</u>	5.00 kN/m ²
Kaplama + yapıştırma harcı	0.50
Tesviye betonu (5 cm)	1.10
Döşeme betonu (10 cm)	2.50
Tesisat yükü	0.15
Asma tavan	0.25
<u>Ara kat hareketli yükleri (Q) kN/m²</u>	2.00 kN/m ²
Bütün mahaller	

Yapısal analizlerde SAP2000 programı kullanılmıştır. Döşeme yükleri tali kirişlerin üzerlerine dış yük olarak atanmıştır. Ayrıca; tali kiriş öz ağırlığı IPE270 için 0.361 kN/m, ana kiriş öz ağırlığı IPE330 için 0.491 kN/m ve ana kirişlerin üzerine sıvalı duvar yükleri 7.0 kN/m olarak ilgili kirişlere eklenmiştir.

Yapı tabanda hem ankastre modellenmiş ve hem de zemin etkileri dikkate alınmıştır. Zemin etkisi önceki örneklerde olduğu gibi Geliştirilmiş Vlasov yöntemi ile modellenmiştir. Yapı, temel ve zemin sisteminin üstten görünüşü ve boyutları Şekil 64'de verilmektedir.

Yapının planda ölçüleri 13×21 m şeklindedir. Radye temel, yapının oturma alanından her iki yönde 2'şer metre ampatman yapacak şekilde boyutlandırılmış ve kalınlığı 0.80 m olarak alınmıştır. Zemin etki alanı ise temelin 3 katı olacak şekilde x yönünde 25 m y yönünde ise 17 metre'dir.



Şekil 64. 10 katlı çelik konut binası için kolon kaldırma senaryoları

Konut binası örneği daha önce analizleri yapılan 2 adet betonarme örneğine benzer olarak zeminli ve ankastre durumlar için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Her iki durum için hem doğrusal statik hem de doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri ile aşamalı göçme analizi yapılmıştır. UFC 4-023-03 (2016) rehberi talimatlarına göre elde edilen veriler değerlendirilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur.

2.3.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm

Çelik yapılarda m -faktör değerleri kirişler için ASCE 41-13 Şekil 9-4'de yer alan “Acceptance Criteria for Linear Procedures of Structural Steel Components” tablosundan alınmaktadır (Şekil 3). Bu tabloda kirişin davranış koşullarına bağlı olarak m -faktör değerleri sunulmaktadır. Kullanılacak m -faktör değerlerine elemanın başlık ve gövde narinliğine göre karar verilmektedir. Tabloda taşıyıcı olan elemanlar “Primary (Birincil)” ve taşıyıcı olmayan elemanlar “Secondary (İkincil)” olarak tanımlanmaktadır. Taşıyıcı olan elemanlar için daha düşük m -faktör değerlerinin verildiği görülmektedir. Performans seviyeleri de ilerledikçe (SH, KH, GÖ) sınır değerler de büyümektedir.

Rehbere göre eğilmeye çalışan kirişler için GÖ performans noktası sınır değer olarak kabul edilmektedir. Aşağıdaki örnekte yer alan matematiksel hesaplar IPE330 kesitine aittir.

$$\frac{b_f}{2t_f} = \frac{160}{2 \times 11.5} = 6.96 \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}} = \frac{52}{\sqrt{51.49}} = 7.25$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{248.6}{7.1} = 35.01 \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}} = \frac{418}{\sqrt{51.49}} = 58.25$$

Yukarıda hesaplanan oranlar dikkate alındığında m -faktör değeri 8 olarak belirlenmiştir. Bu değer yapısal çelik elemanlar için aşılmaması gereken üst sınır değerini göstermektedir.

Birleşim elemanlarının da hesaplarda değerlendirilmesi isteniyorsa birleşimler için ayrıca aşılmaması gereken üst sınırın hesaplanması gerekir. Yapısal çelik elemanlar ve birleşimler için hesaplanan m -faktör değerlerinden küçüğü sınır değer olarak kullanılır. Birleşimler için m -faktör değerleri Tablo 2'den alınmaktadır. Tabloda rijit birleşimler, yarı-rijit birleşimler ve mafsallı birleşimler olmak üzere farklı bağlantı tipleri için farklı kabul kriterleri verilmektedir. Taşıyıcı olan elemanlar için daha düşük m -faktör değerlerinin verildiği görülmektedir. İncelenen örnekte kolonların zayıf ekseninde mafsallı, kuvvetli ekseninde ise rijitleştirilmiş alın levhali birleşimler ile kirişlere bağlandığı kabul edilmiştir. Tablo 2'den rijitleştirilmiş birleşim tipi için m -faktör değeri cıvatalı birleşim satırından aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$2.3 - 0.021d = 2.3 - 0.021 \times 12.99 = 2.03$$

Mafsallı birleşim için ise, bağlantının bulonda kesme olduğu kabul edilerek,

$$5.8 - 0.107d_{bg} = 5.8 - 0.107 \times 7.87 = 4.96$$

şeklinde hesaplanmıştır.

UFC 4-023-03 rehberine göre yapısal elemanlar ve birleşimler için hesaplanan m -faktör değerlerinden küçüğü kullanılmalıdır. Bu nedenle m -faktör değerinin üst limiti **2.03** olarak belirlenmiştir. Yük artırım faktörü ise UFC 4-023-03 rehberi Table 3.4 *Load Increase Factors For Linear Static Analysis* kullanılarak **2.927** olarak hesaplanmıştır. Bu durumda kolon kaldırma senaryolarından sonra kirişler için hesaplanan m değerleri 2.03'den fazla olmamalıdır. Aksi durumda yapı elemanının aşamalı göçmeye karşı yetersiz kaldığı anlaşılabacaktır.

Kaldırılan kolona komşu döşemeler için (G_{LD}) ve diğer döşemeler için (G) düşey yükleri Tablo 25'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 25. 10 katlı çelik konut binası için hesaplanan G ve G_{LD} döşeme yükleri

	G (kN/m ²)	G_{LD} (kN/m ²)
Çatı katı	6.525	19.099
Diğer katlar	6.400	19.008

Her bir senaryo için ayrı ayrı aşamalı göçme analizi yapılarak kiriş maksimum momentleri programdan okunmuştur. Ayrıca SAP2000 programının Section Designer kısmında kiriş kesiti çizilerek IPE 330 için beklenen (ortalama) moment dayanımı **371.61 kNm** olarak bulunmuştur. Analiz sonucunda elde edilen maksimum moment değerleri ve beklenen (ortalama) moment dayanımı Denklem 2’de kullanılarak ilgili kirişlerin m değerleri hesaplanmıştır. Aşamalı göçme güvenliği açısından hesaplanan bu değerlerin ilgili tablolardan alınan m -faktör üst limit değerini aşmaması gerekmektedir. Aksi durum yapı elemanının aşamalı göçmeye karşı yetersiz olduğu anlamına gelmektedir.

İlk senaryo olarak seçilen B4 kolonu için farklı zemin türleri dikkate alınarak elde edilen m değerleri Tablo 26’da verilmektedir.

Tablo 26. B4, D2 ve F4 senaryolarının *m* oranlarının zemin cinsi ile değişimi

B4 kolon kaldırma senaryosu					D2 kolon kaldırma senaryosu					F4 kolon kaldırma senaryosu				
Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)				Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)				Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)			
	Ankastre	180000	90000	18000		Ankastre	180000	90000	18000		Ankastre	180000	90000	18000
K117	1.52	1.50	1.52	1.74	K108	0.48	0.42	0.43	0.47	K120	1.53	1.58	1.61	1.73
K217	1.46	1.44	1.48	1.68	K208	0.50	0.44	0.44	0.49	K220	1.47	1.52	1.56	1.70
K317	1.40	1.38	1.43	1.61	K308	0.51	0.45	0.45	0.50	K320	1.41	1.46	1.50	1.65
K417	1.34	1.32	1.39	1.56	K408	0.52	0.46	0.47	0.51	K420	1.35	1.40	1.44	1.58
K517	1.28	1.26	1.34	1.52	K508	0.53	0.48	0.48	0.52	K520	1.30	1.34	1.38	1.51
K617	1.23	1.21	1.31	1.48	K608	0.54	0.48	0.49	0.52	K620	1.25	1.30	1.33	1.45
K717	1.19	1.16	1.27	1.44	K708	0.55	0.49	0.49	0.53	K720	1.21	1.25	1.28	1.39
K817	1.16	1.14	1.26	1.43	K808	0.56	0.50	0.50	0.54	K820	1.18	1.22	1.25	1.35
K917	1.16	1.13	1.26	1.43	K908	0.56	0.58	0.58	0.55	K920	1.16	1.19	1.22	1.32
K1017	1.06	1.04	1.13	1.26	K1008	0.70	0.63	0.63	0.67	K1020	1.05	1.08	1.10	1.20
K126	0.58	0.52	0.49	0.39	K131	3.68	3.54	3.35	3.31	K130	0.73	0.78	0.81	0.95
K226	0.54	0.49	0.45	0.33	K231	3.78	3.64	3.63	3.59	K230	0.73	0.79	0.84	1.04
K326	0.51	0.46	0.43	0.36	K331	3.66	3.53	3.52	3.53	K330	0.71	0.74	0.77	0.90
K426	0.48	0.43	0.40	0.32	K431	3.58	3.45	3.44	3.41	K430	0.68	0.72	0.74	0.88
K526	0.45	0.40	0.37	0.29	K531	3.50	3.37	3.37	3.39	K530	0.66	0.69	0.72	0.85
K626	0.42	0.38	0.35	0.27	K631	3.43	3.31	3.30	3.32	K630	0.63	0.67	0.69	0.82
K726	0.40	0.35	0.32	0.24	K731	3.38	3.26	3.26	3.27	K730	0.61	0.64	0.66	0.78
K826	0.38	0.33	0.30	0.22	K831	3.35	3.24	3.24	3.28	K830	0.59	0.61	0.64	0.75
K926	0.36	0.31	0.28	0.20	K931	3.42	3.30	3.30	3.33	K930	0.57	0.60	0.62	0.73
K1026	0.31	0.27	0.25	0.17	K1031	3.13	3.02	3.01	3.04	K1030	0.50	0.52	0.54	0.63

B4 kolonu kaldırma senaryosu için yapılan analizler incelendiğinde özellikle zemin yumuşadıkça m değerlerinde artış/azalış fazlalaşmıştır. Her iki ekseninde de zemin etkisi m değerleri üzerinden görülebilmektedir. K117-K1017 kirişlerinin olduğu x-z ekseninde m değerleri zemin yumuşadıkça artmış, K126-K1026 kirişlerinin olduğu y-z ekseninde m değerlerinin zemin yumuşadıkça azaldığı görülmüştür. Bu durum kirişler üzerinde zemin etkisini net olarak göstermektedir. İkinci olarak seçilen D2 kolon kaldırma senaryosunda zeminli modellerde x-z ekseninde yer alan K108-K1008 kirişlerinde %1-2 oranından değişiklikler olduysa da bu farklılıklar ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. y-z ekseninde yer alan K131-K1031 kirişlerinde %12'ye varan oranda azalışlar meydana gelmiştir. F4 kolon kaldırma senaryosunda ise zeminli modellerde x-z ekseninde yer alan K120-K1020 kirişlerinde ve y-z ekseninde yer alan K130-K1030 kirişlerinde %25'lere varan oranda artışlar meydana gelmiştir.

Modelde doğrusal statik analiz yöntemi kullanılarak analiz edilen her bir kolon kaldırma senaryosu birlikte değerlendirildiğinde, zeminin aşamalı göçme üzerindeki etkisi hakkında, ortak bir sonuca ulaşmak güçtür. Ancak genel olarak zemin etkisinin uygulanan senaryoya bağlı olarak davranışı önemli ölçüde değiştirdiği söylenebilir.

B4, D2 ve F4 kolon kaldırma senaryoları dikkate alınarak hem ankastre hem de 3 farklı zeminli durumları için kolonun kaldırıldığı düğüm noktasında elde edilen düşey yer değiştirmeler Tablo 26'de verilmektedir.

Tablo 26. 10 katlı çelik konut binasında kaldırılan kolonların düğüm noktalarında LSP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)

	B4 kolonu	D2 kolonu	F4 kolonu
Ankastre	6.00	22.06	7.52
$E_s = 180000 \text{ kN/m}^2$	6.84	22.51	8.83
$E_s = 90000 \text{ kN/m}^2$	7.66	23.61	9.97
$E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$	13.43	28.45	16.91

Tüm zemin koşulları için kaldırılan kolana bağlanan düğüm noktalarının düşey yer değiştirmeleri beklenildiği gibi zemin yumuşadıkça artmaktadır. D2 kolon kaldırma senaryosunda yapı elemanı taşıma gücünü kaybettiği hatırlanmalıdır. Bu durum LSP yöntemi ile düşey yer değiştirme değerine yansımıştır. $E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$ olan zeminde D2 kolonu için düşey yer değiştirme 28.45 cm olarak elde edilmiştir.

2.3.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm

Doğrusal olmayan dinamik analizlerinde kullanılacak düşey ve yatay yükler Denklem 6, 7 ve 8 yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Çatı katı için düşey yükler;

$$G_{ND} = 1.2 \times 5.00 + 0.5 \times 1.5 = 6.75 \text{ kN/m}^2$$

Çatı katı için yatay yükler;

$$\sum P = 6.75 \times 13 \times 21 = 1842.75 \text{ kN}$$

$$LLAT = 0.002 \times 1842.75 = 3.69 \text{ kN}$$

Diğer katlar düşey yükleri;

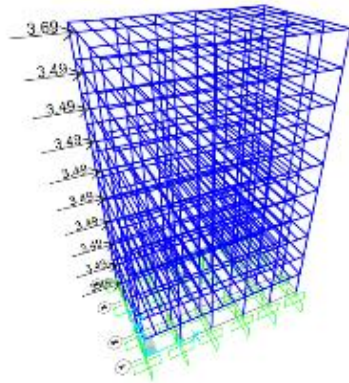
$$G_{ND} = 1.2 \times 4.5 + 0.5 \times 2 = 6.40 \text{ kN/m}^2$$

Diğer katlar düşey yükleri;

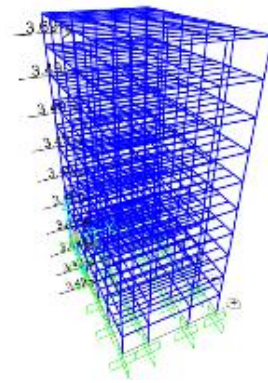
$$\sum P = 6.40 \times 13 \times 21 = 1747.20 \text{ kN}$$

$$LLAT = 0.002 \times 1747.20 = 3.49 \text{ kN}$$

UFC 4-023-03 rehberine göre 2016 yılında yapılan güncelleme ile yatay yüklerin aşamalı göçme analizlerinde kullanılma zorunluluğu kaldırılmıştır. Ancak 10 katlı çelik konut binasında yatay yükler hesaba katılmıştır. Elde edilen kat yatay yükleri 4 farklı yönde (X_p , X_n , Y_p ve Y_n yönlerinde) yapı modeline tekil yük olarak uygulanmaktadır. Modele atanan yatay yükler Şekil 65'de gösterilmektedir.



a) x pozitif yönünde



b) y pozitif yönünde

Şekil 65. 10 katlı çelik konut binası için atanan yatay yüklerin görünümü

Yapı elemanlarının mafsallı birleşimleri aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi dönme rijitlikleri için sıfır değerleri girilerek kirişin her iki ucuna dönme serbestliği verilmesiyle tanımlanmıştır (Şekil 66).

