



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DOLGU DUVAR GEOMETRİSİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BETONARME
YAPISAL SİSTEMLERİN SİSMİK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

**İsa EL SINEDİH
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA
2026**



T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLGU DUVAR GEOMETRİSİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BETONARME
YAPISAL SİSTEMLERİN SİSMİK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

İsa EL SINEDİH
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Doç. Dr. Muhammet Fethi GÜLLÜ

ŞANLIURFA
2026

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanması sürecinde değerli bilgi, yönlendirme ve katkılarından dolayı tez danışmanım **Doç. Dr. Muhammet Fethi Güllü**'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam süresince göstermiş olduğu ilgi, sabır ve akademik destek benim için son derece yol gösterici olmuştur.

Ayrıca, lisansüstü eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle katkı sağlayan Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Bu çalışma sürecinde gerek akademik gerekse manevi desteğiyle her zaman yanımda olanerli arkadaşım **İzzettin Alhalil**'e katkıları ve desteği için teşekkür ederim.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme ve her zaman yanımda olan kıymetli eşime sabır, anlayış ve destekleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
KISALTMALAR	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
onay	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. GENEL	1
1.2. Tezin Amacı ve Hedefleri	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. GEREÇ ve YÖNTEM	7
3.1. DENEYSEL DOĞRULAMALARDA KULLANILAN DOLGU DUVARLAR ...	7
3.2. DOLGU DUVALARIN MODELLENMESİ	10
3.2.1. Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu ile modellenmesi	11
3.2.2. Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu için Pivot Modeli	12
3.3. ÜÇ BOYUTLU BİNALARIN MODELLENMESİ	15
3.3.1. Modelleme ve Sayısal Analiz Yöntemi	16
3.3.2. Betonarme Çerçeve Elemanlarının Modellenmesi	17
3.3.3. Dolgu Duvarlarının Sayısal Modeli	18
3.3.4. Mesnet Koşulları ve Düşey Yüklerin Tanımı	19
3.3.5. Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi (NSA) Yöntemi	20
3.3.6. Bina Modelleri	21
3.3.7. Parametrik Analizlerin Kodlama Sistemi	24
4. BULGULAR	29
4.1. Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Modelinin Doğrulanması	29
4.2. Kapasite Eğrileri	34
5. TARTIŞMA	56
6. SONUÇLAR	58
7. ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	61
ÖZ GEÇMİŞ	64

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLGU DUVAR GEOMETRİSİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BETONARME YAPISAL SİSTEMLERİN SİSMİK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

İsa EL SİNEDİH

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhammet Fethi GÜLLÜ

Yıl: 2026, Sayfa: 64

Türkiye'deki konut türü yapılarda tuğla duvarlarla doldurulmuş betonarme çerçeveler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu duvarlar, iç mekanları ayırmak ve ısı ve ses yalıtımı sağlamak gibi mimari amaçlarla kullanılır. Ancak, son zamanlarda yapılan çalışmalar, bu duvarların geleneksel olarak yapısal olmayan elemanlar olarak sınıflandırılmalarına rağmen, bir yapının sismik davranışında belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Deneysel ve sayısal araştırmalar, dolgu duvarlarının çerçeve sistem rijitliğini artırabildiğini, katlar arası yerdeğiştirme taleplerini azaltabildiğini ve plastik mafsallı oluşumunu değiştirebileceğini göstermiştir. Bu, yanal yükler altında performansı artırabilir veya bazı durumlarda gevrek hasar modlarını tetikleyebilir. Bu konunun önemi, 6 Şubat 2023'teki depremden sonra daha da belirgin hale gelmiştir. Saha gözlemleri, dolgu duvarlarının belirli özelliklerinin, özellikle kullanılan tuğla türü ve mekanik özelliklerinin, birçok binada kaydedilen hasarın şiddetinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Buna dayanarak, bu duvarların malzeme ve geometrik parametrelerinin etkileri bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. SAP2000 yazılımı kullanılarak tuğla dolgulu duvarlı betonarme yapı sistemlerinin sayısal modelleri geliştirilmiştir. Duvarlar, literatürde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım olan diyagonal basınç çubukları yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Doğrusal olmayan statik analizler (Pushover Analizi) gerçekleştirilmiştir. Malzeme özellikleri (tuğla türü, basınç dayanımı ve elastik modül), duvar kalınlığı, açıklık yüksekliği ve açıklık genişliği gibi temel parametrik değişkenlerin etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma, duvar özellikleri değiştiğinde çerçevenin rijitliği ve yanal yük taşıma kapasitesinin nasıl değiştiğini anlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, plastik mafsallı oluşumunu ve katlar arası yerdeğiştirme davranışının gelişimini incelemektedir. Ayrıca, çalışma, dolgu duvarının düzensiz veya gevrek davranış modlarına katkıda bulunmak yerine, yanal yük taşıma kapasitesini artıran bir eleman olarak işlev gördüğü koşulları belirlemeye çalışmaktadır. Sonuçların, sayısal analizlerde dolgu duvarlarının modellenmesini iyileştirmesi ve Türkiye'deki binaların daha güvenli ve daha ekonomik sismik tasarımı için mühendislik önerileri geliştirmesi beklenmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Dolgu duvarlar, Betonarme çerçeveler, Parametrik analiz, Sismik performan, Sonlu elemanlar

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INFLUENCE OF INFILL WALL GEOMETRY AND MATERIAL PROPERTIES ON THE SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL SYSTEMS

İsa EL SINEDİH

HARRAN UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Muhammet Fethi GÜLLÜ

Year: 2026, Page: 64

In Turkey, residential buildings commonly use reinforced concrete frames filled with brick walls. These walls serve architectural purposes by separating interior spaces and providing thermal and acoustic insulation. However, recent studies have revealed that, despite being traditionally classified as non-structural elements, these walls significantly influence a building's seismic behavior. Experimental and numerical research indicates that infill walls can enhance the rigidity of the frame system, reduce displacement demands, and impact the formation of plastic hinges. This improved performance under lateral loads can sometimes lead to brittle failure modes. The importance of this issue became even more evident following the earthquake on February 6, 2023. Field observations demonstrated that certain characteristics of infill walls, particularly the type of brick used and its mechanical properties, significantly contributed to the extent of damage observed in many buildings. Consequently, this study evaluates the effects of the material and geometric parameters of these walls. To achieve this, numerical models of reinforced concrete structures with brick infill walls were developed using SAP2000 software. The walls were modelled using the diagonal pressure bar method, a widely accepted approach in the literature. The models underwent a nonlinear static pushover analysis to assess the impact of key parametric variables, including material properties (brick type, compressive strength, and modulus of elasticity), wall thickness, floor height, and bay spans. The study aims to investigate how variations in wall properties influence the rigidity, ductility, and lateral load-carrying capacity of the structural system. Additionally, it examines the development of plastic hinge behavior. Ultimately, the research seeks to establish the conditions under which infill walls enhance lateral load-carrying capacity rather than contribute to irregular or brittle behavior. The findings are expected to improve the modelling of infill walls in numerical analyses and to provide engineering recommendations for safer and more economical seismic design of buildings in Turkey.

KEYWORDS: Infill walls, Reinforced concrete frames, Parametric analysis, Seismic performance, Finite elements

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	S1A-2 dolgu duvar numunesinin geometrik ve donatı detayları (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)	8
Şekil 3.2.	S1B-1 dolgu duvar numunesinin geometrik ve donatı detayları (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)	8
Şekil 3.3.	S1C-2 dolgu duvar numunesinin geometrik ve donatı detayları (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)	9
Şekil 3.4.	Eşdeğer diyagonal tek basınç çubuğunun tanımı ve geometrik karakteristikleri	12
Şekil 3.5.	Eşdeğer diyagonal çubuk için histeretik pivot davranışının tanımlanması (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)	14
Şekil 3.6.	SAP2000 v25 yazılımında eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun çok doğrulu plastik link elemanı ve Pivot histeretik modeli kullanılarak tanımlanması	19
Şekil 3.7.	B1 binası SAP2000 v25 3-D görüntüsü (Alhalil ve Güllü, 2023)	22
Şekil 3.8.	B2 binası SAP2000 v25 3-D görüntüsü (Alhalil ve Güllü, 2023)	22
Şekil 3.9.	B3 binası SAP2000 v25 3-D görüntüsü (Alhalil ve Güllü, 2023)	23
Şekil 3.10.	B1, B2 ve B3 binalarına ait taşıyıcı elemanların kesitleri ve donatı detayları (kesit ölçüleri cm cinsindedir) (Alhalil ve Güllü, 2023)	23
Şekil 4.1.	Kalkerli kum taşı dolgulu (S1A-2) numune için deneysel ve sayısal kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	31
Şekil 4.2.	Kil dolgulu (S1B-1) numune için deneysel ve sayısal kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	32
Şekil 4.3.	Hafif beton dolgulu (S1C-2) numune için deneysel ve sayısal kapasite eğrilerinin karşılaştırılması	33
Şekil 4.4.	B1 yapı modeli için H = 3 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	36
Şekil 4.5.	B1 yapı modeli için H = 3.5 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	37
Şekil 4.6.	B1 yapı modeli için H = 4 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	38
Şekil 4.7.	B2 yapı modeli için H = 3 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	39
Şekil 4.8.	B2 yapı modeli için H = 3.5 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	40
Şekil 4.9.	B2 yapı modeli için H = 4 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	41
Şekil 4.10.	B3 yapı modeli için H = 3 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	42
Şekil 4.11.	B3 yapı modeli için H = 3.5 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	43
Şekil 4.12.	B3 yapı modeli için H = 4 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri	44

Şekil 4.13.	B1 bina modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen başlangıç rijitliği oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	47
Şekil 4.14.	B2 bina modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen başlangıç rijitliği oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	48
Şekil 4.15.	B3 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen başlangıç rijitliği oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	49
Şekil 4.16.	B1 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen süneklik oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	50
Şekil 4.17.	B2 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen süneklik oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	51
Şekil 4.18.	B3 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen süneklik oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	52
Şekil 4.19.	B1 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen maksimum taban kesme kuvveti oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	53
Şekil 4.20.	B2 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen maksimum taban kesme kuvveti oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	54
Şekil 4.21.	B3 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen maksimum taban kesme kuvveti oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması	55

KISALTMALAR

Ab	Kiriş kesit alanı (mm ²)
Ac	Kolon kesit alanı (mm ²)
Du	Kapasite eğrisinden elde edilen nihai yer değiştirme
Dy	Kapasite eğrisinden elde edilen akma yer değiştirmesi
Ed	Dolgu duvarın diyagonal doğrultudaki elastisite modülü (MPa)
Ef	Betonarme çerçevenin elastisite modülü (MPa)
E1	Yığma malzemenin 1 doğrultusundaki elastisite modülü (MPa)
E2	Yığma malzemenin 2 doğrultusundaki elastisite modülü (MPa)
G12	Yığma malzemenin kayma modülü (MPa)
h	Kat yüksekliği (m)
K1	Backbone eğrisinin I. dal rijitliği (kN/mm)
K2	Backbone eğrisinin II. dal rijitliği (kN/mm)
Kini	Başlangıç rijitliği (kN/mm)
S1	Akma dayanımı (kN)
S3	Artık dayanım (kN)
t	Dolgu duvar kalınlığı (m)
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
Vmax	Maksimum taban kesme kuvveti (kN)
w	Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu genişliği (m)
Δu	Nihai tepe yer değiştirmesi (m)
δ3	Artık yer değiştirme (mm)
α	Akma dayanımı oranı (S1/S2)
β	İkinci dal rijitlik oranı (K2/K1)
ç	Yumuşama dalını tanımlayan şekil parametresi
μ	Süneklik katsayısı
l	Açıklık uzunluğu (m)
S2	Maksimum dayanım (kN)
δ1	Akma yer değiştirmesi (mm)
δ2	Tepe yer değiştirmesi (mm)

θ	Diyagonal çubuğun yatay ile yaptığı açı (°)
λn	Çerçeve–dolgu etkileşim parametresi
ν_{12}	Yığıma malzemenin Poisson oranı
$\mu_{0.85}$	%85 dayanım seviyesine göre tanımlanan süneklik katsayısı

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Dolgu duvarlarda kullanılan yığılma malzemenin mekanik özellikleri	10
Çizelge 3.2.	Pivot Model Parametreleri	13
Çizelge 3.3.	B1 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları	25
Çizelge 3.4.	B2 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları	26
Çizelge 3.5.	B3 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları	27

onay

viii

1. GİRİŞ

1.1. GENEL

Deprem etkisi altındaki bölgelerde yer alan ülkelerde, betonarme yapılar mevcut yapı stokunun büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Türkiye, jeolojik konumu nedeniyle yüksek sismik tehlikeye sahip ülkeler arasında yer almakta olup, betonarme çerçeve sistemli binalar özellikle konut yapılarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu nedenle betonarme yapıların deprem davranışının doğru bir şekilde anlaşılması ve değerlendirilmesi, can ve mal güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır (Paulay ve Priestley, 1992).

Betonarme çerçeve sistemlerin tasarımında, taşıyıcı sistem davranışı genellikle kiriş ve kolonlardan oluşan çerçeveler üzerinden ele alınmakta ve deprem yönetmelikleri doğrultusunda bu sistemlerin yatay yükler altındaki performansı değerlendirilmektedir. Ancak betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan dolgu duvarlar, çoğunlukla mimari amaçlara hizmet etmelerine rağmen, taşıyıcı sistemle etkileşime girerek yapının sismik davranışını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Geleneksel tasarım yaklaşımında bu duvarlar taşıyıcı olmayan elemanlar olarak kabul edilmekte ve çoğu zaman yapısal analizlerde ihmal edilmektedir (Fardis ve Panagiotakos, 1997).