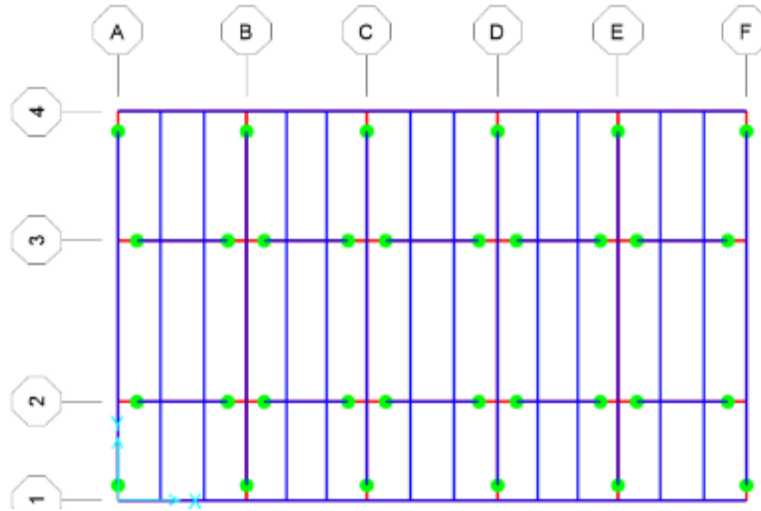
Frame Releases		Release		Frame Partial Fixity Springs	
		Start	End	Start	End
Axial Load	☐				
Shear Force 2 (Major)	☐				
Shear Force 3 (Minor)	☐				
Tension	☐				
Moment 22 (Minor)	☒	0		0	
Moment 33 (Major)	☒	0		0	

Clear All Releases in Form

OK Close Apply

Şekil 66. SAP2000 programında çubuk elemanlara dönme serbestliği atanması

Tüm katlarda birleşimler aynı olduğundan kirişlere serbestlik tanımlandığında yapının herhangi bir katından alınan ekran görüntüsü aşağıdaki gibidir (Şekil 67).



Şekil 67. 10 katlı çelik konut binası mafsallı birleşimlerin görünümü

Betonarme yapılardan farklı olarak çelik yapılarda kiriş ortasına da mafsallı atanmıştır. Bu örnek özelinde her kiriş 5 adet plastik mafsallı atanması yapılmıştır. Bu plastik mafsalların üçü, kirişin iki kenarına ve ortasına atanan ve yukarıda kirişler için elde edilen kuvvet deformasyon ilişkisinin atandığı mafsallardır. Ayrıca kirişlerin iki ucunun bağlanma tipine

göre (Cıvatalı birleşim ya da cıvata kesme) hesaplanan mafsallar atanmıştır (Şekil 71). SAP2000 programı ASCE 41-13 yönetmeliğini dikkate almaktadır. Bu tezde mafsal özellikleri ve kabul kriterleri kullanıcı tanımlı olarak belirlenmiştir. Bu mafsalların özellikleri SAP2000 programında Şekil 68, Şekil 69 ve Şekil 70'de görülen pencereler kullanılarak tanımlanmıştır.

Point	Moment/SF	Rotation/SF
D-	-0.59	-8.86
C-	-1.1	-8.86
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.1	8.86
D	0.59	8.86
E	0.59	10.86

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero
☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

☐ Use Yield Moment Moment SF: 235.45 Negative:
☒ Use Yield Rotation Rotation SF:
(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

☒ Immediate Occupancy Positive: 0.98 Negative:
☐ Life Safety Positive: 8.83 Negative:
☐ Collapse Prevention Positive: 10.80 Negative:
☒ Show Acceptance Criteria on Plot

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Isotropic
No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

OK Cancel

Şekil 68. Kirişlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-0.2	-0.0422
D-	-0.2	-0.0171
C-	-1.1	-0.0171
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.1	0.0171
D	0.2	0.0171
E	0.2	0.0422

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero
☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

☐ Use Yield Moment Moment SF: 235.45 Negative:
☐ Use Yield Rotation Rotation SF: 1. Negative:
(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

☒ Immediate Occupancy Positive: 3.000E-03 Negative:
☐ Life Safety Positive: 0.012 Negative:
☐ Collapse Prevention Positive: 0.015 Negative:
☐ Show Acceptance Criteria on Plot

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Isotropic
No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

OK Cancel

Şekil 69. Ankastre birleşimlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-0.2	-0.0547
D	-0.2	-0.0384
C	-1.1	-0.0384
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.1	0.0384
D	0.2	0.0384
E	0.2	0.0547

Load Carrying Capacity Beyond Point E
☒ Drops To Zero
☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation
☐ Use Yield Moment Moment SF 235.45
☐ Use Yield Rotation Rotation SF 1.
 (Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)
☒ Immediate Occupancy 3.000E-03
☐ Life Safety 0.012
☐ Collapse Prevention 0.015
☐ Show Acceptance Criteria on Plot

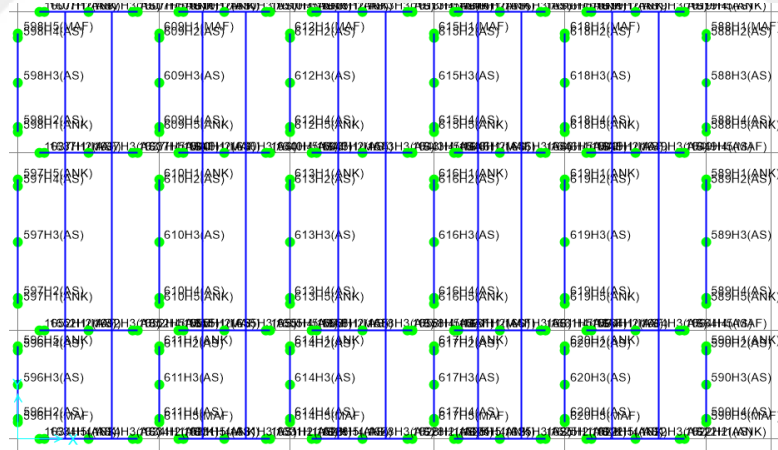
Type
☒ Moment - Rotation
☐ Moment - Curvature
 Hinge Length
☐ Relative Length

Hysteresis Type And Parameters
 Hysteresis Type Isotropic
 No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

OK Cancel

Şekil 70. Mafsallı birleşimlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması

Daha önce belirtildiği gibi rehber göre GÖ performans noktası sınır değeri olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki tabloya bakarsak GÖ ile C noktası plastik dönmeleri aynıdır. Dolayısı ile çözümler neticesinde hasar seviyesinin göçme bölgesine (yeşil ya da sarı mafsall oluşumu) ulaştığı durumda elemanın aşamalı göçme direncini kaybettiği kabul edilecektir.



Şekil 71. 10 katlı çelik konut binası için atanan plastik mafsalların görünüşü

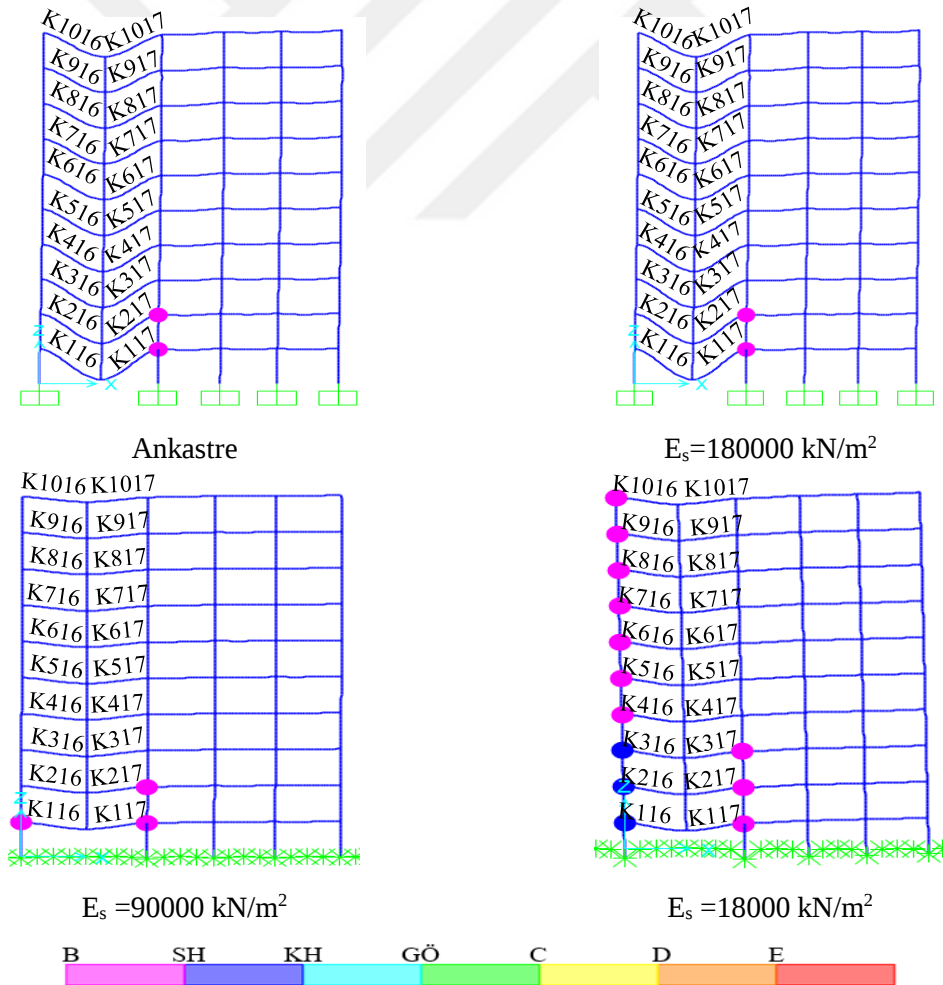
Doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminde zaman tanım alanında yapılan hesaplamalarda kullanılmak üzere yapı periyotlarına ihtiyaç vardır. Analiz sonucunda tüm modeller için elde edilen doğal titreşim periyotları Tablo 27'de verilmektedir. Doğal titreşim periyotları ankastre modelden zemin elastisite modülü düşük olan modele doğru gidildikçe beklenildiği gibi artmaktadır.

Tablo 27. 10 katlı çelik konut binası için elde edilen doğal titreşim periyotları

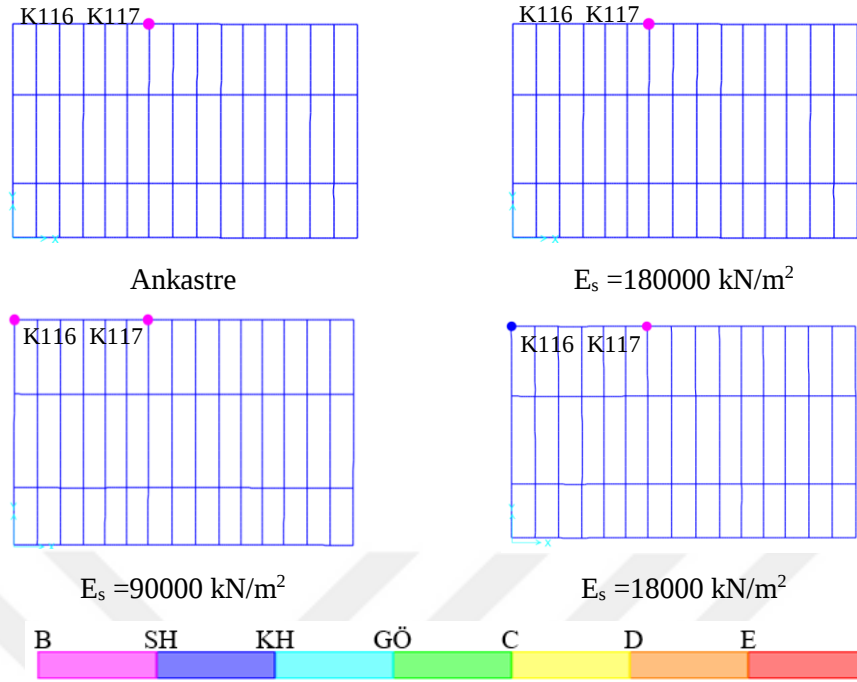
	$T_{1x}(\text{sn})$	$T_{1y}(\text{sn})$	$T_{2x}(\text{sn})$	$T_{2y}(\text{sn})$
Ankastre	2.84415	3.64721	1.22297	1.24111
$E_s = 180000 \text{ kN/m}^2$	3.48692	3.95636	1.40644	1.32829
$E_s = 90000 \text{ kN/m}^2$	3.51882	4.08739	1.40764	1.57382
$E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$	3.71070	4.47284	1.41499	1.61129

SAP2000 modelleri tamamlandıktan sonra seçilen 3 farklı kolon kaldırma senaryosu hem ankastre hem de yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemine göre aşamalı göçme analizine tabi tutulmuştur.

B4 kolon kaldırma senaryosundan elde edilen plastik mafsalları görüntüleri x-z düzlemi için Şekil 72'de ve +3.30 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 73'de verilmektedir. Tüm analizlerde y-z düzleminde mafsallaşma meydana gelmemiştir.



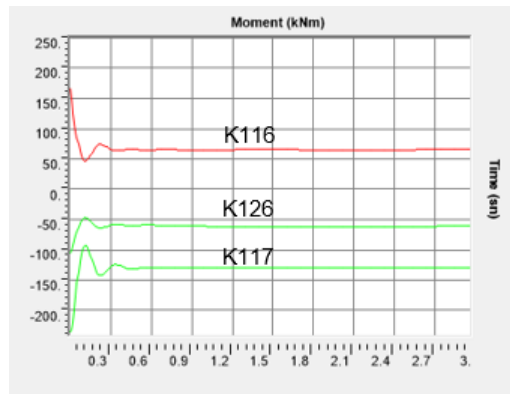
Şekil 72. B4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsalları oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 73. B4 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Şekillerden zemin elastisite modülü azaldıkça hem kiriş plastik dönmelerinde hem de plastik mafsallarda artışlar meydana geldiği görülmektedir. $E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$ olan zeminde mafsallaşma kat yüksekliği boyunca görülmektedir. Ancak bu durum mafsall renklerinden de anlaşılacağı üzere yapının aşamalı göçme direncini etkilememiştir.

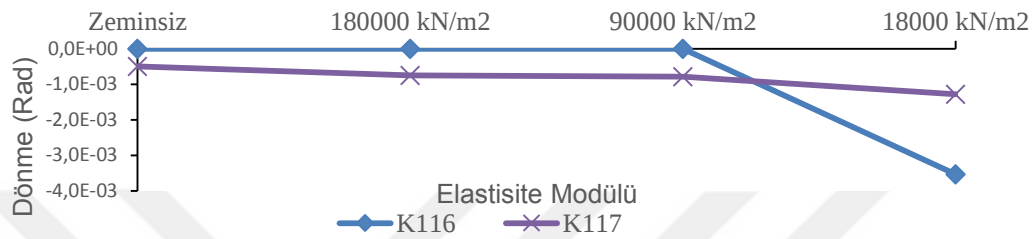
Şekil 74'de K116, K117 ve K126 kirişleri için analiz süresince hesaplanan mesnet momenti değerlerinin zamanla değişimi verilmektedir.



Şekil 74. B4 kolonunun kaldırılması halinde K116, K117, K126 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi

Kolon kaldırıldığında K116 kirişi neredeyse ilk saniyelerde 166.5 kNm'lik pozitif momente ulaşmıştır. 0.03 sn civarında 46.45 kNm moment değerine düşmüş ve zamanla dengelenmiştir. x-z düzleminde yer alan K117 ve K126 kirişlerinde de benzer davranış görülmektedir.

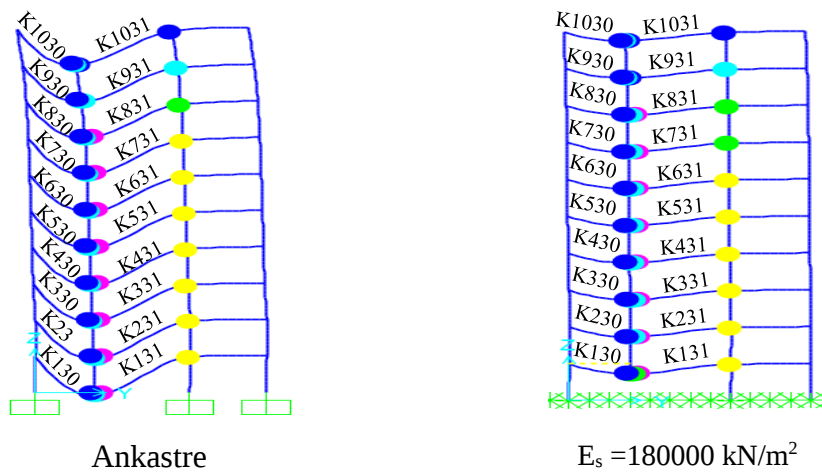
Kaldırılan kolona bağlanan K116 ve K117 kirişlerinin uzak düğüm noktaları için hesaplanan plastik dönme değerleri Şekil 75'de verilmektedir.



Şekil 75. B4 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

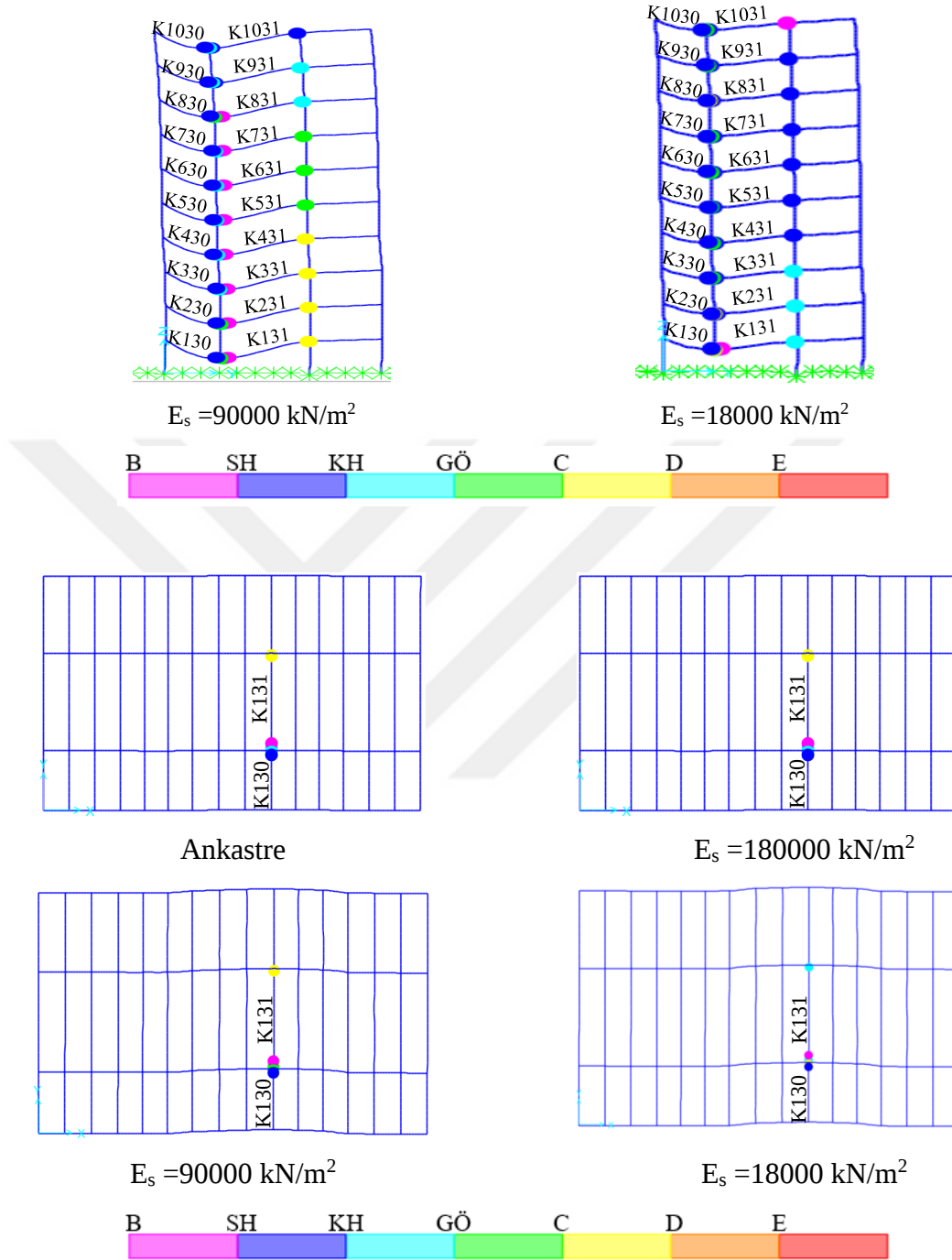
Yukarıdaki grafik plastik mafsall görüntülerini desteklemektedir. Zemin yumuşadıkça hem K116 hem de K117 kirişinde dönme artmaktadır. Özellikle K117 kirişinde $E_s = 18000$ kN/m² olan zeminin dönme değerinde artış göze çarpmaktadır. Grafikten yapı-zemin etkileşiminin aşamalı göçme analizi sonuçları üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir.

İkinci olarak seçilen D2 kolon kaldırma senaryosundan elde edilen plastik mafsall görüntüleri x-z düzlemi için Şekil 76'da ve +3.30 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 77'de verilmektedir. Tüm analizlerde y-z düzleminde mafsallaşma meydana gelmemiştir.



Şekil 76. D2 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Şekil 76'nın devamı

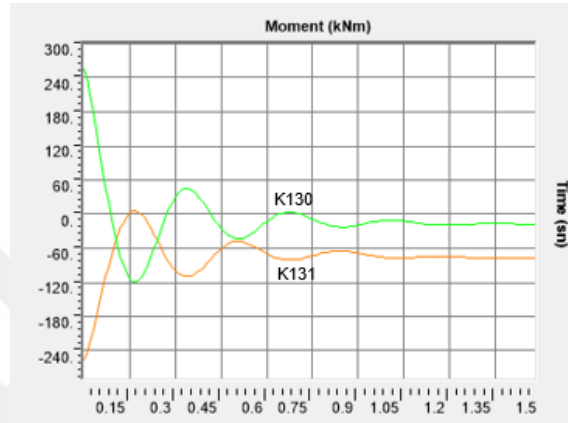


Şekil 77. D2 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Tabanda ankastre kabulü ile yapılan analizlerde kiriş birleşim mafsallarındaki dönme değerlerinin göçme bölgesine ulaştığı görülmektedir. Farklı zemin türleri için yapılan analizlerde ise zemin elastisite modülünün azalması ile birlikte mafsall hasar düzeylerinde

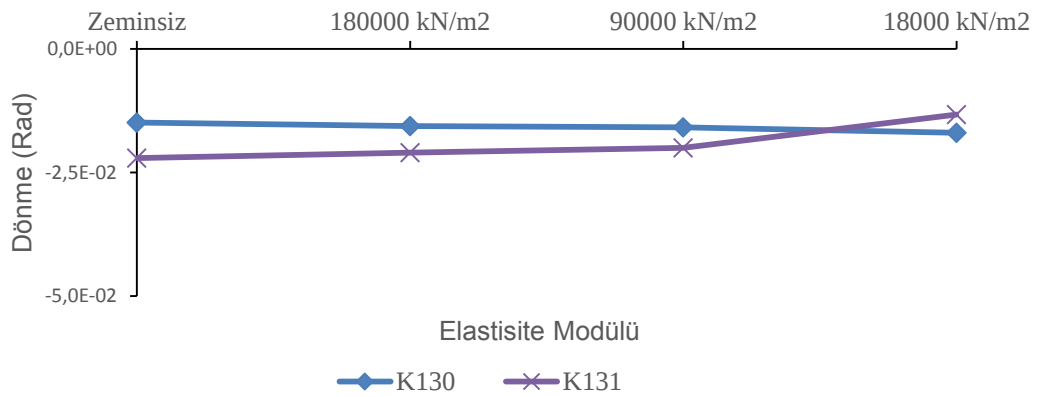
azalış meydana gelmektedir. Bunun nedeni zemin etkisiyle elemanlar arası yük aktarımının yani adaptasyonun değişmesidir.

Şekil 78’de K130 ve K131 kirişleri için analiz süresince hesaplanan mesnet moment değerlerinin zamanla değişimi verilmektedir. K108 ve K109 kirişlerinin her iki ucu mafsallı birleşim olduğundan sunulmamıştır. Şekilden yaklaşık 1 saniye içerisinde her iki kirişin denge konumuna geldiği görülmektedir.



Şekil 78. D2 kolonunun kaldırılması halinde K130 ve K131 kiriş mesnet momentlerinin zamanla değişimi

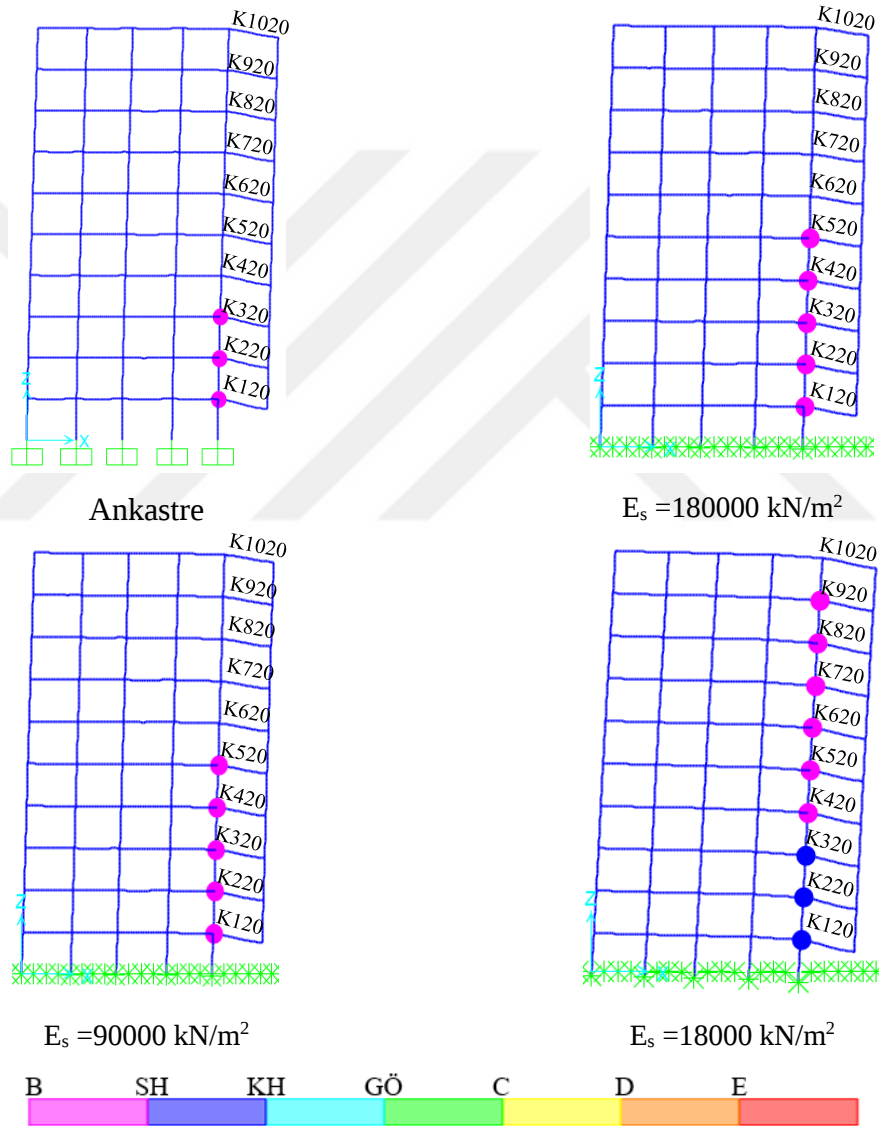
Kaldırılan D2 kolonuna bağlanan K130 ve K131 kirişlerine ait farklı elastisite modülü için elde edilen plastik dönme değerleri Şekil 79’da verilmektedir.



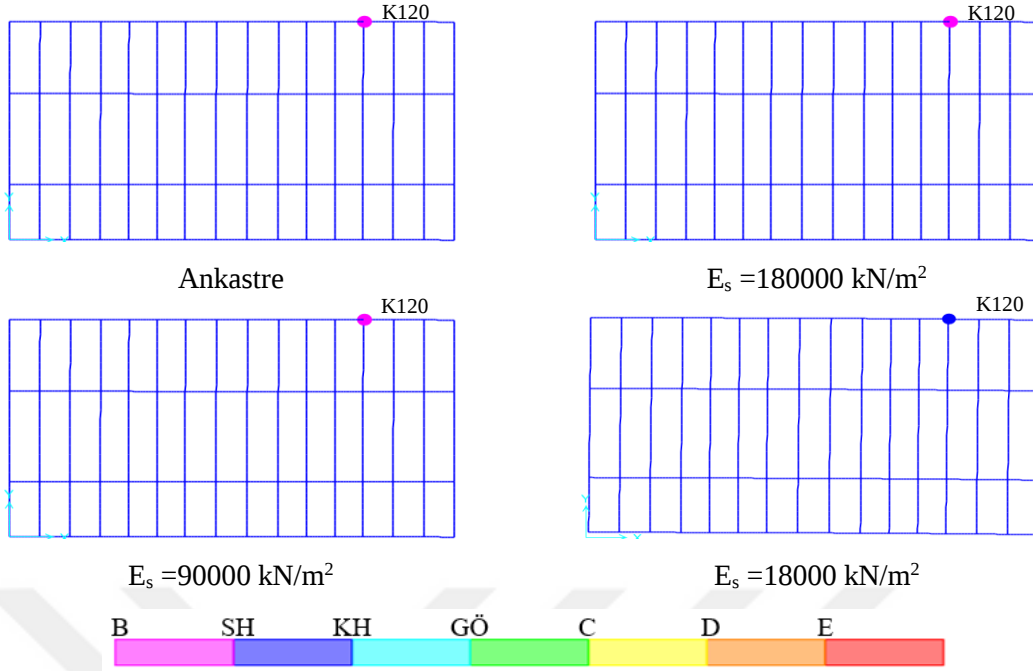
Şekil 79. D2 kolonunun kaldırılması halinde K130 ve K131 kirişleri plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi

Grafikten analılacağı üzere K130 kirişinde zemin yumuşadıkça dönme değerlerinde az da olsa bir artış meydana gelmiştir. K131 kirişinde ise diğer yapı elemanalarının yardımıyla yük aktarımı gerçekleşmiş ve dönme değerleri azalmıştır. Zemine bağlı olarak plastik dönmelerdeki değişimin sınırlı kaldığı görülmektedir.

Son olarak seçilen F4 kolon kaldırma senaryosu için elde edilen plastik mafsalları görüntüleri x-z düzlemi için Şekil 80 'de ve +3.30 kotu x-y düzlemi için ise Şekil 81'de verilmektedir. Tüm analizlerde y-z düzleminde mafsallaşma meydana gelmemiştir.