DeneySEL ve sayısal çalışmalar, dolgu duvarların betonarme çerçevelerle etkileşimi sonucunda yapının yatay rijitliğinin ve dayanımının artabildiğini, katlar arası ötelenme taleplerinin azalabildiğini ve plastik mafsallı oluşum sıralamasının önemli ölçüde değişebildiğini göstermiştir (Mehrabı vd., 1996; Dolšek ve Fajfar, 2008). Bununla birlikte, dolgu duvarların geometrik özellikleri, malzeme nitelikleri ve yapı içerisindeki düzensiz dağılımları, deprem etkileri altında kırılma hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasına ve beklenmeyen göçme türlerinin gelişmesine neden olabilmektedir (Stavridis ve Shing, 2010; Cavaleri ve Di Trapani, 2014).

Dolgu duvar kalınlığı, açıklık oranları ve kullanılan tuğla malzemesinin mekanik özellikleri gibi parametreler, dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin niteliğini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu parametrelerdeki değişimler, yapının rijitlik dağılımını, enerji tüketme kapasitesini ve hasar mekanizmalarını doğrudan etkileyebilmektedir (Asteris

vd., 2011; Crisafulli ve Carr, 2007).

Dolgu duvarların yapısal davranışa katkısı tek bir parametreye bağlı değildir; duvarın malzeme özellikleri (basınç dayanımı, elastisite modülü ve kayma kapasitesi) ile geometrik özellikleri (kalınlık, açıklık oranları ve kat yüksekliği) birlikte değerlendirildiğinde, çerçeve–dolgu duvar etkileşimi belirgin biçimde değişebilmektedir. Aynı dolgu duvar tipinin farklı kat yüksekliği veya farklı açıklık oranına sahip çerçevelerde farklı performans gösterebilmesi, bu etkinin sistematik ve parametrik bir yaklaşımla incelenmesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca dolgu duvarların yapıda düzensiz dağılımı veya rijit taşıyıcı elemanlarla (örneğin perdelerle) birlikte çalışması durumunda, rijitlik dağılımında ani değişimler oluşabilmekte ve bu durum bazı senaryolarda kırılğan hasar mekanizmalarını tetikleyebilmektedir. Bu nedenle dolgu duvar parametrelerinin etkilerinin, farklı yapı tipleri üzerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, gerçekçi sismik performans tahmini açısından önem taşımaktadır.

Son yıllarda meydana gelen büyük depremler, dolgu duvarların yapı hasarları üzerindeki rolünü açık bir şekilde ortaya koymuştur. Özellikle Türkiye’de 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremler sonrasında yapılan saha gözlemleri, dolgu duvarların malzeme türü, geometrisi ve yapı içerisindeki yerleşiminin, gözlenen hasar türleri ve şiddeti üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Ricci vd., 2018). Bu durum, dolgu duvarların sismik performans değerlendirmelerinde göz ardı edilmemesi gereken önemli bir bileşen olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda, betonarme çerçeveli yapıların sismik davranışının daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi için dolgu duvarların malzeme ve geometrik özelliklerinin sistematik olarak incelenmesi gerekmektedir. Dolgu duvarların yapısal davranışa olan katkılarının ve olası etkilerinin anlaşılması, hem mevcut yapıların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi hem de yeni yapıların daha güvenli ve ekonomik şekilde tasarlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin sismik performansını etkileyen temel parametrelerin incelenmesi, bu çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmaktadır.

1.2. Tezin Amacı ve Hedefleri

Bu tezin temel amacı, betonarme yapılarda dolgu duvarlara ait malzeme ve

geometrik parametrelerdeki değişimlerin yapıların sismik performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Uygulamada ve literatürde dolgu duvarların çoğunlukla taşıyıcı olmayan elemanlar olarak değerlendirilmesine rağmen, bu duvarların özelliklerindeki değişimlerin yapı rijitliği, taşıma kapasitesi ve doğrusal olmayan davranış üzerinde önemli rol oynayabildiği bilinmektedir.

Bu kapsamda çalışmada, dolgu duvarların kat yüksekliği, duvar kalınlığı ve malzeme türündeki değişimlerinin betonarme binaların sismik davranışına olan etkileri doğrusal olmayan statik analizler yardımıyla araştırılmıştır. Dolgu duvar-çerçeve etkileşimi, literatürde mevcut olarak elde edilebilen, deneysel olarak doğrulanmış ve birden fazla parametreyi dikkate alan eşdeğer diyagonal çubuk modeli kullanılarak temsil edilmiştir.

Çalışmanın hedefi, söz konusu parametre değişimlerinin statik itme analizi kapasite eğrilerinin şekli, başlangıç rijitliği ve yatay yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymak ve elde edilen bulgular doğrultusunda, daha güvenli ve ekonomik betonarme yapı tasarımlarına yönelik değerlendirmeler sunmaktır.

Bu çalışma kapsamında aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

- Dolgu duvarlara ait malzeme ve geometrik parametrelerdeki değişimler, betonarme yapıların statik itme analizi kapasite eğrilerinin şekli ve büyüklüğünü nasıl etkilemektedir?
- Dolgu duvar kalınlığı ve malzeme türü, yapıların başlangıç rijitliği, süneklik ve maksimum taban kesme kuvveti üzerinde ne ölçüde belirleyici olmaktadır?
- Farklı taşıyıcı sistem tiplerine sahip betonarme yapılarda (çerçeve sistemli ve karma sistemli yapılar), dolgu duvar-taşıyıcı sistem etkileşimi doğrusal olmayan davranış açısından nasıl farklılık göstermektedir?

Bu sorular doğrultusunda çalışmanın hedeflenen temel katkıları: dolgu duvar parametrelerinin betonarme yapıların sismik performansı üzerindeki görelilik etkilerinin sistematik bir biçimde ortaya konulması, doğrusal olmayan statik analizlerde dolgu duvarların modellenmesine yönelik literatüre dayalı değerlendirmeler sunulması ve Türkiye’de yaygın olarak kullanılan betonarme yapı tipleri için daha gerçekçi sismik performans tahminlerine katkı sağlanmasıdır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Betonarme çerçeveli yapılarda dolgu duvarların sismik davranış üzerindeki etkisi, özellikle son yirmi yıl içerisinde artan deneysel ve sayısal çalışmalarla kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Geleneksel tasarım yaklaşımlarında dolgu duvarlar taşıyıcı olmayan elemanlar olarak kabul edilmekte ve çoğu zaman yapısal analizlerde ihmal edilmektedir. Ancak, bu yaklaşımın gerçek deprem davranışını yeterince temsil edemediği, farklı araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur. Özellikle deprem etkisi altında dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin, yapının rijitlik dağılımını, yanal yük taşıma kapasitesini ve hasar mekanizmalarını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir (Fardis ve Panagiotakos, 1997; Mehrabi vd., 1996). Bu bağlamda, dolgu duvarların yapısal modele dahil edilmesinin, betonarme binaların deprem performansının daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi açısından gerekli olduğu vurgulanmaktadır.

Doğrusal olmayan statik analizlere dayanan birçok çalışmada, dolgu duvarların çerçeve sistemine eklenmesiyle yapının yatay rijitliğinde ve yanal yük taşıma kapasitesinde belirgin artışlar meydana geldiği rapor edilmiştir. Korkmaz ve Uçar (2006), SAP2000 yazılımı kullanarak gerçekleştirdikleri doğrusal olmayan statik itme analizlerinde, dolgu duvar etkisinin dikkate alındığı modellerde ilk plastik mafsallaşmanın dolgu duvar üzerinde başladığını, dolgu duvarın ihmal edildiği modellerde ise plastik mafsalların öncelikle kiriş uçlarında oluştuğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde Tekin vd.,(2007), dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız olarak modellenen betonarme binaların statik itme analizi eğrilerini karşılaştırmış ve dolgu duvarlı modellerde kapasite kuvvetinin yaklaşık %40 oranında arttığını belirlemiştir. Bu sonuçlar, dolgu duvarların yapının genel deprem davranışına önemli katkılar sağladığını ve mimari değişiklikler yapılırken bu duvarların gelişigüzel kaldırılmasının ciddi yapısal riskler doğurabileceğini göstermektedir.

Literatürde yapılan diğer çalışmalar, dolgu duvarların sadece rijitlik ve dayanım üzerinde değil, aynı zamanda hasar dağılımı ve göçme mekanizmaları üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Dolšek ve Fajfar (2008), dört katlı betonarme bir binayı dolgu duvarsız, boşluklu dolgu duvarlı ve boşluksuz dolgu duvarlı olmak üzere farklı konfigürasyonlarda modelleyerek gerçekleştirdikleri doğrusal olmayan analizlerde, dolgu

duvarların özellikle göçmeye yakın sınır durumlarda yapının davranışını olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Sattar ve Liel (2010) ise farklı dolgu duvar yerleşimlerine sahip betonarme çerçeveler üzerinde yaptıkları olasılıksal analizlerde, dolgu duvarlı sistemlerin dolgu duvarsız sistemlere kıyasla daha düşük göçme riskine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, dolgu duvarların deprem güvenliği açısından göz ardı edilmemesi gereken kritik bileşenler olduğunu açıkça göstermektedir.

Dolgu duvarların sismik davranış üzerindeki etkisi, geometrik parametreler açısından da çok sayıda araştırmaya konu olmuştur. Duvar kalınlığı, açıklık oranları, kat yüksekliği ve duvar yerleşimi gibi parametrelerin, dolgu duvar-çerçeve etkileşimini doğrudan etkilediği belirtilmektedir. Mulgund ve Kulkarni (2011), farklı dolgu duvar yerleşimlerine sahip betonarme binalar üzerinde gerçekleştirdikleri pushover analizlerinde, dolgu duvarlı modellerde periyot ve yer değiştirme değerlerinin azaldığını, buna karşılık taban kesme kuvvetlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Nwofor ve Chinwah (2012) tarafından yapılan sonlu eleman analizleri ise, boşluksuz dolgu duvarların yanal ötelenmeleri belirgin biçimde azalttığını, duvarlardaki boşlukların ise bu olumlu etkinin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Asteris vd.,(2017), dolgu duvar rijitliğinin artmasıyla yapıların temel periyotlarının azaldığını ve bu etkinin, açıklık sayısından daha baskın bir parametre olduğunu vurgulamıştır.

Malzeme özelliklerinin etkisini inceleyen çalışmalarda ise, dolgu duvarlarda kullanılan tuğla türünün ve mekanik özelliklerin yapısal davranış üzerinde önemli rol oynadığı belirtilmektedir. Misir vd.,(2012; 2016), farklı tuğla türleri kullanılarak inşa edilmiş betonarme çerçeveler üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, dolgu duvarların çerçeve rijitliğini ve mukavemetini artırdığını, ancak bu etkinin kullanılan malzemenin özelliklerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Cavaleri ve Di Trapani (2014), farklı dolgu duvar malzemelerine ait mekanik özellikleri dikkate alarak geliştirdikleri makro model ile, dolgu duvar parametrelerindeki değişimin pushover analiz sonuçları üzerindeki etkisini ayrıntılı biçimde incelemiştir. Bu çalışma, dolgu duvarların sayısal modellenmesinde malzeme özelliklerinin doğru temsil edilmesinin önemini vurgulayan temel referanslardan biri olarak kabul edilmektedir.

Dolgu duvarların sayısal analizlerde temsili için önerilen modelleme yaklaşımları da literatürde geniş yer bulmuştur. Eşdeğer basınç çubuğu modeli, hesap etkinliği ve kabul edilebilir doğruluk sağlaması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Crisafulli ve Carr, 2007). Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen doğrusal olmayan bağlantı (link) elemanlarına dayalı model, dolgu duvar-çerçeve etkileşimini daha gerçekçi biçimde yansıtarak, doğrusal olmayan statik analizlerde güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Bu nedenle, özellikle statik itme analizine dayalı çalışmalarda bu yaklaşımın yaygın biçimde tercih edildiği görülmektedir.

Mevcut literatür genel olarak değerlendirildiğinde, dolgu duvarların sismik davranış üzerindeki etkisinin çoğunlukla tek bir yapı türü, sınırlı kat sayısı veya sınırlı parametre değişimleri üzerinden incelendiği görülmektedir. Ayrıca birçok çalışmada analizlerin iki boyutlu modeller veya tek doğrultulu yükleme altında gerçekleştirildiği dikkat çekmektedir. Buna karşılık, farklı kat sayılarına ve taşıyıcı sistem özelliklerine sahip betonarme binalar üzerinde, dolgu duvarların geometrik ve malzeme parametrelerinin birlikte ve sistematik olarak incelendiği üç boyutlu çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, dolgu duvarlara ait geometrik ve malzeme parametrelerinin etkisini, üç boyutlu modeller ve iki doğrultulu yükleme altında doğrusal olmayan statik analizler kullanarak incelemeyi amaçlamakta; böylece literatürdeki bu boşluğa katkı sağlamayı hedeflemektedir.