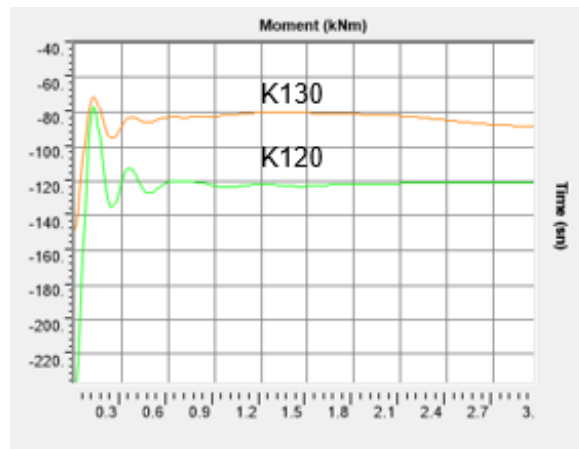
Şekil 80. F4 kolon kaldırma senaryosu için x-z düzleminde plastik mafsalları oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi



Şekil 81. F4 kolon kaldırma senaryosu için +3.30 kotu x-y düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

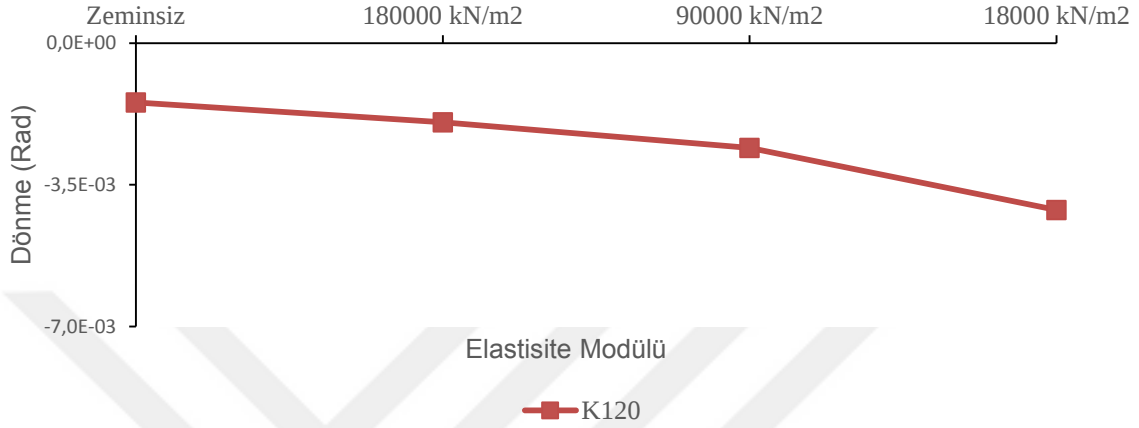
Son senaryo olan F4 kolon kaldırma senaryosuna göre x-z düzlemindeki kirişlerde zemin yumuşadıkça hem oluşan mafsal sayısında hem de plastik dönmelerde artış olmuştur. Ancak tüm analizlerde yapının aşamalı göçmeye karşı dirençli kaldığı görülmüştür.

Şekil 82’de K130 ve K131 kirişleri için analiz süresince hesaplanan mesnet moment değerlerinin zamanla değişimi verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi her iki kirişte de yaklaşık 0.6 saniye sonra moment değerleri neredeyse sabitlenmiştir.



Şekil 82. F4 kolonunun kaldırılması halinde K120 ve K130 kiriş açıklık momentlerinin zamanla değişimi

y-z düzlemindeki K138 kirişinde plastik dönme meydana gelmediğinden x-z düzlemindeki K120 kirişine ait plastik dönme değerlerinin zemin elastisite modülüne göre değişimi Şekil 83'deki gibidir. x-z düzleminde bulunan K120 kirişi için elastisite modülü azaldıkça (zemin yumuşadıkça) dönme miktarında artış görülmektedir.



Şekil 83. F4 kolonunun kaldırılması halinde K120 kirişi plastik dönmelerinin zemin cinsi ile değişimi

Kaldırılan kolonun üst ucunda meydana gelen düşey yer değiştirmelerin zemin cinsine göre değişimi Tablo 28'da verilmektedir.

Tablo 28. 10 katlı çelik konut binasında kaldırılan kolonların düğüm noktalarında NDP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)

	B4 kolonu	D2 kolonu	F4 kolonu
Ankastre	2.95	17.93	4.16
$E_s = 180000 \text{ kN/m}^2$	3.46	18.81	4.98
$E_s = 90000 \text{ kN/m}^2$	3.98	19.62	5.84
$E_s = 18000 \text{ kN/m}^2$	8.35	25.24	11.95

Tablodan görüldüğü gibi B4, D2 ve F4 kolon kaldırma senaryoları için elastisite modülü azaldıkça düşey yer değiştirme değerleri artmaktadır. Ankastre durum en rijit olduğu durumdur. Bu nedenle en küçük düşey yer değiştirme değerleri bu analizde elde edilmiştir. D2 senaryosunun tüm zemin durumlarında taşıma gücünü kaybettiği önceki bölümde bahsedilmiştir. Bu durum düşey yer değiştirme değerlerine de yansımıştır.

Doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarına göre zeminin yapı üzerindeki etkisi üst yapıda oluşan plastik dönmeleri etkilemektedir. Özellikle zemin etkileri hesaba katıldığında

bazı kirişlerin taşıma gücünü kaybettiği görülmüştür. Ancak D2 kolon kaldırma senaryosunda olduğu gibi bazı durumlarda zeminin üst yapıya olumlu olarak katkı sağladığı da görülmüştür. Zeminin ankastre modellere göre meydana gelen mafsalsayılarında ve dönme açılarında değişim oluşturduğu açıktır. Bu durum zemin-yapı etkileşiminin aşamalı göçme analizlerinde ne denli önemli olduğunu göstermektedir.

LSP ve NDP analizlerinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 29’da bir arada özetlenmektedir.

Tablo 29. 10 katlı çelik konut binası için aşamalı göçme güvenliğinin karşılaştırması

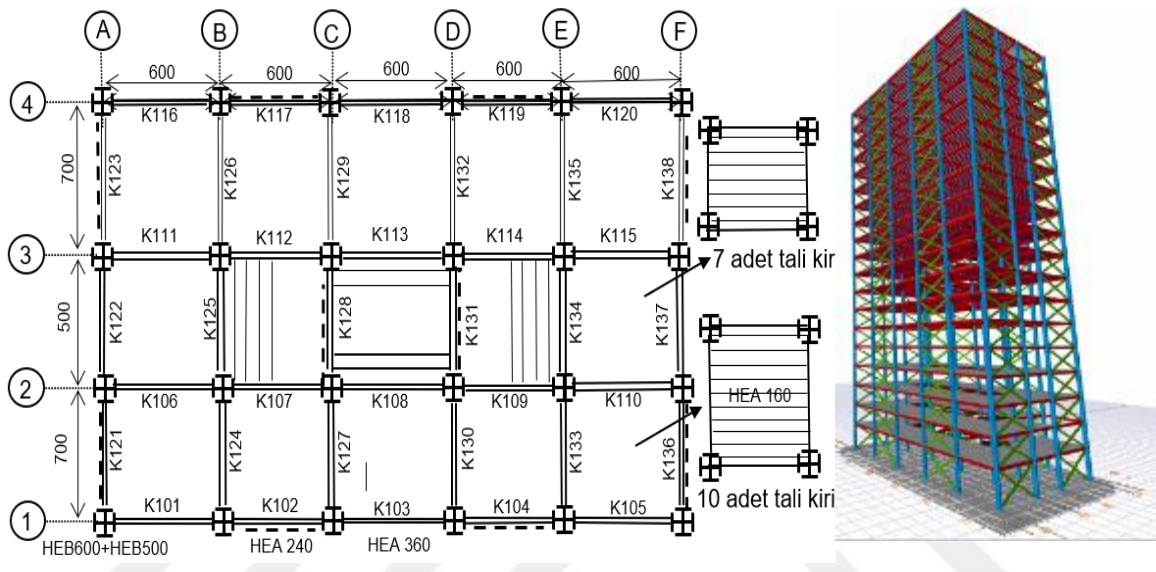
Analiz Türü	Mesnet Koşulu	Senaryo	Aşamalı Göçme Güvenliği
LSP	Ankastre	B4 senaryosu	Güvenlidir
		D2 senaryosu	9 kırışte aşamalı göçme direnci sağlanamamıştır
		F4 senaryosu	Güvenlidir
	Zeminli	B4 senaryosu	Güvenlidir
		D2 senaryosu	10 kırışte aşamalı göçme direnci sağlanamamıştır
		F4 senaryosu	Güvenlidir
NDP	Ankastre	B4 senaryosu	Güvenlidir
		D2 senaryosu	7 kırışte aşamalı göçme direnci sağlanamamıştır
		F4 senaryosu	Güvenlidir
	Zeminli	B4 senaryosu	Güvenlidir
		D2 senaryosu	7 kırışte aşamalı göçme direnci sağlanamamıştır
		F4 senaryosu	Güvenlidir

B4 ve F4 kolon kaldırma senaryolarında LSP ve NDP ile yapılan analizlerde yapının aşamalı göçmeye karşı güvenli olduğu görülmüştür. D2 senaryosuna göre hem NDP hem de LSP yönteminde bazı kirişler aşamalı göçme direncini sağlayamamıştır. LSP yönteminin ekonomik olmayan sonuçlar verdiği bilinmektedir.

Modelde zemin etkisi LSP yöntemi ile analiz sonucunda m oranlarında, NDP yöntemi ile plastik dönmeler ve kesit hasar seviyelerinde değişimler meydana getirmiştir. Zemin yumuşadıkça bu değişimler daha iyi anlaşılabilir. Her durumda az ya da çok zeminin üst yapı taşıyıcı elemanlarında değişiklikler meydana getirdiği aşîkârdır. Yapı-temel-zemin etkileşimi, yapı güvenliğini hem olumlu hem de olumsuz etkileyebileceği durumlar ortaya çıkarabilmektedir.

2.4. 20 Katlı Merkezi Çaprazlı Çelik Ofis Binası

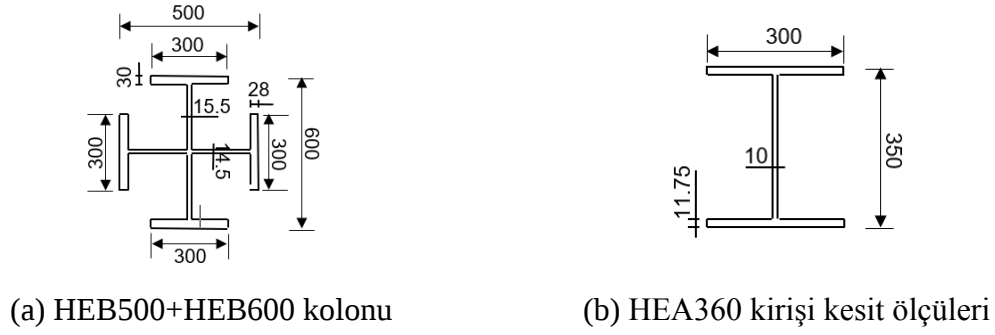
Son aşamalı göçme örneği olarak Çileli (2008)'in çalışmasından alınan ve Şekil 84'de kat planı görülen çelik yapı modeli seçilmiştir. 30 m x 19 m kat alanına sahip yapı ofis olarak kullanılmaktadır. 20 katlı olan binanın zemin kat yüksekliği 4.50 metre, diğer kat yükseklikleri ise 3.50 metredir.



Şekil 84. 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binasına ait kalıp planı

Yapı öncelikle ideCAD-Statik.v10 programı ile analiz edilerek yönetmeliklere uygunluğu kontrol edilmiştir. Yönetmelik koşullarını sağlar hale getirilen yapıya ait geometrik ve malzeme özellikleri Tablo 30 ‘da verilmektedir.

Yapıda bulunan kolonlar HEB600 ile HEB500 profillerinin birleştirilmesiyle oluşturulan + kesit şeklinde tasarlanmıştır. Ana kirişler HEA360, tali kirişler HEA160 ve merkezi çaprazlar HEA240 kesitlerinden oluşmaktadır. HEA360 ana kirişleri her iki yönde de kolonlara rijit olarak bağlanmıştır. Kullanılan kolon ve ana kiriş kesitleri Şekil 85’de verilmektedir.



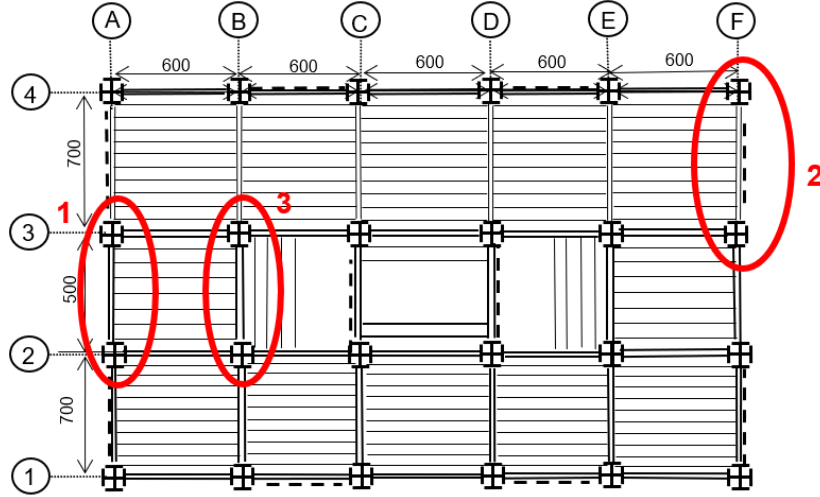
Şekil 85. Kolon ve ana kiriş kesitleri

Tablo 30. 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binasına ait geometri ve malzeme özellikleri

	Özellikler
Yapı cinsi	Ofis
Malzemesi	Çelik
Beton sınıfı	C30
Çelik sınıfı	S355
Kolon kesitleri	HEB 600 + HEB500 (Artı kesit)
Kiriş kesitleri	HEA 360
Tali kiriş kesitleri	HEA 160
Merkezi çapraz kesitleri	HEA 240
Döşeme kalınlıkları (cm)	Çatı katı 8 cm, diğer katlar 10 cm
Bağlantı tipi (Moment aktaran)	Civatalı birleşim
Bağlantı tipi (Mafsallı)	Civatalı (Kesme etkisinde)
Bulunduğu bölge	Trabzon-Yomra
Yapı süneklik düzeyi	Yüksek
Deprem yer hareketi düzeyi	DD-2
Yerel zemin sınıfı	ZD
Enlem	40.95918
Boylam	39.85195
Zemin derinliği (m)	50 m
Zemin Poisson oranı	0.30
Zemin elastisite modülü (kN/m ²)	10000 kN/m ² (gevşek kum), 50000 kN/m ² (orta kil) ve 100000 kN/m ² (yoğun kum ve çakıl)

UFC 4-023-03 tasarım mühendisine kolon kaldırma senaryolarında esneklik sağlayarak birden fazla kolonun aynı anda kaldırılmasına olanak tanımaktadır. Diğer örneklerden farklı olması adına ve bazı durumlarda sistemlerde birden fazla kolon kaybının yaşanabileceği göz önüne alınarak tek senaryoda iki kolonun kaldırılması tercih edilmiştir.

Ayrıca, tek bir kolonun kaldırılması denenmiş ve yapı sisteminin oldukça güvenli olduğu görülmüştür. Belirlenen üç farklı kolon kaldırma senaryoları Şekil 86'da verilmektedir.



Şekil 86. 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için kolon kaldırma senaryosu

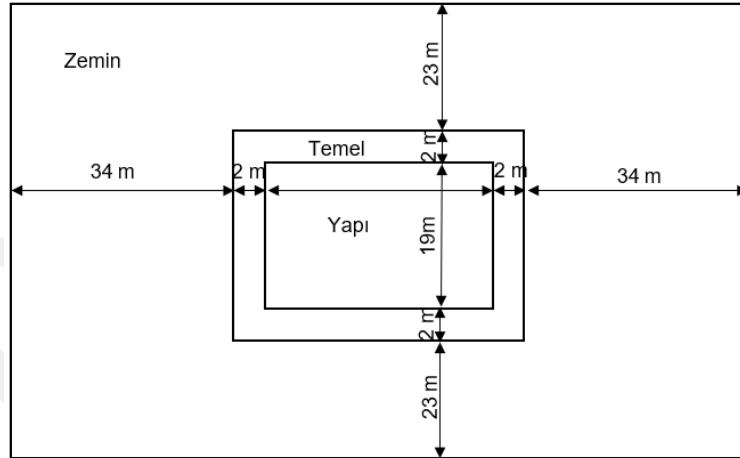
Seçilen ilk senaryoda A2 kolonu ile A3 kolonunun hasar gördüğü ve taşıma gücünü kaybettiği varsayılmıştır. İkinci senaryoda ise F3 ve F4 kolonu birlikte taşıma gücünü kaybetmektedir. Son senaryo olarak B2 ve B3 iç kolonları birlikte sistemden kaldırılmıştır.

Yapıya etkiyen döşeme yükleri döşeme öz ağırlığı ile birlikte aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

<u>Çatı katı sabit yükleri (G) kN/m²</u>	2.69 kN/m ²
Eğim Şapı (3 cm)	0.60
Yalıtım malzemesi	0.17
Döşeme betonu (8 cm)	1.92
<u>Çatı katı hareketli yükleri (Q) kN/m²</u>	1.00 kN/m ²
<u>Ara kat sabit yükleri (G) kN/m²</u>	4.15 kN/m ²
Şap (3 cm)	0.60
Bölme duvar yükü	0.50
Döşeme kaplama yükü	0.25
Asma tavan	0.15
Tesisat yükü	0.25
Döşeme betonu (10 cm)	2.40
<u>Ara kat hareketli yükleri (Q) kN/m²</u>	3.50 kN/m ²
Bütün mahaller	

Yükler, SAP2000 modelinde döşeme yükleri olmadan çizgisel yükler halinde tali kirişlere etkitilmiştir. HEA360 ve HEA160 kirişlerin öz ağırlıkları ise sırasıyla 1.120 kN/m ve 0.304 kN/m olmak üzere modelde dikkate alınmıştır.

Yapı, temel ve zemin sisteminin üstten görünüşü ve boyutları Şekil 87’de verilmektedir.



Şekil 87. 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için tanımlanan temel ve zemin boyutları

Yapının taban alanı 19×30 m şeklindedir. 23×34 m boyutlarındaki radye temelin kalınlığı 1.5’ m dir. Temel altı zemini 69×102 m boyutlarında alınmıştır.

Verilen bilgiler çerçevesinde 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası zeminli ve ankastre durumlar için doğrusal statik ve doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri ile aşamalı göçme analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler değerlendirilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur.

2.4.1. Doğrusal Statik Analiz Yöntemi ile Çözüm

10 katlı çelik konut binası örneğinde uygulanan işlem sırası ve kullanılan tablolar takip edilerek 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için *m*-faktör değerinin üst limiti 2.00, yük artırım faktörü 2.90 olarak belirlenmiştir. Bu durumda, kolon kaldırma senaryolarından sonra yapıdaki kirişler için hesaplanan *m* değerleri 2.00’den fazla olmamalıdır.

Kaldırılan kolona komşu döşemeler için (G_{LD}) ve kaldırılan kolona komşu olmayan döşemeler için (G) düşey yükleri Tablo 31’de verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 31. 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için hesaplanan G ve G_{LD} döşeme yükleri

	G (kN/m)	G_{LD} (kN/m)
Çatı katı	3.01	7.94
Ara katlar	4.65	13.48

SAP2000 programı Section Designer arayüzü kullanılarak ana kirişlerin akma momentleri 774.053 kNm ve beklenen moment dayanımları 978.90 kNm olarak belirlenmiştir. Her bir senaryo için ayrı ayrı aşamalı göçme analizi yapılarak kiriş maksimum momentleri belirlenmiş ve yukarıda verilen beklenen (ortalama) moment dayanımları kullanılarak ilgili kirişlerin m değeri hesaplanmıştır.

İlk olarak seçilen A2-A3 kolon kaldırma senaryosu için ankastre ve 3 farklı zemin tipleri için yapılan analizlerde elde edilen m değerleri üst sınır olan 2.00'dan çok düşük kalmıştır. Yapının bu senaryo özelinde aşamalı göçmeye karşı dirençli olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle A2-A3 kolon kaldırma senaryosuna ait tablo verilmemektedir.

İkinci olarak seçilen F3-F4 kolon kaldırma senaryosu için elde edilen m değerleri Tablo 32'de verilmektedir. F3-F4 kolon kaldırma senaryosu K120-K2020 kirişlerinin (x-z doğrultusu) m değerlerinde zemin etkisiyle %10'a varan artışlar gözlemlenmiştir. y-z doğrultusunda ise bu artışlar yaklaşık %13 civarına ulaşmıştır. B2-B3 kolon kaldırma senaryosunda x-z doğrultusunda %15 oranında artış meydana gelirken %10 oranında azalış olduğu görülmüştür. Ancak K506, K606 ve K706 kirişleri ankastre modele göre aşamalı göçmeye karşı dirençli iken zeminin en yumuşak halinde m değeri üst sınır olan 2.00 değerini aşarak aşamalı göçmeye karşı dirençsiz hale gelmiştir. Bu durumun aksine K326, K426, K526 ve K626 kirişleri ankastre modelde üst sınır olan 2.00 değerinde fazla iken en yumuşak zeminde bu değer altında kalmıştır. Bu kirişlerin zeminden olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Bu durumda zemin etkisinin üst yapıdaki taşıyıcı elemanlarda aşamalı göçme riskini azaltıyor ya da arttırıyor şeklinde bir yorum yapmayı zorlaştırmaktadır. Çünkü zemin ile birlikte değişen şartlar yapı elemanlarında yeniden dağılımdan dolayı kesit etkilerinde değişime neden olmaktadır.

Tablo 32. F3-F4 ve B2-B3 kolonları kaldırma senaryoları m oranlarının zemin cinsi ile değişimi

F3-F4 kolon kaldırma senaryosu					B2-B3 kolon kaldırma senaryosu				
Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)				Kirişler	Zemin elastisite modülü (kN/m ²)			
	Ankastre	100000	50000	10000		Ankastre	100000	50000	10000
K120	1.42	1.45	1.46	1.47	K106	2.23	2.25	2.30	2.41
K220	1.45	1.49	1.50	1.52	K206	2.13	2.19	2.25	2.36
K320	1.38	1.42	1.42	1.43	K306	2.08	2.12	2.17	2.28
K420	1.27	1.35	1.36	1.36	K406	2.02	2.05	2.11	2.21
K520	1.27	1.30	1.30	1.29	K506	1.95	1.99	2.05	2.15
K620	1.22	1.25	1.25	1.24	K606	1.90	1.94	1.99	2.10
K720	1.18	1.20	1.20	1.19	K706	1.85	1.89	1.94	2.05
K820	1.14	1.16	1.16	1.14	K806	1.80	1.84	1.90	2.00
K920	1.11	1.13	1.12	1.10	K906	1.76	1.80	1.85	1.96
K1020	1.06	1.09	1.09	1.06	K1006	1.72	1.76	1.81	1.92
K1120	0.96	1.06	1.05	1.03	K1106	1.69	1.73	1.78	1.88
K1220	0.95	1.04	1.03	1.00	K1206	1.60	1.70	1.75	1.85
K1320	0.95	1.01	1.00	0.98	K1306	1.59	1.67	1.72	1.82
K1420	0.94	0.99	0.98	0.95	K1406	1.58	1.64	1.67	1.79
K1520	0.94	0.97	0.96	0.93	K1506	1.57	1.62	1.65	1.77
K1620	0.93	0.95	0.94	0.91	K1606	1.56	1.60	1.64	1.75
K1720	0.93	0.94	0.93	0.90	K1706	1.55	1.59	1.63	1.74
K1820	0.92	0.93	0.91	0.89	K1806	1.54	1.58	1.62	1.72
K1920	0.92	0.92	0.91	0.88	K1906	1.53	1.57	1.61	1.71
K2020	0.80	0.80	0.79	0.77	K2006	1.42	1.44	1.48	1.55
K137	1.90	1.91	1.93	2.00	K126	2.17	2.10	2.09	2.06
K237	1.84	1.86	1.89	1.96	K226	2.16	2.07	2.06	2.03
K337	1.73	1.76	1.79	1.85	K326	2.10	2.02	2.00	1.97
K437	1.64	1.67	1.70	1.75	K426	2.05	1.97	1.95	1.92
K537	1.55	1.59	1.61	1.67	K526	2.00	1.92	1.90	1.87
K637	1.48	1.51	1.54	1.59	K626	2.00	1.84	1.90	1.86
K737	1.41	1.44	1.47	1.51	K726	1.92	1.80	1.82	1.79
K837	1.34	1.38	1.40	1.45	K826	1.89	1.77	1.79	1.75
K937	1.28	1.32	1.34	1.39	K926	1.85	1.74	1.75	1.72
K1037	1.23	1.27	1.29	1.33	K1026	1.83	1.72	1.73	1.69
K1137	1.18	1.22	1.24	1.28	K1126	1.80	1.69	1.70	1.67
K1237	1.14	1.18	1.20	1.24	K1226	1.78	1.67	1.68	1.64
K1337	1.10	1.14	1.16	1.19	K1326	1.75	1.66	1.66	1.62
K1437	1.07	1.10	1.12	1.16	K1426	1.74	1.64	1.64	1.61
K1537	1.03	1.07	1.09	1.12	K1526	1.72	1.63	1.63	1.59
K1637	1.01	1.04	1.06	1.09	K1626	1.70	1.62	1.61	1.58
K1737	0.97	1.02	1.04	1.07	K1726	1.68	1.62	1.60	1.57
K1837	0.93	1.00	1.02	1.05	K1826	1.66	1.61	1.60	1.57
K1937	0.90	0.97	0.99	1.01	K1926	1.64	1.60	1.59	1.56
K2037	0.81	0.84	0.86	0.89	K2026	1.29	1.22	1.21	1.18

F3-F4 kolon kaldırma senaryosu için F4 kolonunun kaldırıldığı düğüm noktasında ve B2-B3 kolon kaldırma senaryosu için B3 kolonunun kaldırıldığı düğüm noktasında elde edilen düşey yer değiştirme değerleri farklı zemin türleri için Tablo 33’de verilmektedir.

Tablo 33. 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binasında kaldırılan kolonların düğüm noktalarında LSP yöntemi ile hesaplanan düşey yer değiştirme değerleri (cm)

	F3-F4 kolonu	B2-B3 kolonu
Ankastre	13.12	20.81
$E_s = 100000 \text{ kN/m}^2$	20.34	25.20
$E_s = 50000 \text{ kN/m}^2$	24.48	29.62
$E_s = 10000 \text{ kN/m}^2$	52.16	61.62

Tablodaki sonuçlardan zeminin etkisi açıkça görülebilmektedir. Zemin yumuşadıkça her iki kaldırma senaryolarında da düşey yer değiştirmelerin arttığı görülmektedir. Bu değerler fikir vermesi açısından paylaşılmalı birlikte, F3-F4 kolonu kaldırma senaryosunda $E_s = 10000 \text{ kN/m}^2$ için ve B2-B3 kolonu kaldırma senaryosunda tüm çözümler için yapının taşıma gücünü kaybettiği unutulmamalıdır.

2.4.2. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi ile Çözüm

10 katlı çelik konut binası örneğinde uygulanan işlem sırası ve kullanılan tablolar takip edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Ana kirişlere tali kirişler oturması sebebiyle plastikleşmenin kiriş açıklıklarında da oluşabileceği öngörüsü ile tüm kirişlerin orta noktalarına da plastik mafsallar atanmıştır. Atanan plastik mafsal özellikleri Şekil 88 ve Şekil 89'da verilmektedir.

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-0.2	-6
D	-0.2	-4
C	-1.1	-4
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.1	4
D	0.2	4
E	0.2	6

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero
☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

☐ Use Yield Moment Moment SF: 774.053 Positive: Negative:

☒ Use Yield Rotation Rotation SF: Positive: Negative: (Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

☒ Immediate Occupancy Positive: 0.25 Negative:

☐ Life Safety Positive: 3 Negative:

☐ Collapse Prevention Positive: 4 Negative:

☒ Show Acceptance Criteria on Plot

Type

☒ Moment - Rotation
☐ Moment - Curvature
Hinge Length: Relative Length:

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Isotropic
No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

OK Cancel

Şekil 88. Kirişlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması

Şekil 89. Ankastre birleşimlerde moment-dönme ilişkisinin tanımlanması

Daha önce belirtildiği gibi rehber göre GÖ performans noktası sınır değer olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki tabloya bakarsak GÖ ile C noktası plastik dönmeleri aynıdır. Dolayısı ile çözümler neticesinde hasar seviyesinin göçme bölgesine (yeşil ya da sarı mafsalları oluşumu) ulaştığı durumda elemanın aşamalı göçme direncini kaybettiği kabul edilecektir.

Yapının radye temel sistemine sahip olduğu kabul edilerek zemin ortamı Geliştirilmiş Vlasov yöntemi ile modellenmiştir. Zeminli ve ankastre çözümlerden elde edilen periyotlar Tablo 34’de verilmektedir. Beklenildiği gibi ankastre modellerde doğal titreşim periyodu zeminli modellere göre daha düşük elde edilmiştir. Diğer bir değişle, zemin yumuşadıkça periyot değerlerinde artış görülmüştür.

Tablo 34. 20 katlı merkezi çaprazlı çelik ofis binası için elde edilen doğal titreşim periyotları

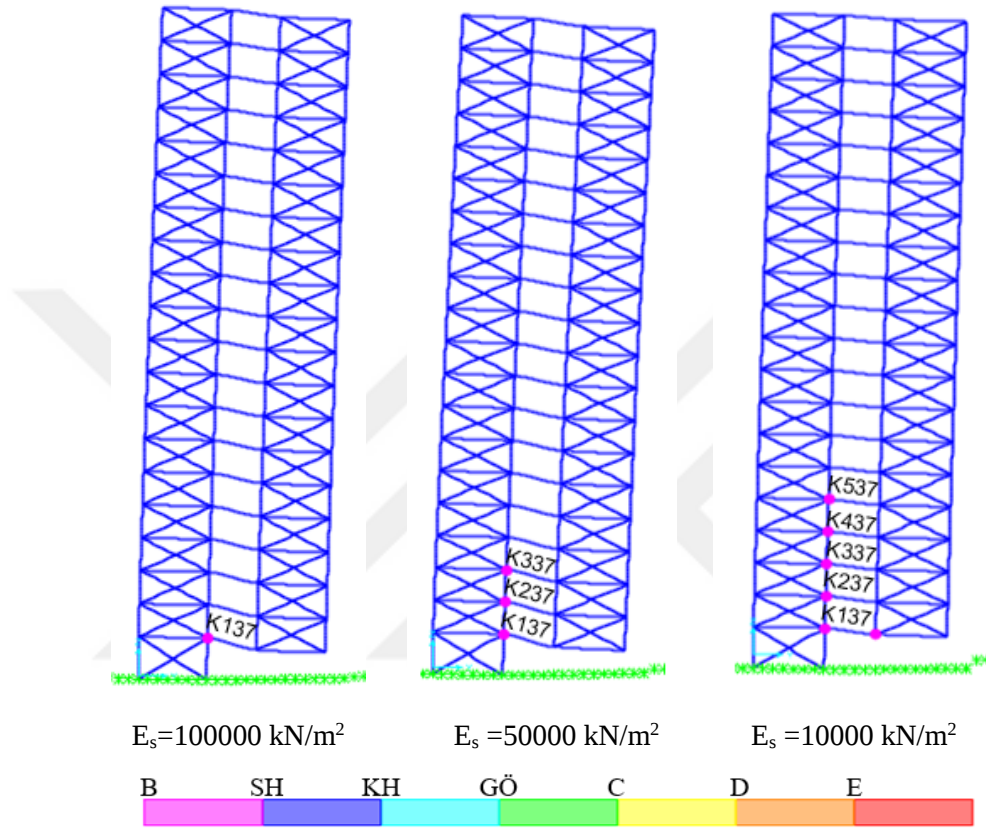
	$T_{1x}(sn)$	$T_{1y}(sn)$	$T_{2x}(sn)$	$T_{2y}(sn)$
Ankastre	1.92935	1.78530	0.69001	0.59254
$E_s = 100000 \text{ kN/m}^2$	2.28259	2.19433	0.75045	0.71582
$E_s = 50000 \text{ kN/m}^2$	2.40233	2.37409	0.75058	0.71854
$E_s = 10000 \text{ kN/m}^2$	3.14131	3.44155	0.75076	0.72499

Farklı zemin tipleri dikkate alınarak yukarıda seçilen kolon kaldırma senaryoları için yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

A2-A3 kolon kaldırma senaryosunda kirişlerde plastik kesitler oluşmamıştır. Doğrusal olmayan statik analiz yöntemi ile analizlerde de benzer sonuçlar elde edilmiş, küçük m

oranları hesaplandığından sonuçlar sunulmamıştır. Bu analiz yönteminde de kesitlerde mafsall oluşmadığından çerçeve görünüşleri sunulmamıştır.