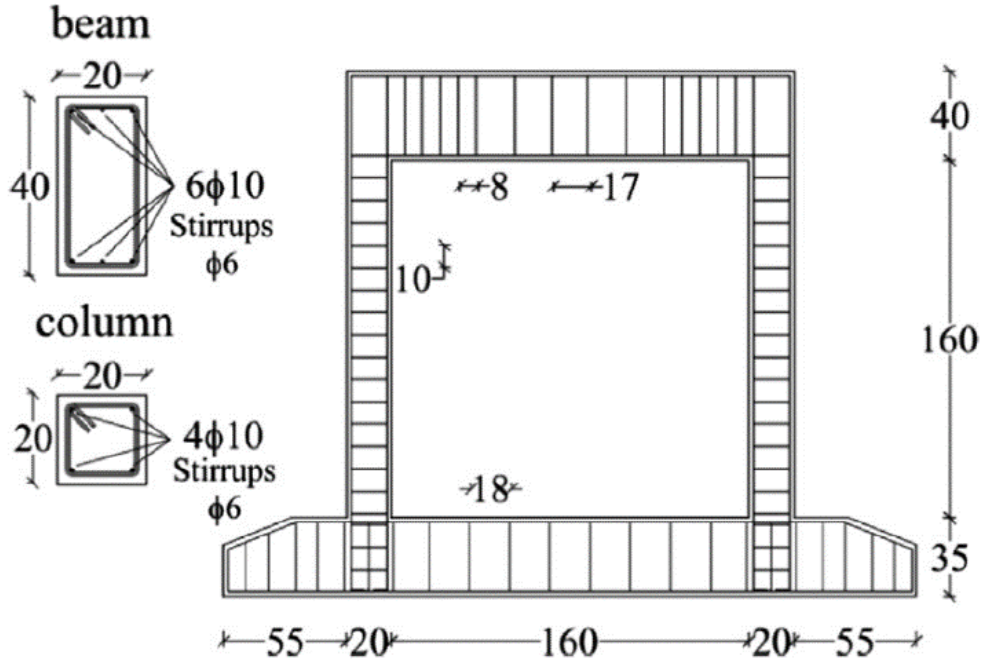
Bunun yanı sıra, dolgu duvarların perde duvarlı betonarme sistemlerle birlikte çalıştığı durumlarda ortaya çıkan doğrusal olmayan etkileşimlerin, doğrusal olmayan statik itme analizi çerçevesinde ayrıntılı olarak incelendiği çalışmalar oldukça azdır. Özellikle dolgu duvar malzeme türü, kalınlık ve kat yüksekliği gibi parametrelerin, farklı taşıyıcı sistem tiplerinde (yalnızca çerçevesel sistemler ve perde duvar içeren sistemler) karşılaştırmalı olarak ele alındığı bütüncül çalışmalar literatürde sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda, mevcut çalışma; dolgu duvarlara ait geometrik ve malzeme parametrelerinin etkisini, farklı yapı tipleri üzerinde, üç boyutlu sayısal modeller ve doğrusal olmayan statik analizler yardımıyla inceleyerek literatürdeki bu boşluğa katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

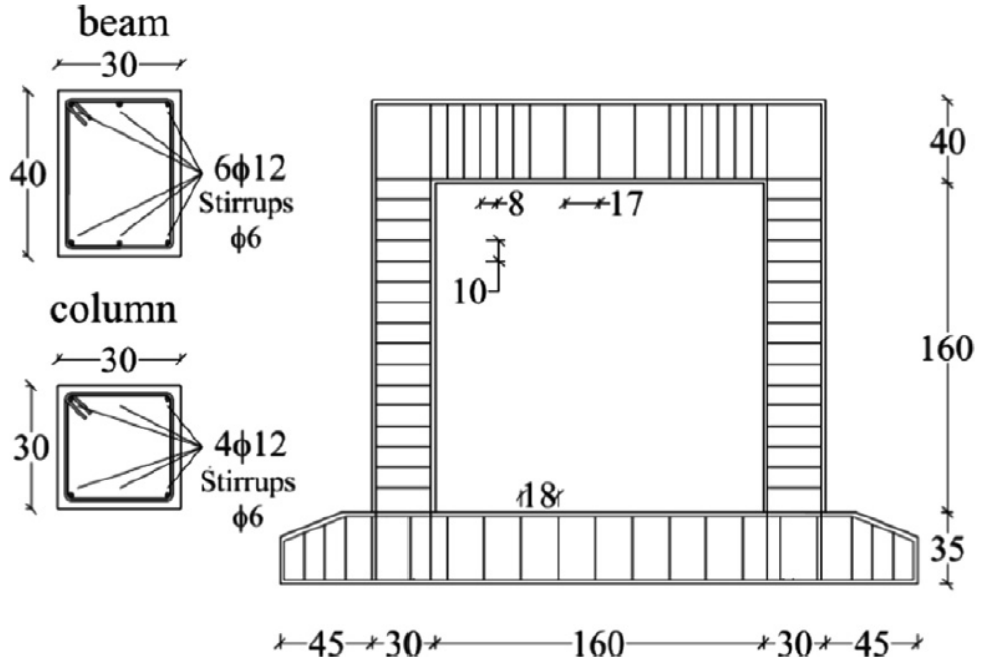
3.1. DENEYSEL DOĞRULAMALARDA KULLANILAN DOLGU DUVARLAR

Bu çalışmada dolgu duvarların sayısal modellenmesinde kullanılan malzeme özellikleri, Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda test edilen numuneler esas alınarak belirlenmiştir. Söz konusu çalışmada, farklı yığma dolgu duvar tiplerini temsil eden ve deneysel olarak karakterize edilen S1A (kalkerli kum taşı yığma), S1B (kil yığma) ve S1C (hafif beton yığma) numuneleri kullanılmıştır. Bu numunelere ait mekanik özellikler, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modelinin kalibrasyonu için referans alınmış olup, mevcut çalışmada gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik analizlerde doğrudan kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

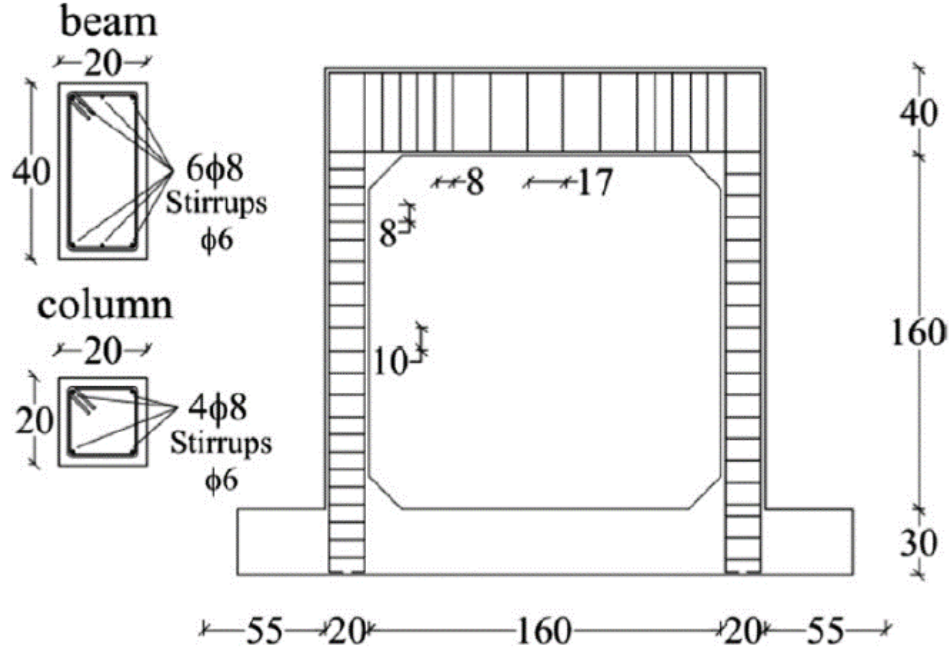
Literatürde, betonarme çerçeveli dolgu duvarlı yapıların çevrimsel davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, farklı mekanik özelliklere sahip dolgu duvar tiplerini temsil eden numuneler kullanılmıştır. Bu kapsamda, tek katlı ve tek açıklıklı, tam dolgu duvarlı betonarme çerçeveler üzerinde yapılan çalışmalarda, literatürde S1A-2 (Şekil 3.1), S1B-1 (Şekil 3.2) ve S1C-2 (Şekil 3.3) olarak adlandırılan üç farklı dolgu duvar numunesi ele alınmıştır. Bu numuneler sırasıyla kalkerli kum taşı yığma (kalker yığma), kil tuğla esaslı yığma (kil yığma) ve hafif beton esaslı yığma (hafif beton yığma) dolgu duvar tiplerini temsil etmekte olup, farklı rijitlik ve dayanım karakteristiklerine sahip geleneksel dolgu duvar uygulamalarını yansıtmaktadır.



Şekil 3.1. S1A-2 dolgu duvar numunesinin geometrik ve donatı detayları (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)



Şekil 3.2. S1B-1 dolgu duvar numunesinin geometrik ve donatı detayları (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)



Şekil 3.3. S1C-2 dolgu duvar numunesinin geometrik ve donatı detayları (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)

Deneylerde kullanılan betonarme çerçeveler, mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan ve yalnızca düşey yükler esas alınarak tasarlanmış tipik sistemleri temsil edecek şekilde düzenlenmiştir. Çerçeve sistemlerde, zayıf kolon–güçlü kiriş davranışını temsil eden geometrik oranlar benimsenmiş olup, açıklık uzunluğu ile kat yüksekliği oranı yaklaşık olarak bire eşittir. Deney numunelerinde kullanılan betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımı 25 MPa, elastisite modülü yaklaşık 25500 MPa olarak belirlenmiş; donatı çeliğinin ortalama akma dayanımı ise 450 MPa olarak rapor edilmiştir.

Deneyler sırasında, her bir kolona sabit aksenal basınç yükü uygulanmış ve bu düşey yükler hidrolik krikolar yardımıyla kontrollü bir şekilde sisteme aktarılmıştır. Düşey yük uygulama düzeneği, yatay yer değiştirmelere izin verecek biçimde düzenlenmiş ve deney süresince aksenal yüklerin sabit kalması sağlanmıştır. Yatay yükler ise çift etkili hidrolik kriko sistemi aracılığıyla uygulanmış; yük–yer değiştirme tepkileri çevrimsel olarak kaydedilmiştir. Deney düzeneği, numunelerin rijit cisim hareketlerini engelleyecek şekilde mesnetlenmiş; tepe noktası yatay yer değiştirmeleri ile taban dönmeleri hassas ölçüm cihazları kullanılarak izlenmiştir.

Bu deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen bulgular, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modeli ile Pivot histeretik modelinin, dolgu duvarlı betonarme çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan histeretik davranışını temsil edebilme yeteneğinin değerlendirilmesinde önemli bir referans oluşturmaktadır. Dolgu duvar numunelerinin tüm mekanik ve elastik özellikleri, Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından rapor edilen deneysel çalışmalardan alınmıştır; bu özellikler Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Dolgu duvarlarda kullanılan yığma malzemenin mekanik özellikleri

Numune Kodu	Dolgu Duvar Türü	f_{v0m} (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	G12 (MPa)	ν_{12}	ν_{21}
S1A-2	Kalkerli kum taşı	0.73	7408	3933	1348	0.22	0.10
S1B-1	Kil	1.07	5038	6401	2547	0.07	0.09
S1C-2	Hafif beton	0.29	1944	4565	2042	0.13	0.22

Bu deneysel numuneler, dolgu duvarların betonarme çerçevelerle etkileşimini ve doğrusal olmayan davranış özelliklerini temsil etme açısından literatürde yaygın olarak referans alınmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu numunelere ait mekanik özelliklerin esas alınması, sayısal modelleme sonuçlarının deneysel olarak doğrulanmış davranışlarla uyumlu olmasını sağlamak ve gerçekleştirilen parametrik analizlerin güvenilirliğini artırmaktadır. Mevcut deneysel sonuçlar ile sayısal modellerin karşılaştırılması bulgular kısmında detaylı olarak tartışılmıştır.

3.2. DOLGU DUVALARIN MODELLENMESİ

Bu çalışmada dolgu duvarların doğru bir şekilde simüle edilmesi için, literatürde deneysel olarak doğrulanmış ve yaygın olarak kabul görmüş çalışmalar esas alınmıştır. Özellikle Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında, farklı dolgu duvar malzeme tiplerine sahip tek katlı ve tek açıklıklı betonarme çerçeve numuneleri üzerinde çevrimsel yükler altında elde edilen sonuçlar, dolgu duvar–çerçeve etkileşiminin doğrusal olmayan davranışını temsil etme açısından güvenilir bir referans oluşturmaktadır. Söz konusu çalışmada, dolgu duvarların eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ile modellenmesi ve Pivot histeretik modeli kullanılarak çevrimsel davranışlarının başarılı bir şekilde simüle edilmesi, bu yaklaşımın doğrusal olmayan statik analizlerde

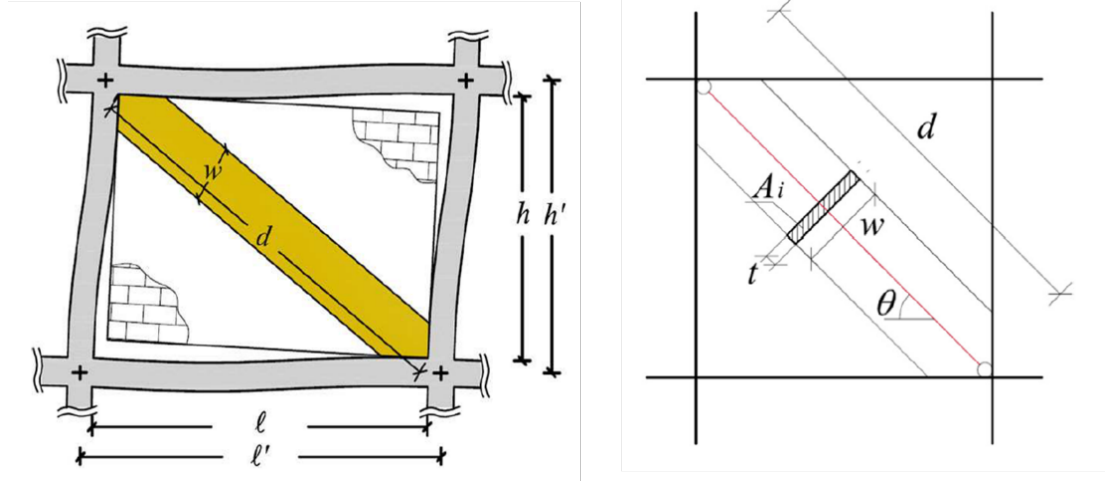
kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Bu nedenle mevcut çalışmada, dolgu duvarların sayısal temsili için Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen eşdeğer diyagonal çubuk modeli ve ilgili mekanik varsayımlar esas alınmıştır.