F3-F4 kolon kaldırma senaryosu için y-z düzleminde oluşan plastik mafsall görünüşü Şekil 90'da verilmektedir. x-z düzlemindeki çerçevede mafsall oluşmamıştır.



Şekil 90. F3-F4 kolon kaldırma senaryosu y-z düzleminde plastik mafsall oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Tabanda ankaste kabulü ile yapılan analizlerde kirişlerde plastik deformasyonlar oluşmamıştır. $E_s = 100000 \text{ kN/m}^2$ zemini dikkate alınan analizlerde sadece K137 kirişinde, $E_s = 50000 \text{ kN/m}^2$ zeminli modelde K137, K237 ve K337 kirişlerinde plastik mafsall meydana gelmektedir. Elastisite modülü en düşük olan modelde ise 5.kata kadar olan kirişlerde plastik mafsallar görülmektedir. Zemin elastisite modülü azaldıkça mafsallaşan kiriş sayıları kat yüksekliği boyunca artmaktadır. Ancak kirişlerde plastik mafsallar oluşmuşsa da oluşan plastik dönmeler sınır değerleri aşmamıştır. Dolayısıyla yapının F3-F4 kolon kaldırma senaryosuna göre yapının yeniden tasarımına ya da güçlendirilmesine ihtiyaç yoktur.

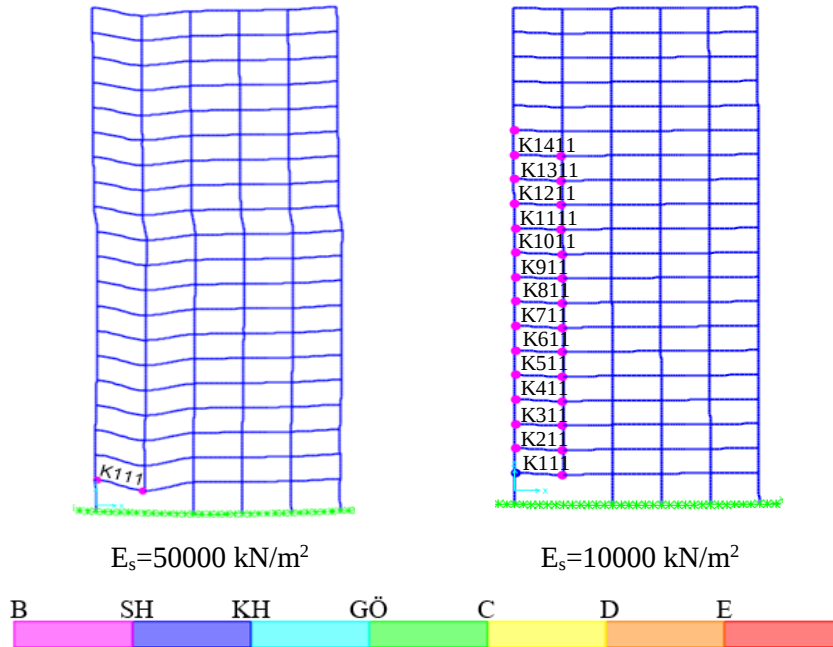
Doğrusal olmayan dinamik analize göre farklı zemin tipleri için K120 ve K137 kirişlerine ait mafsal kesitlerinde elde edilen eğilme momenti değerleri Tablo 35’de verilmektedir.

Tablo 35. F3-F4 kolon kaldırma senaryosu için mafsal kesitlerinde hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi

$M_y=774 \text{ kNm}$	Zemin elastisite modülü (kN/m^2)			
	Ankastre	100000	50000	10000
K120	423.67	435.69	439.95	455.94
K137	688.99	774.47	780.17	791.08

K120 kirişinde moment değerleri akma momentini aşmamıştır. K137 kirişinde ise sadece zeminli analizler için akma momenti aşılmış ve mafsallaşma oluşmuştur. Her iki kirişte de zemin yumuşadıkça mafsal kesitlerinde oluşan momentlerin arttığı görülmektedir.

B2-B3 kolon kaldırma senaryosu için tabanda ankastre kabulü ve zemin elastisite modülünün 100000 kN/m^2 olması durumunda yapılan doğrusal olmayan dinamik analizlerde plastik mafsal oluşmamıştır. Diğer zemin türlerinde ise x-z düzleminde yer alan çerçevede oluşan mafsalların düzeyleri ve konumları Şekil 91’de görülmektedir.



Şekil 91. B2-B3 kolon kaldırma senaryosu x-z düzleminde plastik mafsal oluşumlarının zemin cinsi ile değişimi

Tüm plastik dönmelerin yönetmelik sınırlarını aşmadığı ve tüm elemanların aşamalı göçmeye karşı güvenli olduğu görülmektedir. Ancak zemin elastisite modülü azaldıkça plastikleşen kiriş kesiti sayısında artış olduğu görülmektedir. Bu durumda B2 ve B3 kolonunun kaldırılmasıyla doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemine göre yapının yeniden tasarımına ya da güçlendirilmesine gerek yoktur.

Doğrusal olmayan dinamik analize göre farklı zemin tipleri için elde edilen K111 ve K126 kirişlerine ait mafsal kesitinde oluşan eğilme momenti değerleri Tablo 36'de verilmektedir.

Tablo 367. B2-B3 kolon kaldırma senaryosu için mafsal kesitlerinde hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi

$M_y=774 \text{ kNm}$	Zemin elastisite modülü (kN/m^2)			
	Ankastre	100000	50000	10000
K111	433.29	745.65	774.29	803.34
K126	649.53	679.09	681.49	709.71

Tablodan görüldüğü üzere K111 kirişinde zemin yumuşadıkça mafsal kesitlerinde oluşan eğilme momentleri akma momenti değerini aşmaktadır. K126 kirişinde ise hem ankastre hem de zeminli modellerde mafsal momentleri akma momenti değerine ulaşamamıştır. LSP ve NDP karşılaştırılması Tablo 37'de bir arada özetlenmektedir.

Tablo 37. B2-B3 kolon kaldırma senaryosu için mafsal kesitlerinde hesaplanan momentlerinin zemin cinsi ile değişimi

Analiz Türü	Mesnet Koşulu	Senaryo	Aşamalı Göçme Güvenliği
LSP	Ankastre	A2-A3 senaryosu	Güvenlidir
		F3-F4 senaryosu	Güvenlidir
		B2-B3 senaryosu	10 kirişte güvenlik sağlanamamıştır
	Zeminli	F3-F4 senaryosu	$E_s=10000 \text{ kN/m}^2$ için 1 kirişte güvenlik sağlanamamıştır
		B2-B3 senaryosu	$E_s=100000 \text{ kN/m}^2$ için 7 kirişte, $E_s=50000 \text{ kN/m}^2$ için 8 kirişte ve $E_s=10000 \text{ kN/m}^2$ için 10 kirişte güvenlik sağlanamamıştır
NDP	Ankastre	A2-A3 senaryosu	Güvenlidir
		F3-F4 senaryosu	Güvenlidir
		B2-B3 senaryosu	Güvenlidir
	Zeminli	F3-F4 senaryosu	Güvenlidir
		B2-B3 senaryosu	Güvenlidir

Doğrusal olmayan statik analiz yöntemi ile aşamalı göçme analizine göre yapının tüm senaryolar için güvenli olduğu görülmektedir. Doğrusal statik analiz yönteminde yetersiz olan yapının, doğrusal olmayan dinamik yönteminde eleman ve kesit bazında uyumun dikkate alınması, lineer ötesi kapasitenin hesaplara yansması ve şekil değiştirmelere dayalı kabul kriterlerinin söz konusu olması nedeni ile aşamalı göçme güvenliğinin sağlandığı düşünülmektedir. Aşamalı göçme analizlerinin doğrusal statik analiz yöntemi ile yapılmasının risk açısından güvenli tarafta kalmakla birlikte ekonomik olmayan çözümlere neden olacağı anlaşılmaktadır.

Gerek doğrusal statik analiz gerekse doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemlerinde zeminin aşamalı göçme sonuçları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Zemin etkisiyle iç kuvvetlerde oluşan değişim doğrusal statik analizlerde bazı m oranlarına yansımıştır. Dinamik analizlerde ise zemin-yapı etkileşimi hesaba katıldığında eğilme momentindeki artışa bağlı olarak mafsallaşan kesit sayılarının arttığı görülmüştür. Bu durum zemin etkilerinin aşamalı göçme analizlerindeki önemini göstermektedir. Zemin şartları hesaba katılarak yapılan analiz süreci daha zaman alıcı ve zahmetli olmasına rağmen yapının davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olması nedeniyle aşamalı göçme hesaplarında zemin-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının gerekli olduğu değerlendirilmektedir.

3. SONUÇLAR

Proje aşamasında dikkate alınmayan yük etkilerine neden olan her türlü patlamalar ya da bombalı terör saldırıları sebebiyle yapılarda bölgesel ya da tümünden göçmelerin meydana geldiği bilinmektedir. İlk olarak 1968 yılında Ronan Point apartmanında meydana gelen doğalgaz patlaması ile yaşanan kısmi göçme olayı nedeniyle literatüre giren aşamalı göçme kavramı, daha sonra 11 Eylül 2001 tarihinde Dünya Ticaret Merkezine yapılan saldırılar ile artan bir ilgiye sahip olmuştur. Bazı gelişmiş ülkeler bu tür olağan dışı yükleri proje aşamasında hesaba katacak yönetmelikler ve rehberler yayımlayarak stratejik önemi fazla olan yapılar için aşamalı göçme risk analizleri yapmaktadırlar. Ülkemizde de son yıllarda araştırmacılar arasında çalışmalar artmasına rağmen tasarımcılar halen analizlerinde aşamalı göçmeyi dikkate almamaktadırlar. Zira ülkemizde aşamalı göçme analizi içeren herhangi bir yönetmelik ya da rehber bulunmamakla birlikte konu ile ilgili Türkçe kaynaklarda yok denecek kadar azdır. Yapılan bu tez çalışması ile aşamalı göçmeye karşı farkındalığı artırmak ve aynı zamanda temel zemininin aşamalı göçme analizleri üzerindeki etkisi araştırılması amaçlanmıştır.

Yapılan analizlerde ve literatürde yayımlanmış çalışmalarda yaygın olarak kullanılan Amerikan Savunma Bakanlığı'nın yayımlamış olduğu UFC 4-023-03 'Design of Buildings to Resist Progressive Collapse' rehberi dikkate alınmıştır. Ayrıca FEMA 356 'Pre-standard And Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings' ve ASCE/SEI 41-13 'Seismic Evaluation and Rehabilitation of Existing Buildings' yönetmeliklerinden de analizlerin çeşitli adımlarında yararlanılmıştır. Sayısal çözümler UFC 4-023-03'de yer alan Alternatif Yol metodu kullanılarak ve doğrusal statik analiz ile doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri uygulanarak yapılmıştır. Sayısal model olarak iki adet çelik ve iki adet betonarme yapı örnekleri seçilmiş ve yapının tabanda ankastre bağlı olduğu varsayımı ve elastik zemine oturduğu kabulü ile ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizlerde elastik zemin etkisi Geliştirilmiş Vlasov Modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Sayısal örnekler ile desteklenerek hazırlanan ve aşamalı göçme analizi konusuyla ilgilenen ve/veya ilgilenecek olan araştırmacılar ve tasarımcı mühendisler için farkındalık oluşturması amaçlanan çalışmanın sonunda ulaşılan çıktılar ve yapılan tüm değerlendirmeler aşağıda verilmektedir.

SAP2000 programında incelenen dört farklı sayısal modelde de, kirişlere etkiyen yük miktarı ve kiriş açıklıklarının yapıların aşamalı göçme direnci üzerindeki etkisinin kat sayısı

(bina yüksekliği) ya da yapı toplam genişliği gibi parametrelere göre daha belirleyici olduğu görülmüştür.

Çelik yapılarda diyagonal elemanların betonarme yapılardaki perdelere benzer görevler üstlendiği ve yapıyı rijitleştirerek periyot, yer değiştirme ve iç kuvvetlerde önemli azalmalar sağladığı zaten bilinmektedir. Benzer durum aşamalı göçme analizlerinde de görülmüş ve diyagonalsız çerçevelerden oluşan 10 katlı çelik yapı modelinin aşamalı göçme performansı merkezi çaprazlara sahip 20 katlı çelik yapı modelinden daha zayıf olarak elde edilmiştir.

Döşemelerin yük aktarımının da aşamalı göçme direncini birincil derecede etkileyen önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Analizleri yapılan 2 adet betonarme örneğinde iki doğrultuda çalışan döşemeler bulunduğundan bu etki net olarak görülememiştir. Çelik yapı örneklerinde kullanılan tali kirişler döşeme yüklerinin sadece tek doğrultuda aktarılmasına neden olmaktadır. Bu durumda döşeme yükü alan kirişler diğer kirişlere göre daha fazla aşamalı göçme riski taşımaktadır.

Çelik yapıların kolon-kiriş birleşim tipleri aşamalı göçme dirençlerini etkilemektedir. Çelik yapılarda moment aktaran birleşimlerin kullanıldığı kirişlerde mesnet momentlerinin büyümesi nedeni ile riskin arttığı, mafsallı birleşimlerin kullanıldığı kirişlerde uç momentleri oluşmadığından bu riskin oldukça azaldığı görülmüştür.

Statik ve dinamik analiz yöntemlerinin birbirinden farklı sonuçlar verebileceği görülmüştür. Yapılan sayısal örneklerde, doğrusal statik analiz yöntemi ile aşamalı göçmeye dirençsiz olan bazı elemanların, doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi kullanıldığında dirençli hale geldiği durumlar (ya da tam tersi durumlar) ile karşılaşılmıştır. İç kuvvetlerin yeniden dağılımını ve ikinci mertebe etkilerini daha doğru bir şekilde hesaba katan doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi, doğrusal statik analiz yöntemine göre daha doğru ve daha ekonomik sonuçlar vermektedir. Doğrusal statik analiz yöntemi uygulama kolaylığına rağmen ekonomik açıdan maliyet kayıplarına yol açabileceği değerlendirilmiştir.

Zemin yumuşadıkça zemin koşullarının üst yapının davranışına etkisi de artmaktadır. Doğrusal statik analiz yöntemi kullanıldığında zemin etkisinin yapı elemanlarının aşamalı göçme riskini önemli oranda değiştirdiği görülmüştür. Ancak bu değişim ilgili elemanda bazen riski arttırırken bazen azaltmıştır. Dolayısıyla hesaplarda doğrusal olmayan statik analiz yöntemi kullanıldığında, zemin-yapı etkileşiminin aşamalı göçme riskini arttıracak veya azaltacağı konusunda kesin bir fikir yürütmek ya da genelleme yapmak zordur.

Doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi kullanıldığında ise zemin etkisi çoğunlukla aşamalı göçme riskini arttırmıştır. Zeminin etkisiyle yapıların periyodu, yer değiştirmeleri, iç kuvvetleri ve hasar seviyelerinin artma eğiliminde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu etkiler sert zeminden ziyade yumuşak zeminlerde daha ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Ancak tez kapsamında dikkate alınan yumuşak zeminde bazı örneklerde yapı elemanları arasında oluşan yeniden yük dağılımı neticesinde mafsallaşan kiriş sayısının artarak kiriş kesitlerindeki zorlanmaların azalabildiği de görülmüştür. Dolayısıyla yapı-zemin etkileşiminin hasar seviyeleri üzerinde daima arttırıcı bir etkisinin olduğu söylenemez. Ancak hasar seviyelerinde bazı azalmalar olsa bile mafsallaşan kesit sayısı da zaman zaman artmaktadır. Bu nedenle bu tür analizlerde zemin-yapı arasındaki etkileşimin ve zeminin üst yapıda meydana getireceği etkinin dikkate alınmasının önemli olduğu değerlendirilmiştir.

4. ÖNERİLER

Akademik çalışmalar ve bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, gelecek çalışmalar için yapılabilecek öneriler aşağıda verilmektedir.

UFC rehberi her ne kadar tasarım mühendislerine bazı kolon kaldırma senaryoları önermişse de son kararı kullanıcılara bırakmıştır. Bu tezde her model için kendine özgü kolon kaldırma senaryosu tercih edilmiş ve senaryolara bağlı olarak sonuçların değişebildiği görülmüştür. Her bir binanın kendine özgü kullanım amacı ve çevre koşulları dikkate alınarak kolon kaldırma senaryolarının çeşitlendirilmesi önerilmektedir.

Bilindiği gibi zemin heterojen ve karmaşık yapıdadır. Zemin davranışının oldukça fazla parametreye bağlı olarak değişmesinden dolayı zeminin yapı üzerindeki etkisi tam olarak ortaya konulamamaktadır. Zeminin doğrusal elastik olmayan davranışı dikkate alınmaya çalışıldığında bu karmaşıklık daha da artmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada kısmen uygulaması daha kolay olan elastik zemin modeli, Geliştirilmiş Vlasov Modeli, kullanılmıştır. Zemin ortamındaki doğrusal ve elastik olmayan davranışı dikkate alan zemin modelleri ile benzer bir çalışmanın yapılması faydalı olacaktır.

Yapılan tüm analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde zemin-yapı etkileşiminin yapıların aşamalı göçme direncine bir etkisi olduğu görülmektedir. Ancak bu etkinin pozitif ya da negatif yönde olduğu ile ilgili genelleme yapılamayacak şekilde fazla parametre söz konusudur. Dolayısıyla aşamalı göçme güvenliği açısından zemin etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için çok daha farklı bina modellerinin kullanıldığı bir parametrik çalışmaya ihtiyaç vardır.

5. KAYNAKLAR

- Abedi, K., & Parke, G. A. R. (1996). Progressive Collapse of Single-Layer Braced Domes. *International Journal of Space Structures*, 11(3), 291-306.
- Adam, M. J., Parisi, F., Sagaseta, J., & Lu, X. (2018). Research and Practice on Progressive Collapse and Robutness of Building Structures in the 21st Century. *Engineering Structures*, 173, 122-149.
- Alogla, K., Weekes, L., & Nelson, L. A. (2016). A New Mitigation Scheme to Resist Progressive Collapse of RC Structures. *Construction and Building Materials*, 125, 533–545.
- Alshaikh, I., Bakar, B. H., Alwesabi, E., & Akil, H. (2019). Progressive collapse of reinforced rubberised concrete: Experimental study. *Construction and Building Materials*, 226, 307-316.
- ANSI-72. (1972). Safety Code for the Use, Care and Protection of abrasive Wheels. ANSI-72. New York: American National Standarts Institute.
- ANSI-72. (1972). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ANSI-72. New York: American Society of Civil Engineers.
- ANSI-82. (1982). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ANSI-82. New York: American Society of Civil Engineers.
- Arora, J. S., Haskell, D. F., & Govil, A. K. (1980). Optimal Design of Large Structures for Damage Tolerance. *Journal of AIAA*, 18(5), 563-570.
- ASCE 7-05. (2006). Minimum Design Loads for Buildings and other Structures. ASCE 7-05. Reston (VA): American Society of Civil Engineers.
- ASCE 7-16. (2016). Minimum Design Loads for Buildings and other Structures. ASCE 7-16. Reston (VA): American Society of Civil Engineers.
- ASCE 41. (2016). Seismic Evaluation And Retrofit of Existing Buildings. *American Society of Civil Engineers*. Reston (VA), USA.
- Astaneh-Asl, A., Jones, B., Zhao, Y., & Hwa, R. (2002). *Progressive Collapse Resistance of Steel Building Floors*. Report Number: UCB/CEE-STEEL, University of California at Berkeley.
- Astaneh-Asl, A. (2003). Progressive Collapse Prevention in New and Existing Buildings Proceedings. *9th Arab Structural Engineering Conference*, s. 1-10. Abu Dhabi, United Arab Emirates (UAE).
- Aydemir, M. E. (2011). *Zemin Yapı Etkileşiminin Yapısal Davranış Parametreleri Üzerine Etkisi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

- BOCA. (1972). The BOCA Basic Building Code Accumulative Supplement 1972: Containing Approved Changes for the Basic Building Code. *Building Officials & Code Administrators International*, Englewood, USA.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Companies, New York, USA.
- Breen, J. E. (1975). *Progressive Collapse of Building Structures*. Proceedings of a Research Workshop held at the University of Texas at Austin, s. 18-20, Austin.
- Casciati, F., & Faravelli, L. (1984). Progressive Failure for Seismic Reliability Analysis. *Journal of Engineering Structures*, 6(2), 97-103.
- Chen, J., Huang, X., Ma, R., & He, M. (2012). Experimental Study on the Progressive Collapse Resistance of a Two-Story Steel Moment Frame. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(5), 567–642.
- Choi, H., & Kim, J. (2011). Progressive Collapse-Resisting Capacity of RC Beam-Column Subassemblage. *Magazine of Concrete Research*, 63(4), 297–310.
- Computers and Structures Inc. (2020). SAP2000 Structural Analysis Package Program. Academic Version 20.02, Berkeley.
- Confidential Reporting on Structural Safety. (2010). Collapse of Large Panel Structure Buildings during Demolition. *Cross Report*, 186(18), London.
- Corley, W. G., Mlakar, P. F., Sozen, M. A., & Thornton, C. H. (1998). The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 12(3), 100-112.
- Daneshvar, H., & Driver, R. (2017). Behaviour of Shear Tab Connections in Column Removal Scenario. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 580–593.
- Dat, P. X., & Tan, K. H. (2014). Experimental Response of Beam-Slab Substructures Subject to Penultimate-External Column Removal. *Journal of Structural Engineering*, 141(7), 401-417.
- Ding, Y., Song, X., & Zhu, H. T. (2017). Probabilistic Progressive Collapse Analysis of Steel Frame Structures against Blast Loads. *Journal of Structural Engineering*, 147, 679–691.
- DTLR. (1999). Guidance on Robustness and Provision Against Accidental Actions: The Current Application of Requirements A3 of The Building Regulations 1991. *Department for Transport Local Government and the Regions*, London.
- Dusenberry, D. O., & Juneja, G. (2002). Review of Existing Guidelines and Provisions Related to Progressive Collapse. *National Workshop on Prevention of Progressive Collapse*, Arlington, Massachusetts.

- Dusenberry, D., Cagley, J., & Aquino, W. (2004). Multihazard Mitigation Council National Workshop on Best Practices Guidelines for the Mitigation of Progressive Collapse of Buildings. *National Institute of Building Sciences (NIBS)*, Washington D.C.
- Elsayed, W. M., Moaty, M. A. N. A., & Issa, M. E. (2016). Effect of Reinforcing Steel Debonding on RC Frame Performance in Resisting Progressive Collapse. *HBRC Journal*, 12, 242-254.
- Eurocode 1 (2006). Actions on structures, Part 1-7 General Actions Accidental actions. EN 1991-1-7. European Standard Norme Européenne Europäische Norm.
- Ellingwood, B., & Leyendecker, E. V. (1978). Approaches for Design Against Progressive Collapse. *Journal of the Structural Division ASCE*, 104(3), 413-423.
- Ellingwood, B. R. (2006). Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities ASCE*, 20(4), 315-323.
- Ergüçlü, E. (2013). *A Recent Challenge in Structural Steel Design: Progressive Collapse*. Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- FEMA-Federal Emergency Management Agency. (2002). World Trade Center Building Performance Study: Data Collection. Preliminary Observations, and Recommendations. Therese McAllister, Second Printing, Federal Insurance and Mitigation Administration, Washington, D.C.
- Feng, D., Zhang, M., Brunesi, E., Parisi, F., Yu, J., & Zhou, Z. (2022). Investigation of 3D effects on dynamic progressive collapse resistance of RC structures considering slabs and infill walls. *Journal of Building Engineering*, 54, 104421.
- Feng, F., Hwang, H., & Yi, W. (2020). Static and dynamic loading tests for precast concrete moment frames under progressive collapse. *Engineering Structures*, 213, 110612.
- Ferahian, R. H. (1972). Buildings Design for Prevention of Progressive Collapse. *Civil Engineering-ASCE*, 1, 66-69.
- Filonenko-Borodich, M. M. (1940). Some Approximate Theories of Elastic Foundation. *Uchenyie Zapiski Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Mekhanika*, 46(3), 18.
- Forni, D., Chiaia, B., & Cadoni, E. (2017). Blast Effects on Steel Columns under Fire Conditions. *Journal of Constructional Steel Research*, 136, 1–10.
- Forquin, P., & Chen, W. (2017). An Experimental Investigation of the Progressive Collapse Resistance of Beam-Column RC Sub-Assemblages. *Construction and Building Materials*, 152, 1068–1084.
- Fu, F. (2009). Progressive Collapse Analysis of High-Rise Building with 3-D Finite Element Modeling Method. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(6), 1269–1347.
- Fu, F. (2013). Dynamic Response and Robustness of Tall Buildings under Blast Loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 299–307.

- General Service Administration (GSA). (2003). Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. *U.S. General Service Administration*, Washington (DC), USA.
- Gilmour, J. R., & Viridi, K. S. (1998). Numerical Modelling of the Progressive Collapse of Framed Structures as a Result of Impact or Explosion. *2nd International PhD Symposium in Civil Engineering*, Budapest.
- Girgin, S. C., Mısır, S., Özden, G., & Kahraman, S. (2008). Yapı- Zemin Etkileşiminin Yapısal Tasarımdaki Rolü. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10, 27-37.
- Griffiths, H., Pugsley, A., & Saunders, O. (1968). Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point. *Her Majesty's Stationary Office*, London, U.K.
- Gross, J. L., & McGuire, W. (1983). Progressive Collapse Resistant Design. *Journal of Structural Engineering*, 109(1), 1-12.
- Hamarat, M. A. (2012). *İki Parametrelili Zeminler Üzerine Oturan Yapı Sistemlerinin Dinamik Analizi*. İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Hetenyi, M. (1946). Beams on Elastic Foundations. *The University of Michigan Press*, Ann Arbor, Michigan.
- Hinman, Eve. (1998). Approach for Designing Civilian Structures Against Terrorist Attack. *American Concrete Institute Farmington Hills*, 1-17, U.S.
- IBC. (2009). International Building Code. IBC-2009. Illinois: International Code Council, Country Club Hills.
- ICBO. (1997). International Conference of Building Officials. California, USA, 1997.
- Izzuddin, B. A., Vlassis, A. G., Elghazouli, A.Y., & Nethercot, D. A. (2008). Progressive Collapse of Multi-Storey Buildings due to Sudden Column Loss-part I: Simplified Assessment Framework. *Journal of Structural Engineering*, 30(5), 1308–1326.
- Janssens, V. M. (2012). *Modelling Progressive Collapse in Steel Structures*. Trinity College Dublin, The Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Doctor of Philosophy, Ireland.
- Jiang, J., & Li, G. (2017). Progressive Collapse Analysis of 3D Steel Frames with Concrete Slabs Exposed to Localized Fire. *Journal of Structural Engineering*, 149, 21–34.
- Jones, R., & Xenophontos, J. (1977). The Vlasov Foundation Model. *Internat. J. of Mech. Science*, 19(6), 317–323.
- Kaewkulchai, G., & Williamson, E. B. (2004). Beam Element Formulation and Solution Procedure for Dynamic Progressive Collapse Analysis. *Computer & Structure - Journal*, 82(7–8), 639–651.

- Khandelwal, K., El-Tawil, S., & Sadek, F. (2009). Progressive Collapse Analysis of Seismically Designed Steel Braced Frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 699–708.
- Kılıçer, S. (2016). *Yapı Zemin Etkileşiminin Betonarme Yapıların Tasarımına Etkisi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- King, S., & Delatte, N. (2004). Collapse of 2000 Commonwealth Avenue: Punching Shear Case Study. *Journal Performance of Constructed Facilities*, 18(1), 54–61.
- Lewicki, B., & Olesen, S. O. (1974). Limiting the Possibility of Progressive Collapse. *Building Research & Practice*, 2(1), 10–13.
- Leyendecker, E. V., & Ellingwood, B. R. (1977). Design to Reduce the Risk of Progressive Collapse. *Building Science Series National Bureau of Standards*, Washington, D.C.
- Li, H., Cai, X., Zhang, L., Zhang, B., & Wang, W. (2017). Progressive Collapse of Steel Moment-Resisting Frame Subjected to Loss of Interior Column: Experimental Tests. *Journal of Structural Engineering*, 150, 203–220.
- Li, J., & Hao, H. (2013). Numerical Study of Structural Progressive Collapse using Substructure Technique. *Journal of Structural Engineering*, 52, 101–113.
- Li, Y., Lu, X. Z., Guan, H., & Ye, L. P. (2011). An Improved Tie Force Method for Progressive Collapse Resistance Design of Reinforced Concrete Frame Structures. *Journal of Structural Engineering*, 33(10), 2931–2973.
- Lim, N. S., Tan, K. H., & Lee, C. K. (2017). Experimental Studies of 3D RC Substructures under Exterior and Corner Column Removal Scenarios. *Journal of Structural Engineering*, 150, 409–427.
- Lin, K., Chen, Z., Li, Y., & Lu, X. (2022). Uncertainty analysis on progressive collapse of RC frame structures under dynamic column removal scenarios. *Journal of Building Engineering*, 46, 103811.
- Liu, M. (2011). Progressive Collapse Design of Seismic Steel Frames using Structural Optimization. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 322–332.
- Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D., & Danesi, R. F. (2004). Analysis of Building Collapse under Blast Loads. *Journal of Structural Engineering*, 26, 63–71.
- Malla R. B., & Nalluri, B. B. (1995). Dynamic Effects of Member Failure on Response of Truss Type Space Structure. *Journal of Spacecrafts and Rockets*, 32(3), 545–551.
- Marjanishvili, S. M. (2004). Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse. *Journal Performance of Constructed Facilities*, 18(2), 79–85.
- Masoero, E., Daro, P., & Chiaia, B. M. (2013). Progressive Collapse of 2D Framed Structures: An Analytical Model. *Journal of Structural Engineering*, 54, 94–102.

- Matthews, S. L., & Reeves, B. (2012). Structural Assessment of Existing Large Panel System Built Dwelling Blocks for Accidental Loads. *The Structural Engineer*, 90, 42-55.
- McConnel, R. E., & Kelly, S. J. (1983). Structural Aspects of Progressive Collapse of Warehouse Racking. *Journal of Structural Engineering*, 61(11), 343-347.
- Menchel, K. (2009). *Progressive Collapse: Comparison of Main Standards, Formulation and Validation of New Computational Procedures*. Universite Libre De Bruxelles, Faculty of Applied Sciences, PhD Thesis, Bruxelles.
- Mirzaei, Y. (2010). *Post-Punching Behavior of Reinforced Concrete Slabs*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Civil and Environmental Engineering, PhD Thesis, Lausanne, Switzerland.
- Mlakar, P. F., Dusenberry, D. O., Harris, J. F., Haynes, G., Phan, L.T., & Sozen, M. A. (2003). Findings and Recommendations from Pentagon Crash. *Forensic Engineering: Proceedings of the Third Congress*, s. 43-45. San Diego, California.
- Moghaddam, A. K., & Sasani, M. (2015). Progressive Collapse Evaluation of Murrah Federal Building Following Sudden Loss of Column G20. *Journal of Structural Engineering*, 89, 162–171.
- Mohamed, O. A. (2006). Progressive Collapse of Structures: Annotated Bibliography and comparison of codes and standarts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20, 418-425.
- Moore, D. B. (2002). Prevention of Progressive Collapse: Report on the July 2002 National Workshop and Recommendations for Future Efforts. *The Multihazard Mitigation Council of the National Institute of Building Sciences*, s. 1-29, Washington.
- Nair, R. S. (2023, Eylül 15). *Ronan Point Apartmanı Örneği: Progressive Collapse Basics*. <https://www.aisc.org/globalassets/why-steel/progressive-collapse-basics.pdf> adresinden alınmıştır.
- Nair, R. S. (2006). Preventing Disproportionate Collapse. *Journal of Perform Construction Facilities*, 20, 309-314.
- Nyunn, S., Wang, F., Yang, J., Liu, Q., Azim, I., & Bhatta, S. (2020). Numerical studies on the progressive collapse resistance of multi-story RC buildings with and without exterior masonry walls. *Structures*, 28, 1050-1059.
- NBCC. (1975). National Building Code of Canada. National Building Code of Canada. NBCC-1975. Ottawa: National Research Council Canada.
- NBCC. (1995). National Building Code of Canada. Part 4 and Commentary C. NBCC-1995. Ottawa: National Research Council Canada.
- NRCC. (1975). Associate Committee on the National Building Code. NRCC-1975. Canada: National Research Council of Canada.