3.2.1. Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuğu ile modellenmesi

Betonarme çerçeveli yapılarda dolgu duvarların sismik davranış üzerindeki etkisini temsil edebilmek amacıyla, literatürde yaygın olarak eşdeğer diyagonal basınç çubuğu (eşdeğer çubuk) yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, dolgu duvarların deprem etkisi altında esas olarak basınç kuvvetleri taşıdığı ve çekme dayanımının ihmal edilebilir olduğu kabul edilmektedir. Bu nedenle, dolgu duvar panelleri betonarme çerçeve açıklığı boyunca yerleştirilen tek bir diyagonal basınç çubuğu ile temsil edilmekte ve çerçeve–dolgu etkileşimi bu eleman üzerinden modellenmektedir.

Eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun çerçeve içerisindeki konumu ve geometrik tanımları Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde, açıklık uzunluğu (l), kat yüksekliği (h), dolgu duvar kalınlığı (t), eşdeğer çubuk genişliği (w) ve diyagonal çubuğun yatay ile yaptığı açı (θ) tanımlanmaktadır.

Dolgu duvar malzemesinin eşdeğer diyagonal doğrultudaki elastisite modülü (E_d) ve Poisson oranı (ν_d), literatürde önerilen yaklaşımlar doğrultusunda belirlenmektedir. Cavaleri ve Di Trapani (2014)'de sunulan yönteme göre, bu parametreler yığma malzemenin asal doğrultulardaki elastik özellikleri (E_1 , E_2 , G_{12} ve ν_{12}) esas alınarak tanımlanmıştır. Eşdeğer diyagonal doğrultudaki elastisite modülü (E_d) ve Poisson oranı (ν_d), Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen yaklaşım doğrultusunda, Çizelge 3.1'de sunulan E_1 , E_2 , G_{12} ve ν_{12} parametreleri esas alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. Eşdeğer diyagonal tek basınç çubuğunun tanımı ve geometrik karakteristikleri

3.2.2. Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu için Pivot Modeli

Dolgu duvarların eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ile modellenmesinde, çevrimsel doğrusal olmayan davranışın doğru bir şekilde temsil edilmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde, dolgu duvarlara eşdeğer çubuk elemanlarının çevrimsel davranışını tanımlamak amacıyla çeşitli histeretik modeller geliştirilmiştir. Ancak özellikle çok katlı betonarme dolgu duvarlı çerçeve sistemlerinin doğrusal olmayan analizlerinde, sınırlı sayıda parametreye sahip, hesap yükü düşük ve aynı zamanda yeterli doğruluk sunan modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu amaçla, Dowell vd., (1998) tarafından ilk olarak betonarme elemanların çevrimsel davranışını tanımlamak için önerilen Pivot histeretik modeli, daha sonra genel kuvvet–yer değiştirme ilişkilerinin temsilinde kullanılabilecek esnek bir araç olarak geliştirilmiştir. Pivot modelinin temel avantajı, yükleme ve boşaltma kısımlarının analitik bağıntılar yerine geometrik kurallar ile tanımlanmasıdır. Bu yaklaşım, hem hesaplama süresini hem de gerekli histeretik parametre sayısını azaltmakta, aynı zamanda güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Pivot modelinin genel teorik çerçevesi ve yükleme–boşaltma kuralları Cavaleri ve Di Trapani (2014)’te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada, Pivot modeli, dolgu duvarlara eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun çevrimsel doğrusal olmayan davranışını temsil edecek şekilde uyarlanmıştır. Model

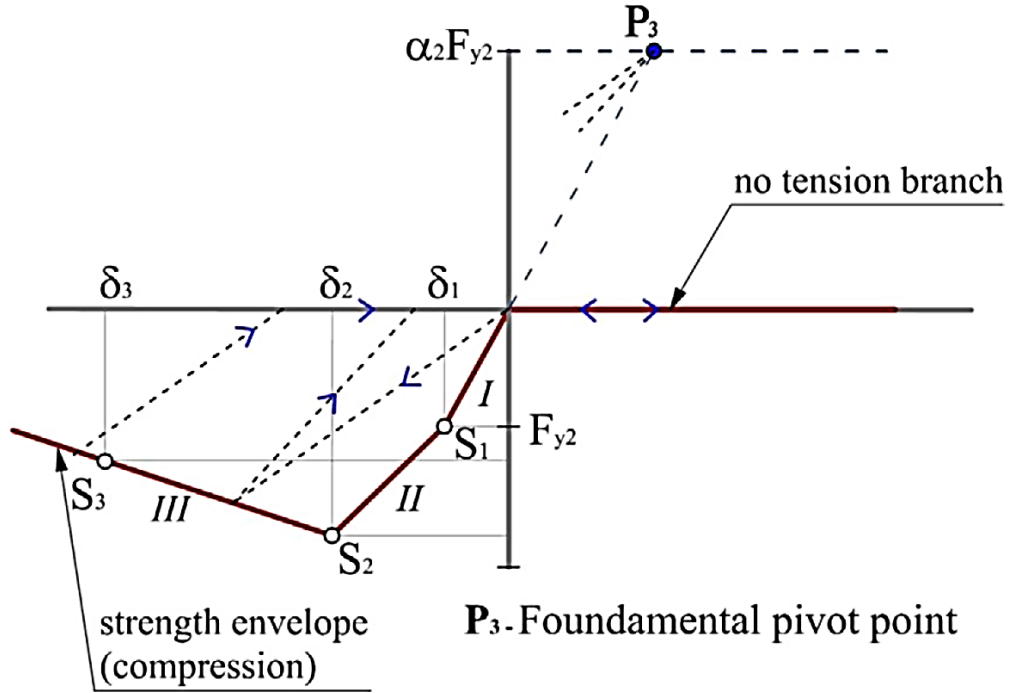
parametreleri literatürde önerilen tanımlar esas alınarak bu çalışmada belirlenmiştir. Model parametreleri Cavalieri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen tanımlar esas alınarak belirlenmiş olup, kullanılan α , β , ζ ve α_2 parametre değerleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Pivot Model Parametreleri

Dolgu Duvar Türü	α	β	ζ	α_2
Kalkerli kum taşı	0.6	0.03	0.022	0.1
Kil	0.02	0.15	0.02	0.25
Hafif beton	0.5	0.02	0.04	0.05

Dolgu duvarlara eşdeğer diyagonal basınç çubuklarının modellenmesi durumunda, Pivot histeretik modeli önemli ölçüde sadeleştirilebilmektedir. Farklı türdeki dolgu panellerini temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubukları, SAP2000 NL yazılımında genel Pivot modeli uygulanmış olan çok doğrusal plastik bağlantı (multilinear plastic link) elemanları aracılığıyla modellenmiştir. Dolgu duvarların çekme dayanımının ihmal edilebilir olduğu ve esas olarak basınç altında çalıştıkları bilinmektedir. Bu nedenle, eşdeğer çubuk elemanları için Pivot modelinde tanımlanan çekme davranışına ait parametreler devre dışı bırakılmakta ve model yalnızca basınç davranışını temsil edecek şekilde uyarlanmaktadır.

Bu sadeleştirme sonucunda, Pivot modelinde yer alan α_1 , β_1 ve β_2 parametreleri sıfır kabul edilmekte, çevrimsel davranış yalnızca α_2 parametresi tarafından kontrol edilmektedir. Modelde, basınç yönündeki temel pivot noktası P3 olup, boşaltma ve yeniden yükleme kısımları bu nokta üzerinden yönlendirilmektedir. Eşdeğer diyagonal çubuk için tanımlanan basınç davranışına özgü pivot histerezis modeli Şekil 3.5’te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Eşdeğer diyagonal çubuk için histeretik pivot davranışının tanımlanması (Cavaleri ve Di Trapani, 2014)

Şekil 3.5'te gösterilen kuvvet–yer değiştirme zarfı, Cavaleri ve Di Trapani (2014)'de tanımlandığı üzere üç doğrusal bir kapasite eğrisi ile temsil edilmektedir. Bu eğride, başlangıç rijitliği (K_1), ikinci kısım rijitliği (K_2), akma dayanımı (S_1), maksimum dayanım (S_2) ve artık dayanım (S_3) aşağıdaki bağıntılar ile tanımlanmaktadır.

İlk rijitlik (I. Kısım) şu şekilde tanımlanmıştır;

$$K_1 = \frac{E_d t_w}{d} \quad (1)$$

II. Kısım'daki rijitlik, β parametresiyle şu şekilde ilişkilendirilmiştir;

$$K_2 = \beta K_1 \quad (2)$$

Tepe dayanımı S_2 atandıktan sonra, akma dayanımı S_1 , α parametresi aracılığıyla şu şekilde tanımlanmıştır;

$$S_1 = \alpha S_2 \quad (3)$$

Bu nedenle akma ve tepe yer değiştirmeleri doğrudan aşağıdaki bağıntılar kullanılarak belirlenmiştir.

$$\delta_1 = \frac{S_1}{K_1} \quad (4)$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{S_2 - S_1}{K_2} \quad (5)$$

Yumuşama kısmı, $S_3=0.7S_2$ olması nedeniyle $S_2-\delta_2$ ve $S_3-\delta_3$ noktalarının birleştirilmesiyle (Kısım III) doğrusal hale getirilmiştir ve δ_3 aşağıdaki ifade ile elde edilmiştir.

$$\delta_3 = \frac{1}{\zeta} \ln \left[\frac{S_2}{S_3} \exp(\zeta \delta_2) \right] \quad (6)$$

Zarf eğrisini karakterize eden α , β ve ζ parametrelerinin kalibrasyonu, test edilen farklı sistem türleri üzerinde yapılan statik itme analizlerinin sonuçları esas alınarak her bir dolgu duvar tipolojisi için gerçekleştirilmiştir. α , β ve ζ parametreleri için seçilen değerler, her bir numune tipolojisi için ortalama deneysel dayanım zarf eğrilerine en iyi uyumu sağlayan değerler olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada modelleme aşamasında eşdeğer diyagonal çubukları ve Pivot histeretik eğrisini temsil etmek amacıyla SAP2000 v25 yazılımında tanımlı link elemanları kullanılmıştır.

Bu modelleme yaklaşımı sayesinde, dolgu duvarlara ait geometrik ve mekanik parametrelerdeki değişimlerin betonarme çerçeve sistemlerinin sismik davranışına olan etkileri, doğrusal olmayan statik itme analizleri aracılığıyla kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

3.3. ÜÇ BOYUTLU BİNALARIN MODELLENMESİ

Bu çalışmada betonarme yapıların doğrusal olmayan sismik davranışının değerlendirilmesi amacıyla, doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem, yapı sisteminin artan yatay yükler altında rijitlik, dayanım ve hasar mekanizmalarının

izlenmesine olanak sağlaması nedeniyle, performansa dayalı deprem mühendisliği çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Birçok çalışmada, doğrusal olmayan statik itme analizlerinin yapı performansının değerlendirilmesinde etkili ve güvenilir sonuçlar sunduğunu vurgulanmıştır (ATC-40, 1996; FEMA-356, 2000; Chopra ve Goel, 2002). Ayrıca, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlere kıyasla daha düşük hesaplama maliyetine sahip olması ve parametrik çalışmalar için elverişli bir yaklaşım sunması, bu analiz yönteminin seçilmesinde belirleyici olmuştur.

Sayısal analizler, gelişmiş doğrusal olmayan statik itme analizi kabiliyetlerine sahip olan SAP2000 v25 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SAP2000 v25 yazılımı, plastik mafsalları tanımları, doğrusal olmayan eleman davranışları ve histeretik modellerin tanımlanabilmesine imkân vermesi nedeniyle literatürde birçok çalışmada tercih edilmiştir (Computers and Structures Inc., 2016; Sezen ve Moehle, 2004). Bu çalışma kapsamında dolgu duvarların sayısal temsili için eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modeli kullanılmış olup, söz konusu model Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar temel alınarak tanımlanmıştır. Dolgu duvarların çevrimsel davranışının modellenmesinde ise, deneysel davranışı başarılı bir şekilde temsil edebildiği literatürde gösterilen Pivot histeretik modeli kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, dolgu duvar-çerçeve etkileşimi doğrusal olmayan statik analiz çerçevesinde gerçekçi bir biçimde temsil edilebilmiştir.

3.3.1. Modelleme ve Sayısal Analiz Yöntemi

Bu çalışmada, dolgu duvarlı betonarme çerçeve yapıların doğrusal olmayan sismik davranışını incelemek amacıyla üç boyutlu (3D) sayısal modeller oluşturulmuştur. Sayısal analizler, betonarme yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan ve literatürde güvenilirliği çok sayıda çalışma ile doğrulanmış olan SAP2000 v25 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Mert, 2015; Computers and Structures, 2022).

Oluşturulan tüm yapı modelleri, taşıyıcı sistem davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi amacıyla üç boyutlu olarak modellenmiş ve analizler her bir yapı için X ve Y doğrultularında ayrı uygulanmıştır. Bu yaklaşım, özellikle dolgu duvarların yapı davranışı

üzerindeki etkisinin ve doğrultuya bağlı rijitlik değişimlerinin değerlendirilmesi açısından literatürde önerilen bir yöntemdir (Dolšek ve Fajfar, 2008; Akyürek vd., 2018).

3.3.2. Betonarme Çerçeve Elemanlarının Modellenmesi

Sayısal modellerde betonarme kolon ve kiriş elemanları çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kiriş–kolon birleşim bölgeleri yarı rijit (semi-rigid) olarak tanımlanmıştır. Betonarme çerçeve sisteminin doğrusal olmayan davranışının temsil edilebilmesi amacıyla, kolon uçlarında aksenal yük–moment ve kiriş uçlarında moment etkileşimini dikkate alan plastik mafsallar tanımlanmıştır.

Plastik mafsalları, betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışını yeterli doğrulukla temsil edebilen performans esaslı yaklaşımlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir (ATC-40, 1996; FEMA 356, 2000). Bununla birlikte, mafsal parametrelerinin belirlenmesinde etkin eğilme rijitliği ve akma dönmesi değerleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) hükümleri esas alınarak hesaplanmıştır.

TBDY-2018'e göre doğrusal olmayan analizlerde kullanılacak etkin eğilme rijitliği aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmaktadır:

$$(EI)_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y} \frac{1}{3} \quad (7)$$

Burada M_y etkin akmayı L_s kesme açıklığını ve θ_y akma dönmesini ifade etmektedir. Akma dönmesi θ_y ise TBDY-2018'de verilen aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015 \eta \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\phi_y d_b f_{ye}}{8 \sqrt{f_{ce}}} \quad (8)$$

Yukarıdaki bağıntıda ϕ_y etkin akma eğriliğini, η katsayısını (kolon ve kirişler için 1.0, perde duvarlar için 0.5), d_b boyuna donatıların ortalama çapını, h kesit yüksekliğini, f_{ye} donatı çeliğinin akma dayanımını ve f_{ce} beton basınç dayanımını ifade etmektedir.

Tüm taşıyıcı elemanlara ait moment–eğrilik ilişkileri hesaplanmış ve yukarıdaki bağıntılar kullanılarak elde edilen akma momenti, akma dönmesi ve etkin rijitlik değerleri

plastik mafsal tanımlamalarında esas alınmıştır. Böylece plastik mafsal parametreleri yönetmelik esaslı olarak belirlenmiş ve doğrusal olmayan itme analizlerinde bu değerler kullanılmıştır.

Bu çalışmada, çerçeve elemanlarının kesme kapasitelerinin yeterli olduğu varsayılmış ve doğrusal olmayan davranışın esas olarak eğilme etkileri altında geliştiği kabul edilmiştir. Bu varsayım, dolgu duvarlı betonarme çerçeveler üzerinde gerçekleştirilen birçok deneysel ve sayısal çalışmada da benimsenmiştir (Chrysostomou vd., 2013; Morfidis ve Kostinakis, 2016).

3.3.3. Dolgu Duvarlarının Sayısal Modeli

Dolgu duvarların betonarme çerçeve sistemi üzerindeki etkisini sayısal olarak temsil edebilmek amacıyla, bu çalışmada eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yaklaşımı benimsenmiştir. Literatürde yaygın olarak kabul edildiği üzere, dolgu duvarlar deprem etkisi altında esas olarak basınç kuvvetleri taşımakta olup, çekme dayanımları ihmal edilebilir düzeydedir (Stafford Smith, 1966; Chrysostomou ve Asteris, 2012). Bu nedenle, her bir dolgu duvar paneli betonarme çerçeve açıklığı boyunca yerleştirilen tek bir diyagonal basınç elemanı ile temsil edilmiştir.

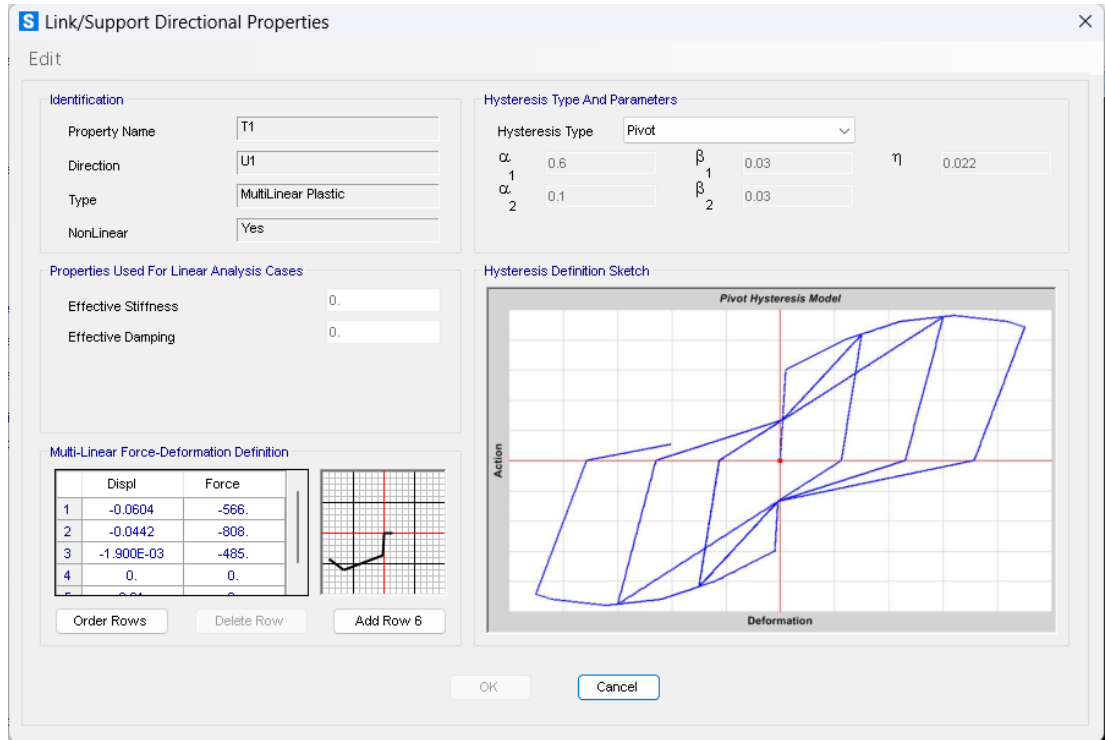
Eşdeğer diyagonal basınç çubuğu elemanları, SAP2000 v25 yazılımında doğrusal olmayan davranışı tanımlamaya olanak sağlayan çok doğrulu plastik bağlantı elemanı (multilinear plastic link element) kullanılarak modellenmiştir. Bu elemanlar, yalnızca basınç doğrultusunda çalışacak şekilde tanımlanmış ve dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin çevrimsel doğrusal olmayan davranışı, Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen Pivot histeretik modeli (Pivot hysteretic model) aracılığıyla temsil edilmiştir (Şekil 3.6).

Pivot histeretik modeli, sınırlı sayıda parametre ile dolgu duvarlı sistemlerin çevrimsel kuvvet-yer değiştirme davranışını güvenilir bir şekilde tanımlayabilmesi nedeniyle literatürde sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu için kullanılan Pivot modeli, SAP2000 v25 yazılımında link elemanı tanımı içerisinde doğrudan uygulanmış; histeretik davranışı tanımlayan α , β ve ζ parametreleri Cavaleri ve Di Trapani (2014)'te önerilen

çerçeve doğrultusunda belirlenmiştir.

SAP2000 v25 yazılımında tanımlanan eşdeğer diyagonal basınç çubuğuna ait link elemanı özellikleri, doğrultu tanımı, doğrusal olmayan davranış seçimi ve Pivot histerezis parametreleri Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Şekilde, link elemanının çok doğrulu plastik davranışa sahip olduğu, pivot histeretik modelinin aktif edildiği ve kuvvet–yer değiştirme ilişkilerinin bu model aracılığıyla tanımlandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.6. SAP2000 v25 yazılımında eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun çok doğrulu plastik link elemanı ve Pivot histeretik modeli kullanılarak tanımlanması

3.3.4. Mesnet Koşulları ve Düşey Yüklerin Tanımı

Tüm yapı modellerinde temel mesnet koşulları ankastre olarak kabul edilmiştir. Bu varsayım, yapı–zemin etkileşiminin ihmal edildiği ve taşıyıcı sistem davranışının ön plana çıkarılmasının amaçlandığı benzer çalışmalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır (Sağlıyan, 2018; Bal, 2018).

Yapılara etki eden düşey yükler, yapıların kendi ağırlıkları ile birlikte dolgu duvar

ağırlıkları da dikkate alınarak modele dahil edilmiştir. Bu yaklaşım, dolgu duvarların çerçeve elemanları üzerinde oluşturduğu ön basınç etkisinin ve buna bağlı rijitlik değişimlerinin doğru bir şekilde temsil edilebilmesi açısından önemlidir (Dolšek ve Fajfar, 2008; Cavaleri ve Di Trapani, 2014).

3.3.5. Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi (NSA) Yöntemi

Bu çalışmada, betonarme dolgu duvarlı yapıların sismik kapasitesini belirlemek amacıyla doğrusal olmayan statik itme analizi (NSA – Nonlinear Static Analysis), diğer adıyla itme analizi (pushover analysis), uygulanmıştır. Analizler, tanımlanan üç farklı yapı modeli (B1, B2 ve B3) üzerinde, her bir yapı için oluşturulan parametre kombinasyonları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, dolgu duvarlara ait geometrik ve malzeme parametrelerindeki değişimlerin taşıyıcı sistemin kapasite eğrileri üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Dolgu duvarlar, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yaklaşımı kullanılarak modellenmiş olup, bu elemanların yalnızca basınç kuvveti taşıdığı ve çekme kapasitesinin sıfır olduğu kabul edilmiştir. Eşdeğer diyagonal çubuklar, yükleme yönüne ters yönde yerleştirilmiş ve her bir çubuğun geometrik özellikleri ile eksenel taşıma kapasiteleri, Bölüm 3.2.2’de tanımlanan bağıntılar esas alınarak belirlenmiştir. Özellikle kat yüksekliği ve açıklık uzunluğunun farklılık gösterdiği durumlarda, her bir diyagonal çubuk için kapasite değerleri ayrı hesaplanmıştır.

Eşdeğer diyagonal çubukların eksenel yük–yer değiştirme davranışı, yığılı plastisite yaklaşımı ile temsil edilmiş ve doğrusal olmayan davranış, çubuğun orta noktasına tanımlanan çok doğrulu plastik link elemanları (multilinear plastic link elements) aracılığıyla modellenmiştir. Bu link elemanlarında, Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen Pivot histeretik modeli kullanılmıştır.

Betonarme çerçeve elemanlarında doğrusal olmayan davranışın modellenmesi amacıyla, kolon ve kiriş uçlarında plastik mafsallar tanımlanmıştır. Kirişlerde yalnızca eğilme etkisini temsil eden moment–dönme ilişkileri esas alınırken, kolonlarda eksenel yük–iki eksenli eğilme etkileşimini dikkate alan P–M2–M3 etkileşimli plastik mafsallar kullanılmıştır. Plastik mafsal özellikleri, ilgili yönetmeliklerde önerilen performans esaslı

yaklaşımlar doğrultusunda tanımlanmıştır (FEMA 356, 2000; ASCE 41-17).

Üçüncü yapı modelinde (B3), taşıyıcı sistemde yer alan perde duvarlar doğrusal olmayan fiber elemanlar (nonlinear layered shell elements) kullanılarak modellenmiştir. Bu elemanlarda, betonun düzlem içi ve düzlem dışı davranışını ve donatı tabakalarını temsil edecek şekilde çok katmanlı kesit tanımlanmıştır. Perde duvarlara ait tüm mekanik özellikler ve yükleme koşulları, diğer analizler ile tutarlı olacak biçimde tanımlanmıştır.

Analizlerde doğrusal olmayan geometrik davranış, SAP2000 v25 yazılımında P-Delta etkisi dikkate alınarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan statik itme analizleri, yer değiştirme kontrollü olarak uygulanmış ve her bir yapı modeli için X ve Y doğrultularında bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, farklı yönlerdeki sismik taleplerin yapı davranışı üzerindeki etkileri ayrı değerlendirilmiştir.