- NRCC. (1977). Associate Committee on the National Building Code. NRCC-1977. Canada: National Research Council of Canada.
- NRCC. (1980). Associate Committee on the National Building Code. NRCC-1980. Canada: National Research Council of Canada.
- ODPM. (1970). The Building Regulations – Structure: Approved Document A. ODPM-1970, London: Office of the Deputy Prime Minister.
- ODPM. (2004). The Building Regulations – Structure: Approved Document A. ODPM-2004. London: Office of the Deputy Prime Minister.
- Osteraas, J. D. (2006). Murrah Building Bombing Revisited: A Qualitative Assessment of Blast Damage and Collapse Patterns. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 330-335.
- Özgan, K. (2000). *Değiştirilmiş Vlasov Modelini Kullanarak Elastik Zemine Oturan Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Özgan, K. (2007). *Geliştirilmiş Vlasov Modelini Kullanarak Elastik Zemine Oturan Kalın Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi ve Etkin Zemin Derinliğinin Belirlenmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Özgan, K., Daloğlu, T. A., & İkizler, S. B. (2020). Yapı-Zemin Etkileşimini Dikkate Alarak Yapıların Aşamalı Göçme Riskinin Belirlenmesi. TÜBİTAK projesi, 118M998.
- Özgan, K., Kılıçer, S., & Daloğlu, A. T. (2023). Soil-Structure Interaction Effect on the Resistance of a Steel Frame against Progressive Collapse Using Linear Static and Nonlinear Dynamic Procedures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 37(1).
- Özgan, K., Kılıçer, S., & Daloğlu, A. T. (2023). Evaluation of progressive collapse potential of a RC school building considering soil–structure interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 1, 1-15.
- Qian, K., & Li, B. (2017). Dynamic and Residual Behavior of Reinforced Concrete Floors Following Instantaneous Removal of a Column. *Journal of Structural Engineering*, 148, 175–184.
- Qiu, L., Lin, F., Wu, K., & Gu, X. (2021). Progressive collapse resistance of RC T-beam cable subassemblages under a middle-column-removal scenario. *Journal of Building Engineering*, 42, 102814.
- Panahi, S., & Zahrai, S. M. (2021). Performance of typical plan concrete buildings under progressive collapse. *Structures*, 31, 1163-1172.
- Pasternak, P., L. (1954). On a New Method of Analysis of an Elastic Foundations by means of Two Foundation Constants. *Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu i Arkhitekture*, Moskov, Russia.

- Pearson, C., & Delatte, N. (2005). Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 19, 173-177.
- Pham, X. D., & Tan, K. H. (2014). Experimental Response of Beam-Slab Substructures Subject to Penultimate-External Column Removal. *Journal of Structural Engineering*, 141(7), 401-417.
- Pretlove, A. J. (1986). Dynamic Effects in Fail-Safe Structural Design in: Proceedings. *International Conference on Steel Structures: Recent Advances and their Application to Design*, s. 749-757. Budva.
- Pretlove, A. J., & Ramsde, M. (1991). Dynamic Effects in Progressive Failure of Structural. *International Journal of Impact Engineering*, 11(4), 539-546.
- Ren, P. Q., Li, Y., Lu, X. Z., Guan, H., & Zhou, Y. L. (2016). Experimental Investigation of Progressive Collapse Resistance of one-way Reinforced Concrete Beam-Slab Substructures under a Middle-Column-Removal Scenario. *Journal of Structural Engineering*, 118, 28–40.
- Rezvani, F. H., Yousefi, A. M., & Ronagh, H. R. (2015). Effect of Span Length on Progressive Collapse Behaviour of Steel Moment Resisting Frames. *Structures*, 3, 81–89.
- Ryu, M., He, K., Lee, D., Park, S., Thomas, G., & Paik, J. (2021). Finite element modeling for the progressive collapse analysis of steel stiffened-plate structures in fires. *Thin-Walled Structures*, 159, 107262.
- Sadek, F., Main, J. A., Lew, H. S., & Bao, Y. (2011). Testing and Analysis of Steel and Concrete Beam Column Assemblies under a Column Removal Scenario. *Journal of Structural Engineering*, 137(9), 881–892.
- Salem, H. M., & Helmy, H. M. (2014). Numerical Investigation of Collapse of the Minnesota I-35W Bridge. *Journal of Structural Engineering*, 59, 635–645.
- Sasani, M., & Kropelnicki, J. (2008). Progressive Collapse Analysis of an RC Structure. *The Structural Design of Tall Special Buildings*, 17, 757–771.
- SBCCI. (1994). Standard Building Code. SBCCI. Englewood: Southern Building Code Congress International.
- Selvaduari, A. P. S. (1979). *Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Sharma, R., & Singh, R. (2017). P-Delta Effects on Tall RC Buildings with and Without Shear Wall. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4, 1992–1998.
- Song, B. I. (2010). *Experimental and Analytical Assessment on the Progressive Collapse Potential of Existing Buildings*. The Ohio State University, Civil Engineering, Master Thesis, Ohio.

- Song, B. I., & Sezen, H. (2013). Experimental and Analytical Progressive Collapse Assessment of a Steel Frame Building. *Journal of Structural Engineering*, 56, 664–672.
- Starossek, U., & Wolff, M. (2005). Progressive Collapse: Design Strategies. In: *IABSE Symposium on Structures and Extreme Events*, s. 14-17, Lisbon, Portugal.
- Starossek, U., & Haberland, M. (2012). Robustness of Structures. *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*, 1, 1-21.
- Swondo, R., Cunningham, L., Gillie, M., & Bailey, C. (2019). Progressive Collapse Analysis of Composite Steel Frames Subject to Fire Following Earthquake. *Fire Safety Journal*, 103, 49-58.
- Szyniszewski, S., & Krauthammer, T. (2012). Energy Flow in Progressive Collapse of Steel Framed Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 42, 142–153.
- Tiam, Li-Min., Li, Mu-han., Li, Lei., Li, Dong, Ye., & Bai, Chong. (2023). Novel joint for improving the collapse resistance of steel frame structures in column-loss scenarios. *Thin-Walled Structures*, 182, Part A.
- Unified Facility Criteria. (2005). Security Engineering: Concept Design. UFC 4-020-02. Washington (DC): U.S. Department of Defense.
- Unified Facility Criteria. (2008). Security Engineering Facilities Planning Manual. UFC 4-020-01. Washington (DC): U.S. Department of Defense.
- Unified Facility Criteria. (2012). Minimum Antiterrorism Standoff Distances for Buildings. UFC 4-010-02. Washington (DC): U.S. Department of Defense.
- Unified Facility Criteria. (2013). Minimum Antiterrorism Standards For Buildings. UFC 4-010-01. Washington (DC): U.S. Department of Defense.
- Unified Facility Criteria. (2016). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. UFC 4-023-03. Washington (DC): U.S. Department of Defense.
- Vallabhan, C. V. G., & Das, Y. C. (1988). Parametric Study of Beams on Elastic Foundations. *Journal of Engineering Mechanics*, 114(12), 2072-2082.
- Vallabhan, C. V. G., & Das, Y. C. (1991). Modified Vlasov for Beams on Elastic Foundation. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 117(6), 956-966.
- Vallabhan, C. V. G., & Daloğlu, A. T. (1999). Consistent FEM-Vlasov Model for Plates on Layered Soil. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 125(1), 108-113.
- Vasilieva, A. (2013). *Progressive Collapse and Methods of Prevention*. Saimaa University of Applied Sciences, The Faculty of Technology, Bachelor's Thesis, Saimaa.
- Vinay, M., Rao, P., Dey, S., Swaroop, A., Sreenivasulu, A., & Rao, V. (2022). Evaluation of progressive collapse behavior in reinforced concrete buildings. *Structures*, 45, 1902-1919.

- Vlasov, V. Z., & Leont'ev, N. N. (1966). *Beams, Plates and Shells on Elastic Foundations. Israel Program for Scientific Translations*, Translated from Russian, Jerusalem.
- Vlassis, A. G. (2007). *Progressive Collapse Assessment of Tall Buildings*. University of London, Department of Civil and Environmental Engineering, PhD Thesis, London.
- Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit*. Dominicus, Prague.
- Yang, B., & Tan, K. H. (2013). Experimental Tests of Different Types of Bolted Steel Beam Column Joints under a Central-Column-Removal Scenario. *Journal of Structural Engineering*, 54, 112–130.
- Yap, L. S., & Li, B. (2011). Experimental Investigation of Reinforced Concrete Exterior Beam Column Subassemblages for Progressive Collapse. *ACI Structural Journal*, 108(5), 542-552.
- Yu, J., & Tan, K. H. (2013). Experimental and Numerical Investigation on Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Beam Column Sub-Assemblages. *Journal of Structural Engineering*, 55(10), 90–106.
- Zhao, X., Yan, S., Chen, Y., Xu, Z., & Lu, Y. (2017). Experimental Study on Progressive Collapse-Resistant Behavior of Planar Trusses. *Journal of Structural Engineering*, 135, 104–116.
- Zhu, Y., Chen, C., Huang, Y., Huang, Z., Yao, Y., & Keer, L. (2020). Dynamic progressive collapse of steel moment frames under different fire scenarios. *Journal of Constructional Steel Research*, 173, 106256.
- URL-2. (2023, Ocak 9). Doğalgaz Patlaması: <https://tr.euronews.com/2016/02/16/rusya-da-dogalgaz-patlamasi-en-az-7-olu> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2018, Mart 24). Doğalgaz Patlaması: <http://www.iha.com.tr/haber-ankaradaki-dogalgaz-patlamasi-guvenlik-kamerasinda-617848/> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2018, Mart 24). Patlama Örneği: https://www.huffingtonpost.com/entry/turkey-coup-aftermath-photos_us_578a4955e4b08608d334c90c adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2023, Mart 16). Patlama Örneği: <https://www.gazetevatan.com/dunya/rus-fuzesi-kievde-26-katli-binayi-vurdu-goruntuler-dunyayi-sok-etti-2023085>

ÖZGEÇMİŞ

Saffet KILIÇER, Lise eğitimini Ankara Eryaman Lisesinde tamamladıktan sonra 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2017 yılında aynı üniversitenin İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalından yüksek mühendis unvanıyla mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora programına başladı. 2013-2018 yılları arası Artvin Çoruh Üniversitesi Yapı İşler ve Teknik Daire başkanlığından görev aldıktan sonra 2018 yılından bu yana Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derecede İngilizce ve orta derecede Rusça bilen Saffet KILIÇER evli ve 2 çocuk babasıdır.

- Özgan, K., Kılıçer, S., & Daloğlu, A. (2023). Soil–Structure Interaction Effect on the Resistance of a Steel Frame against Progressive Collapse Using Linear Static and Nonlinear Dynamic Procedures. *American Society of Civil Engineers (ASCE) J. Perform. Constr. Facil.*, 37.
- Özgan, K., Kılıçer, S., & Daloğlu, A. (2023). Evaluation of progressive collapse potential of a RC school building considering soil–structure interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24, 1199-1213.
- Kılıçer, S., Özgan, K., & Daloğlu, A. (2018). Effects of soil structure interaction on behavior of reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering Applied Mechanics*, 1, 28-33.
- Kılıçer, S., & Özgan, K. (2018). Deprem Yüğü Etkisindeki Betonarme Yapıların Tasarımında Yapı-Zemin Etkileşiminin İncelenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4, 1-10.
- Kılıçer, S., Özgan, K., Daloğlu, A., & Karakaş, A. İ. (2016). Yapı Zemin Etkileşiminin Betonarme Yapılarının Tasarımına Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18, 139-152.
- Kılıçer, S., Özgan, K., Daloğlu, A., & İkizler, S. B. (2021). Progressive Collapse Analysis of Steel Structures on Elastic Foundation: Part-2. Nonlinear Dynamic Procedures. *14th International Congress on Advances in Civil Engineering*, s. 1259-1266. İstanbul.
- Kılıçer, S., Özgan, K., Daloğlu, A., & İkizler, S. B. (2021). Progressive Collapse Analysis of Steel Structures on Elastic Foundation: Part-1. Linear Static Procedures. *14th International Congress on Advances in Civil Engineering*, s. 1221-1228. İstanbul.

- Kılıçer, S., Özgan, K., Daloğlu, A., & İkizler, S. B. (2020). Betonarme Yapıların Aşamalı Göçme Direnci Üzerine Sayısal Bir Çalışma. *7. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (UBAK)*. s. 147-163. Ankara.
- Kılıçer, S., Kaya, A., Özgan, K., & Adanur, S. (2019). Improvement of Progressive Collapse Resistance of Reinforced Concrete Buildings using Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP). *International Civil Engineering and Architecture Conference ICEARC'19*. s. 1167-1176. Trabzon.
- El Haj Ahmad, M., Özgan, K., & Kılıçer, S. (2018). Comparative Study Of TSCB 2018, TSC 2007, Eurocode 8 and ASCE 7/16: Applied to an Office Steel Buildings. *International Congress on Vocational and Technical Sciences (Umteb-2)*. s. 52. Batum.
- Kılıçer, S., Özgan, K., & El Haj Ahmad, M. (2018). A study on effects of green roofs to design of R/C buildings. *International Congress on Vocational and Technical Sciences (Umteb-2)*. s. 51. Batum.
- Kılıçer, S., Özgan, K., & Daloğlu, A. (2017). Zemin özelliklerinin betonarme yapıların tasarımına etkisi. *Proceedings of the 3rd International Soil-Structures Interaction Symposium*. s. 47-57. İzmir.
- Kılıçer, S., Özgan, K., & Daloğlu, A. (2017). Yapı-Zemin Etkileşiminin Farklı Yükseklikteki Betonarme Yapılara Etkisi. *ICADET-2017 International Conference on Edvanded Engineering and Technologies*. s. 156-164. Bayburt.
- Kılıçer, S., Özgan, K., & Daloğlu, A. (2017). Effects of Soil-Structure Interaction on Design of Reinforced Concrete Structures for Various Earthquake Zone. *Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR-2017)*. s. 1. Zürich.
- Kılıçer, S., Özgan, K., & Daloğlu, A. (2017). Plate-Foundation Interaction under Moving Load using Two Parameter Subsoil Model. *International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)*. s. 2304-2312. Nevşehir.
- Kılıçer, S., Özgan, K., & Daloğlu, A. (2017). Interaction Between Two Close Plates on Elastic Foundation using Modified Vlasov Model. *1 th International Congress on Vocational and Technical Sciences*. s. 1056-1067. Batum.
- Karakaş, A. İ., Özgan, K., Daloğlu, A., & Kılıçer, S. (2015). Winkler Yatak Katsayısının Hiperbolik Soğutma Kulesinin Serbest Titreşim ve Statik Rüzgâr Davranışına Etkisi. *XIX. Ulusal Mekanik Kongresi*. s. 597-607. Trabzon.