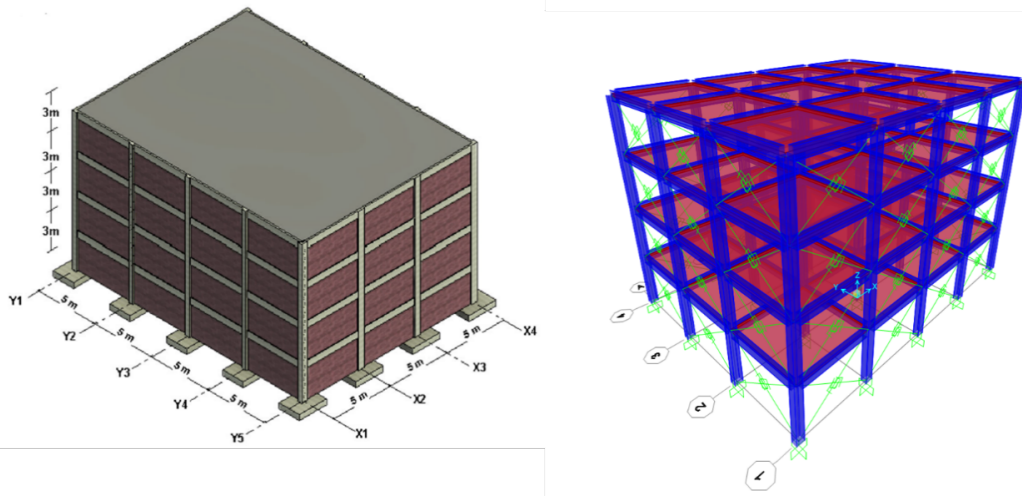
3.3.6. Bina Modelleri

Bu çalışmada kullanılan betonarme yapı modellerinin genel geometrik düzeni ve taşıyıcı sistem konfigürasyonları, literatürde dolgu duvarların betonarme yapılar üzerindeki etkisini inceleyen ve mevcut yapı stokunu temsil etme kabiliyeti yüksek olan sayısal modelleme çalışmalarından yararlanılarak oluşturulmuştur. Özellikle, yapı modellerinin kat düzeni, plan geometrisi ve taşıyıcı sistem organizasyonu açısından Alhalil ve Güllü (2023) tarafından önerilen üç boyutlu betonarme yapı modelleri referans alınmıştır. Bununla birlikte, mevcut çalışmada söz konusu yapı modelleri doğrusal olmayan statik itme analizi kapsamında yeniden modellenmiş ve dolgu duvarlara ait farklı parametrik değişkenler dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

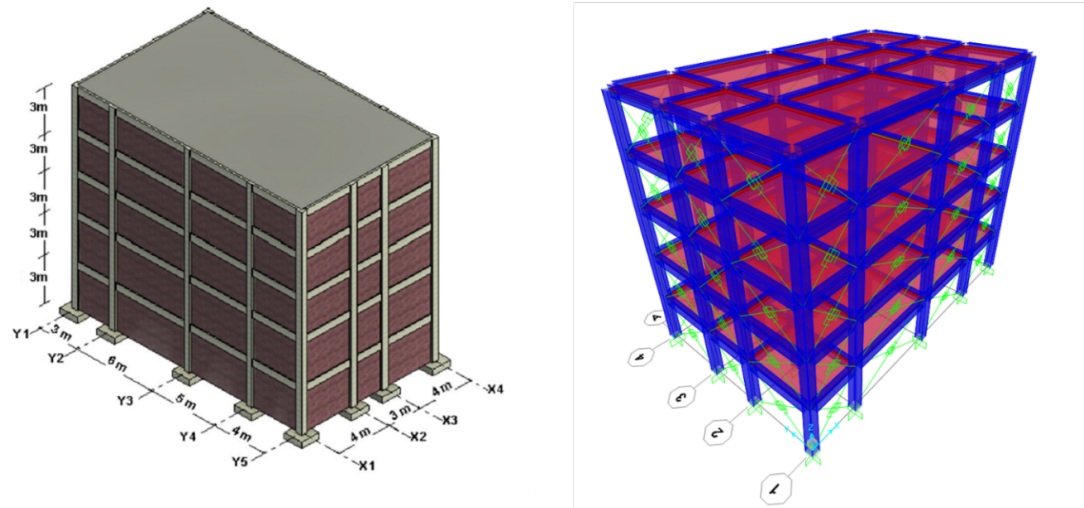
Bu kapsamda üç farklı betonarme yapı modeli tanımlanmıştır. Birinci yapı modeli (B1), yalnızca betonarme çerçeve sistemden oluşan ve plan düzleminde simetrik açıklık düzenine sahip bir yapı modelidir. Bu modelde tüm açıklık boyutları düzenli olup, sistem yalnızca çerçeve elemanları ile teşkil edilmiştir. İkinci yapı modeli (B2), B1 modeline benzer betonarme çerçeve sistemine sahip olmakla birlikte, kat sayısı artırılmış ve açıklık boyutları değiştirilmiştir. Bu modelde plan düzleminde açıklık oranları farklılık göstermekte olup, sistem davranışının geometri değişimlerine duyarlılığı incelenmiştir. Üçüncü yapı modeli (B3) ise yedi katlı olarak tanımlanmış ve betonarme çerçeve sistemine ek olarak perde

duvarlar içerecek şekilde modellenmiştir. Bu modelde, çerçeve–perde etkileşiminin ve dolgu duvar katkısının doğrusal olmayan sismik davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

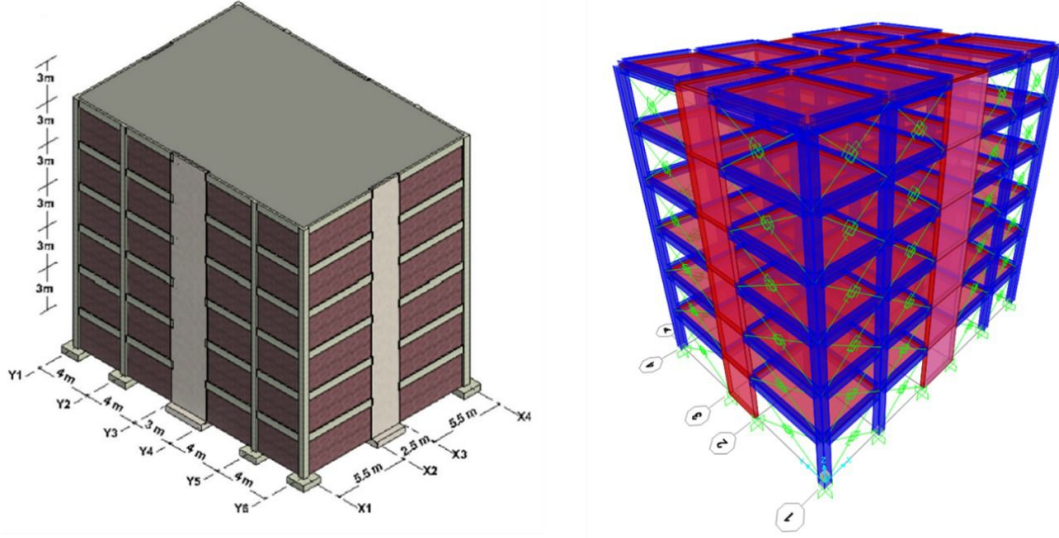
Tanımlanan yapı modellerine ait tipik kat planları ve üç boyutlu genel görünüm, taşıyıcı sistem düzeninin ve dolgu duvar yerleşimlerinin daha net anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da sunulmuştur. Söz konusu şekiller, Alhalil ve Güllü (2023)’te sunulan yapı modelleri esas alınarak hazırlanmış ve mevcut çalışmanın analiz kapsamına uygun şekilde uyarlanmıştır. Ayrıca binalarda tanımlanan betonarme perde, kolon ve kiriş elemanlarına ait donatı detayları Şekil 3.10’da sunulmuştur.



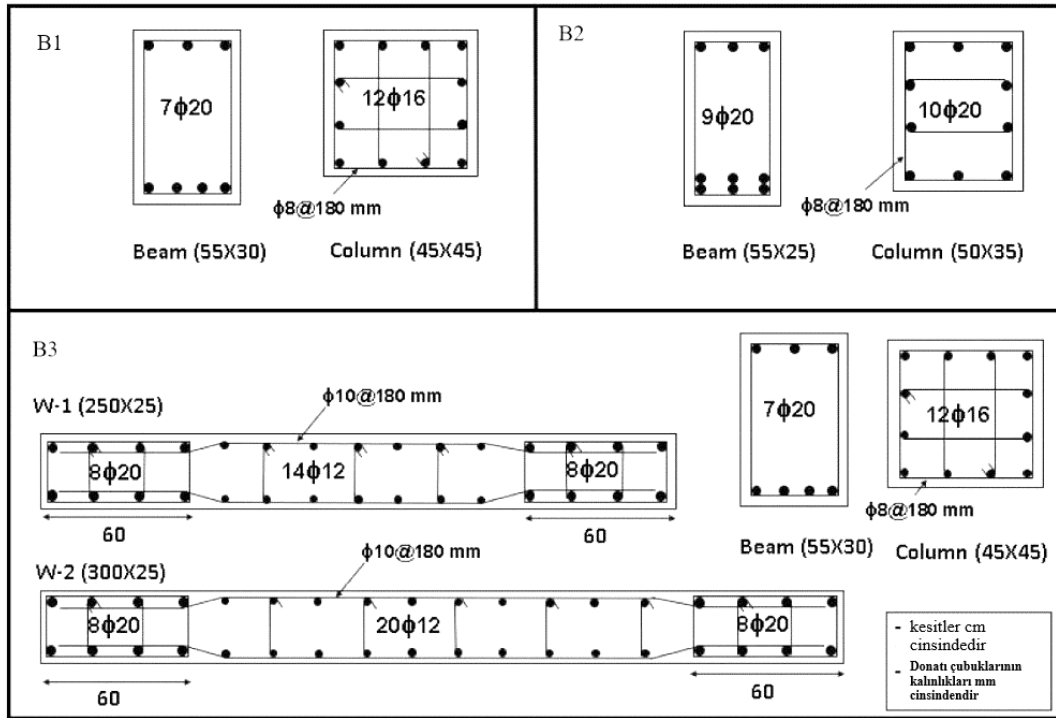
Şekil 3.7. B1 binası SAP2000 v25 3-D görüntüsü (Alhalil ve Güllü, 2023)



Şekil 3.8. B2 binası SAP2000 v25 3-D görüntüsü (Alhalil ve Güllü, 2023)



Şekil 3.9. B3 binası SAP2000 v25 3-D görüntüsü (Alhalil ve Güllü, 2023)



Şekil 3.10. B1, B2 ve B3 binalarına ait taşıyıcı elemanların kesitleri ve donatı detayları (kesit ölçüleri cm cinsindedir) (Alhalil ve Güllü, 2023)

Bu çalışmanın temel amacı, yapı geometrisinden bağımsız olarak dolgu duvarlara ait geometrik ve malzeme parametrelerinin betonarme yapıların doğrusal olmayan sismik

davranışı üzerindeki etkisini incelemek olduğundan, dolgu duvarlar her üç yapı modelinde de yalnızca bina çevresinde yerleştirilmiştir. Bu tercih, parametrik değişkenlerin yapı davranışı üzerindeki etkilerinin daha net gözlemlenebilmesi amacıyla yapılmış olup, benzer yaklaşımlar parametrik analiz çalışmalarında literatürde de yaygın olarak önerilmektedir.

Parametrik analizlerde, kat yüksekliği, dolgu duvar kalınlığı ve dolgu duvar malzeme türü temel değişkenler olarak ele alınmıştır. Her bir yapı modeli ve parametre kombinasyonu, yapı tipi, kat yüksekliği, dolgu duvar malzeme türü ve dolgu duvar kalınlığını içeren sistematik bir kodlama yapısı ile tanımlanmıştır. Bu kodlama sistemi sayesinde, doğrusal olmayan statik itme analizlerinden elde edilen sonuçlar, ilgili parametrik değişkenlerle doğrudan ilişkilendirilebilmiştir.

3.3.7. Parametrik Analizlerin Kodlama Sistemi

Bu çalışmada gerçekleştirilen parametrik analizlerde kullanılan model kombinasyonlarının açık ve sistematik bir biçimde ifade edilebilmesi amacıyla bir kodlama sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem, her bir analiz modeline ait değişken parametrelerin tek bir ifade içerisinde tanımlanmasını sağlamaktadır.

Kodlama sisteminde yer alan B1, B2 ve B3 ifadeleri, çalışmada tanımlanan birinci, ikinci ve üçüncü yapı modellerini göstermektedir. Bu ifadeler herhangi bir yapı türü sınıflandırmasını değil, yalnızca analiz kapsamında oluşturulan modellerin sıralı adlandırılmasını temsil etmektedir.

Bu sistemde yer alan H harfi kat yüksekliğini (m), W harfi dolgu duvar malzeme türünü ve T harfi dolgu duvar kalınlığını (cm) ifade etmektedir.

Dolgu duvar malzeme türleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- W1: Kalkerli kum taşı yığma dolgulu duvar
- W2: Kil dolgulu duvar
- W3: Hafif beton dolgulu duvar

Bu malzemeler farklı mekanik özelliklere (basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi) sahip olup parametrik analiz kapsamında ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Örnek olarak, B1H3W1T15 kodu; birinci yapı modeli için, kat yüksekliği 3 m olan,

W1 malzeme türünde ve 15 cm kalınlığında dolgu duvara sahip analiz modelini ifade etmektedir. Bu çalışmada analiz edilen tüm model kombinasyonları ve kod karşılıkları her bir bina türü için Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. B1 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları

Model Kodu	Kat Yüksekliği (m)	Dolgu Duvar Türü	Duvar Kalınlığı (cm)
B1H3	3.0	-	-
B1H3W1T15	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	15
B1H3W1T20	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	20
B1H3W1T25	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	25
B1H3W2T15	3.0	Kil	15
B1H3W2T20	3.0	Kil	20
B1H3W2T25	3.0	Kil	25
B1H3W3T15	3.0	Hafif beton	15
B1H3W3T20	3.0	Hafif beton	20
B1H3W3T25	3.0	Hafif beton	25
B1H3.5	3.5	-	-
B1H3.5W1T15	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	15
B1H3.5W1T20	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	20
B1H3.5W1T25	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	25
B1H3.5W2T15	3.5	Kil	15
B1H3.5W2T20	3.5	Kil	20
B1H3.5W2T25	3.5	Kil	25
B1H3.5W3T15	3.5	Hafif beton	15
B1H3.5W3T20	3.5	Hafif beton	20
B1H3.5W3T25	3.5	Hafif beton	25
B1H4	4.0	-	-
B1H4W1T15	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	15
B1H4W1T20	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	20

Çizelge 3.3. B1 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları (devam)

Model Kodu	Kat Yüksekliği (m)	Dolgu Duvar Türü	Duvar Kalınlığı (cm)
B1H4W1T25	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	25
B1H4W2T15	4.0	Kil	15
B1H4W2T20	4.0	Kil	20
B1H4W2T25	4.0	Kil	25
B1H4W3T15	4.0	Hafif beton	15
B1H4W3T20	4.0	Hafif beton	20
B1H4W3T25	4.0	Hafif beton	25

Çizelge 3.4. B2 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları

Model Kodu	Kat Yüksekliği (m)	Dolgu Duvar Türü	Duvar Kalınlığı (cm)
B2H3	3.0	-	-
B2H3W1T15	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	15
B2H3W1T20	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	20
B2H3W1T25	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	25
B2H3W2T15	3.0	Kil	15
B2H3W2T20	3.0	Kil	20
B2H3W2T25	3.0	Kil	25
B2H3W3T15	3.0	Hafif beton	15
B2H3W3T20	3.0	Hafif beton	20
B2H3W3T25	3.0	Hafif beton	25
B2H3.5	3.5	-	-
B2H3.5W1T15	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	15
B2H3.5W1T20	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	20
B2H3.5W1T25	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	25
B2H3.5W2T15	3.5	Kil	15

Çizelge 3.4. B2 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları (devam)

Model Kodu	Kat Yüksekliği (m)	Dolgu Duvar Türü	Duvar Kalınlığı (cm)
B2H3.5W2T20	3.5	Kil	20
B2H3.5W2T25	3.5	Kil	25
B2H3.5W3T15	3.5	Hafif beton	15
B2H3.5W3T20	3.5	Hafif beton	20
B2H3.5W3T25	3.5	Hafif beton	25
B2H4	4.0	-	-
B2H4W1T15	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	15
B2H4W1T20	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	20
B2H4W1T25	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	25
B2H4W2T15	4.0	Kil	15
B2H4W2T20	4.0	Kil	20
B2H4W2T25	4.0	Kil	25
B2H4W3T15	4.0	Hafif beton	15
B2H4W3T20	4.0	Hafif beton	20
B2H4W3T25	4.0	Hafif beton	25

Çizelge 3.5. B3 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları

Model Kodu	Kat Yüksekliği (m)	Dolgu Duvar Türü	Duvar Kalınlığı (cm)
B3H3	3.0	-	-
B3H3W1T15	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	15
B3H3W1T20	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	20
B3H3W1T25	3.0	Kalkerli kum taşı yığma	25
B3H3W2T15	3.0	Kil	15
B3H3W2T20	3.0	Kil	20
B3H3W2T25	3.0	Kil	25

Çizelge 3.5. B3 Yapı Modeli için Parametrik Analiz Model Kodları (devam)

Model Kodu	Kat Yüksekliği (m)	Dolgu Duvar Türü	Duvar Kalınlığı (cm)
B3H3W3T15	3.0	Hafif beton	15
B3H3W3T20	3.0	Hafif beton	20
B3H3W3T25	3.0	Hafif beton	25
B3H3.5	3.5	-	-
B3H3.5W1T15	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	15
B3H3.5W1T20	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	20
B3H3.5W1T25	3.5	Kalkerli kum taşı yığma	25
B3H3.5W2T15	3.5	Kil	15
B3H3.5W2T20	3.5	Kil	20
B3H3.5W2T25	3.5	Kil	25
B3H3.5W3T15	3.5	Hafif beton	15
B3H3.5W3T20	3.5	Hafif beton	20
B3H3.5W3T25	3.5	Hafif beton	25
B3H4	4.0	-	-
B3H4W1T15	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	15
B3H4W1T20	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	20
B3H4W1T25	4.0	Kalkerli kum taşı yığma	25
B3H4W2T15	4.0	Kil	15
B3H4W2T20	4.0	Kil	20
B3H4W2T25	4.0	Kil	25
B3H4W3T15	4.0	Hafif beton	15
B3H4W3T20	4.0	Hafif beton	20
B3H4W3T25	4.0	Hafif beton	25

4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışmanın kapsamında gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizlerinden elde edilen bulgular sistematik bir şekilde sunulmuştur. Öncelikle, dolgu duvarların eşdeğer diyagonal basınç çubuğu ile temsil edildiği modelin geçerliliği, literatürde deneysel olarak test edilmiş referans numuneler üzerinden doğrulanmıştır. Bu doğrulama aşaması, seçilen modelleme yaklaşımının ve kullanılan histeretik bağıntıların, dolgu duvarlı betonarme çerçeve sistemlerin doğrusal olmayan davranışını yeterli doğrulukla temsil edebildiğini göstermek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Model doğrulama aşamasını takiben, çalışmanın ana hedefi doğrultusunda tanımlanan üç farklı betonarme yapı modeli için parametrik analiz sonuçları sunulmuştur. Bu kapsamda, kat yüksekliği, dolgu duvar kalınlığı ve dolgu duvar malzeme türündeki değişimlerin yapıların sismik kapasite eğrileri üzerindeki etkileri X ve Y doğrultularında ayrı değerlendirilmiştir. Elde edilen kapasite eğrileri yardımıyla, dolgu duvar parametrelerinin yapı rijitliği, dayanımı ve yer değiştirme kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

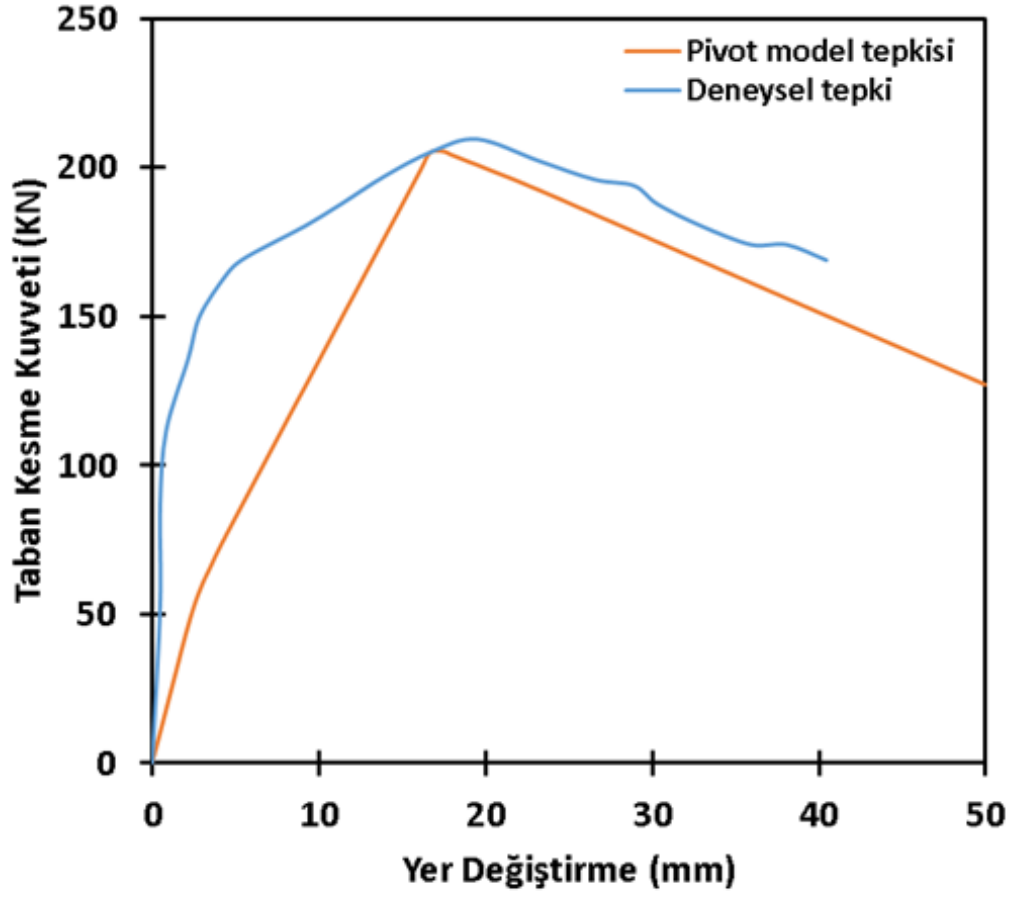
Bu bölümde sunulan bulgular, deneysel verilerle desteklenen literatür çalışmaları ile tutarlı olacak şekilde yorumlanmış; parametrik değişkenlerin yapı davranışı üzerindeki göreceli etkilerinin ortaya konulmasına odaklanılmıştır. Böylece, dolgu duvarların betonarme yapıların sismik performansı üzerindeki rolü, parametrik bir bakış açısıyla kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

4.1. Eşdeğer Diyagonal Basınç Çubuğu Modelinin Doğrulanması

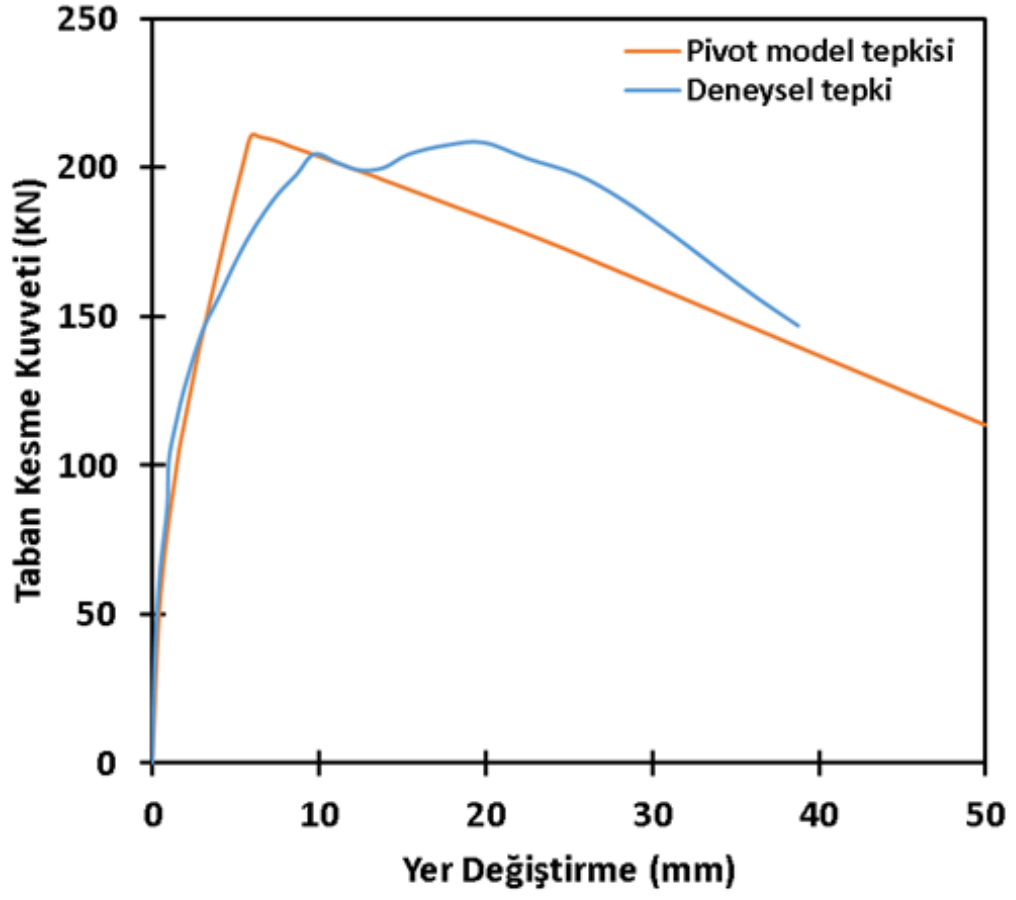
Bu çalışmada kullanılan eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modelinin geçerliliği, parametrik analizlere geçilmeden önce deneysel verilerle doğrulanmıştır. Doğrulama çalışması, Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından gerçekleştirilen ve dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin çevrimsel davranışını inceleyen deneysel kampanyaya dayandırılmıştır. Bu doğrulama aşamasının amacı, çalışmada kullanılan modelleme yaklaşımının ve histeretik tanımların, dolgu duvar-çerçeve etkileşimini yeterli doğrulukla temsil edebildiğini göstermektir.

Doğrulama kapsamında, Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından test edilen tek katlı ve tek açıklıklı, tam dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri esas alınmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan üç farklı dolgu duvar tipolojisini temsil eden S1A, S1B ve S1C serilerinden sırasıyla S1A-2 (kalkerli kum taşı dolgu duvar), S1B-1 (kil dolgu duvar) ve S1C-2 (hafif beton dolgu duvar) numuneleri referans alınmıştır. Bu numunelere ait deneysel kapasite eğrileri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Bu numuneler, farklı rijitlik ve dayanım özelliklerine sahip dolgu duvarların betonarme çerçeve davranışı üzerindeki etkisini temsil edecek şekilde seçilmiştir.

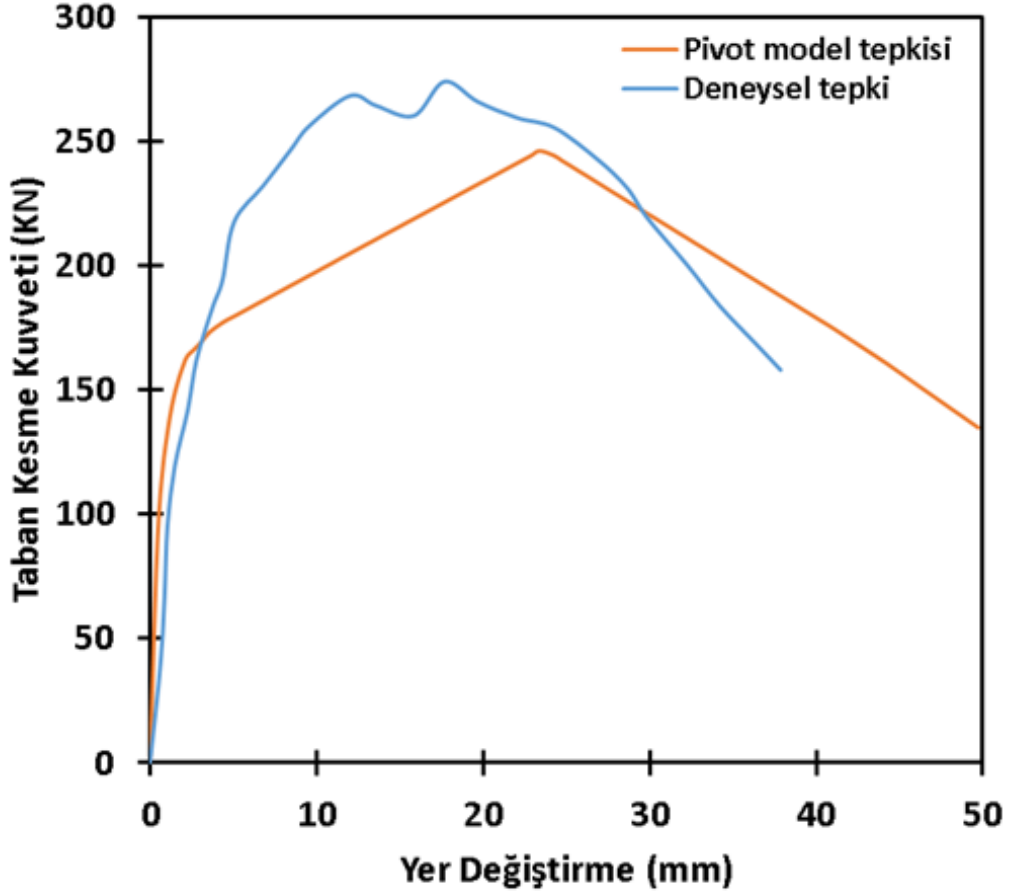
Sayısal doğrulama sürecinde, her bir referans numune için SAP2000 v25 yazılımı kullanılarak iki boyutlu betonarme çerçeve modelleri oluşturulmuştur. Çerçeve elemanları çubuk elemanlar ile modellenmiş, dolgu duvarlar ise eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yaklaşımı kullanılarak temsil edilmiştir. Bu temsil, SAP2000 NL yazılımında tanımlanan link elemanları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Eşdeğer diyagonal çubuğun konumu, geometrik özellikleri ve kuvvet–yer değiştirme ilişkileri Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen model esas alınarak belirlenmiştir. Link elemanlarının mekanik davranışı çok doğrulu bir zarf eğrisi ile tanımlanmış ve çevrimsel davranış Pivot histeretik modeli kullanılarak temsil edilmiştir.



Şekil 4.1. Kalkerli kum taşı dolgulu (S1A-2) numune için deneysel ve sayısal kapasite eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.2. Kil dolgulu (S1B-1) numune için deneysel ve sayısal kapasite eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.3. Hafif beton dolgulu (S1C-2) numune için deneysel ve sayısal kapasite eğrilerinin karşılaştırılması

Karşılaştırma sonuçları sayısal analizlerden elde edilen kapasite eğrilerinin deneysel eğriler ile genel eğilim ve büyüklük açısından uyumlu olduğunu göstermiştir. Özellikle başlangıç rijitliği ve maksimum taban kesme kuvveti değerleri bakımından elde edilen sonuçlar, eşdeğer diyagonal basınç çubuğu modelinin dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin küresel yatay davranışını temsil etmede yeterli olduğunu ortaya koymaktadır. Gözlenen sınırlı farklılıkların dolgu duvarlarda oluşan karmaşık hasar mekanizmaları ve sadeleştirilmiş model varsayımlarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Bu doğrulama aşaması sonucunda, Cavalieri ve Di Trapani (2014) tarafından önerilen eşdeğer çubuk modeli ve Pivot histerezis yaklaşımının bu çalışmada ele alınan yapı modelleri

ve parametrik analizler için güvenilir bir şekilde kullanılabilceği teyit edilmiştir. Bu nedenle, takip eden bölümlerde sunulan yapı ölçeğindeki parametrik analiz sonuçları, doğrulanmış bu modelleme yaklaşımı esas alınarak elde edilmiştir.

4.2. Kapasite Eğrileri

Bu bölümde, B1, B2 ve B3 yapı modelleri için gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizlerinden elde edilen kapasite eğrileri bütüncül olarak değerlendirilmiştir. Kapasite eğrileri, sistemlerin başlangıç rijitliği, maksimum taban kesme kuvveti ve süneklik davranışı hakkında doğrudan bilgi vermektedir. Eğrilerin başlangıç eğimi sistem rijitliğini temsil ederken, tepe noktası yatay yük taşıma kapasitesini, yumuşama bölgesi ise hasar ilerlemesi ve enerji tüketme kapasitesini göstermektedir.

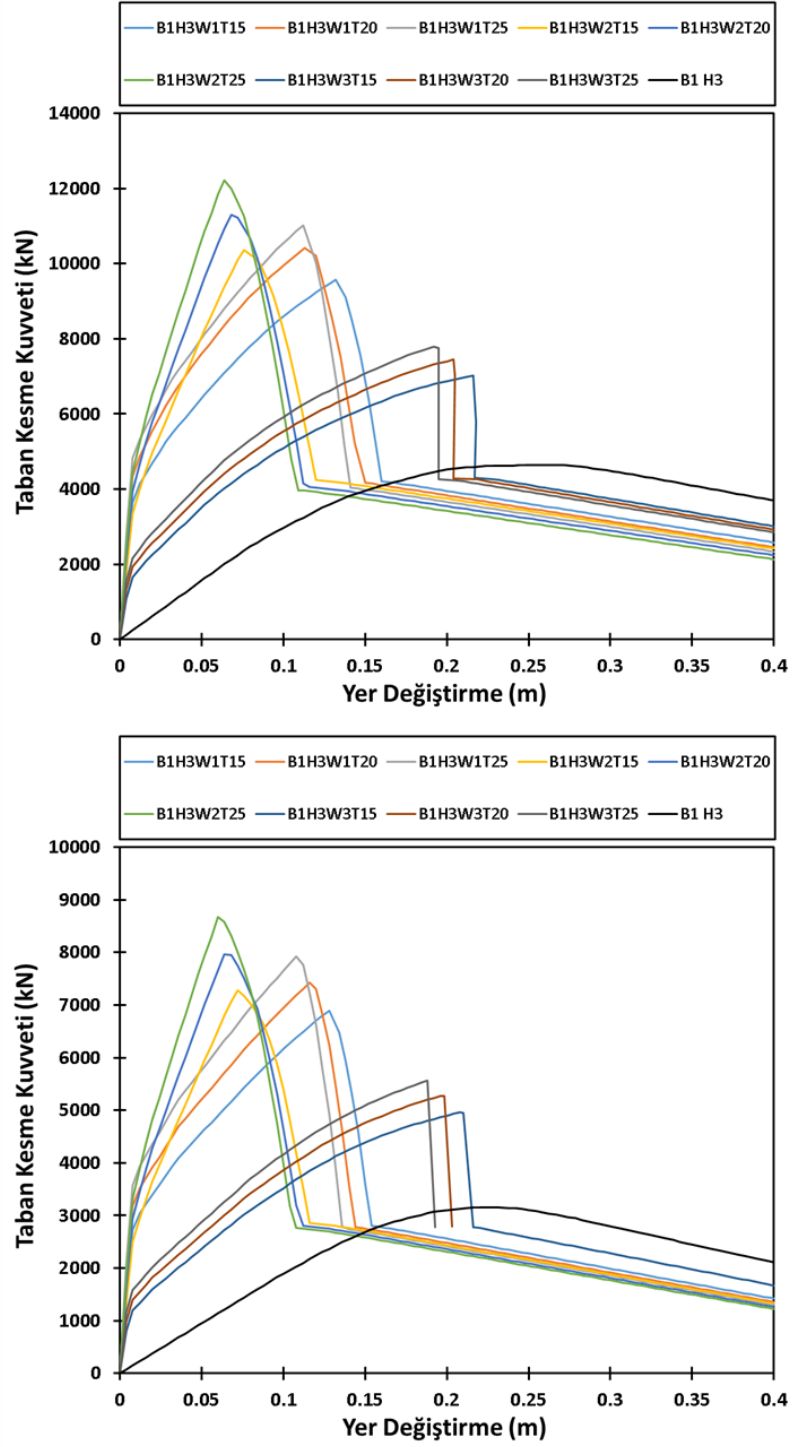
B1 yapı modeli yalnızca betonarme çerçeve sistemden oluştuğu için dolgu duvar parametrelerinin sistem davranışı üzerindeki etkisi açık biçimde gözlenebilmektedir. Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da B1 yapı modeli için sırasıyla $H = 3$ m, $H = 3.5$ m ve $H = 4$ m kat yükseklikleri için elde edilen kapasite eğrileri gösterilmektedir. Kapasite eğrileri incelendiğinde, dolgu duvar malzeme türünün sistem kapasitesi üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. W2 (kil tuğla yığı) malzeme tipine sahip modeller tüm parametre kombinasyonlarında en yüksek maksimum taban kesme kuvvetini sağlamıştır. W1 (kalkerli kumtaşı yığı) ikinci sırada yer alırken, W3 (hafif beton blok yığı) en düşük kapasite değerlerini vermiştir. Bu sıralama, malzemelerin basınç dayanımı ve elastik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Duvar kalınlığının artırılması (T15'ten T25'e) başlangıç rijitliğinde ve maksimum kapasitede sistematik bir artış oluşturmuştur; ancak bu artış doğrusal değildir ve belirli bir kalınlıktan sonra artış oranı azalmaktadır. Kat yüksekliğinin artması (H3'ten H4'e) ise sistem rijitliğini ve maksimum dayanımı azaltmış, yer değiştirme taleplerini artırmıştır. Bu durum, açıklık yüksekliğinin artmasıyla çerçeve davranışının daha esnek hâle gelmesiyle açıklanabilir.

B2 yapı modelinde dolgu duvarların sistem üzerindeki etkisi daha belirgin hâle gelmiştir. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da B2 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde elde edilen kapasite eğrileri sunulmaktadır. Kapasite eğrileri, özellikle W2 malzeme tipi ve T25 kalınlığı kombinasyonunda başlangıç rijitliğinin ve maksimum taban kesme kuvvetinin

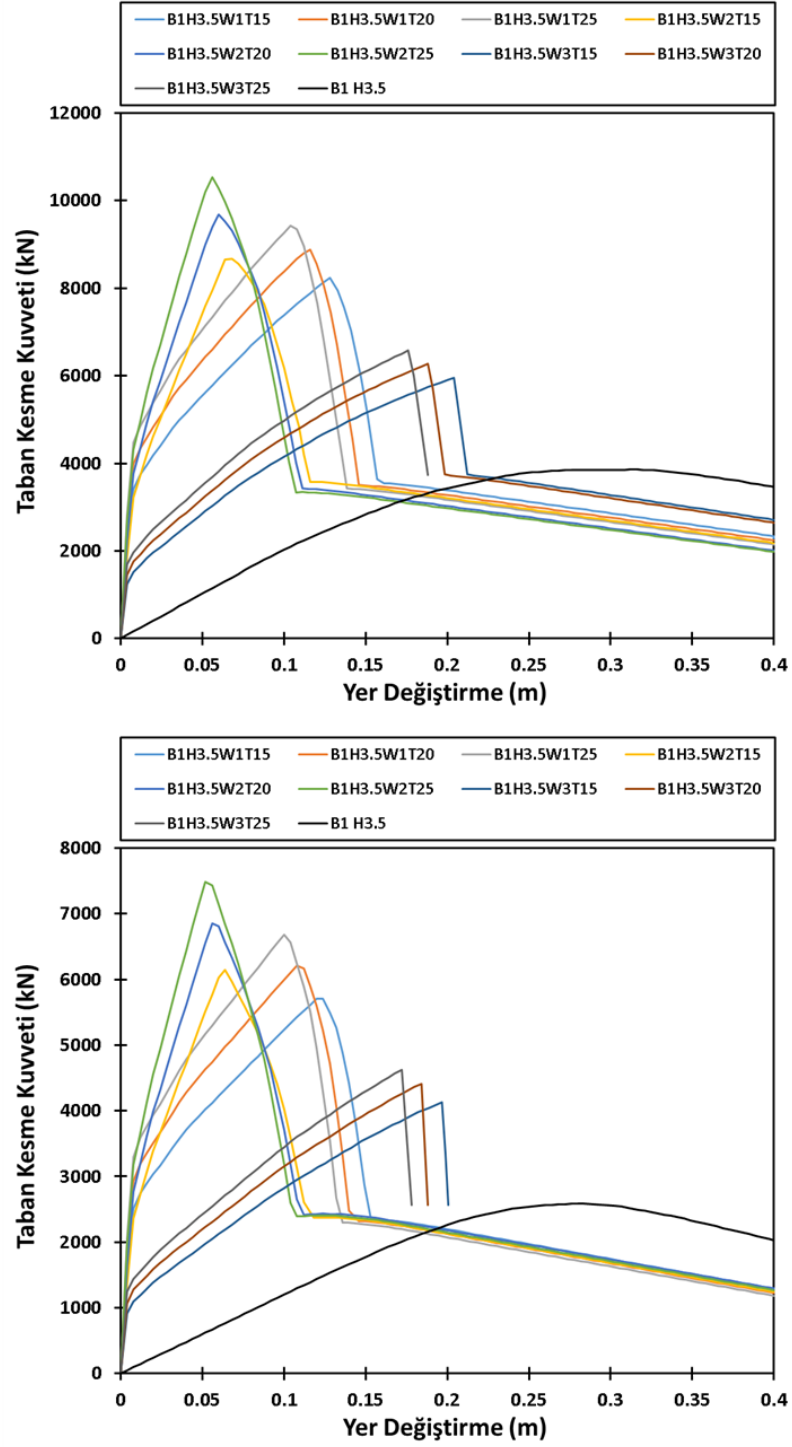
önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bu modelde malzeme türünün etkisi B1'e kıyasla daha güçlüdür. Duvar kalınlığındaki artışın kapasite üzerindeki katkısı da daha belirgin olup, güçlü malzemelerin kalınlık artışından daha etkin biçimde faydalandığı gözlenmiştir. Kat yüksekliğinin artışı B2 modelinde kapasite azalmasına daha duyarlı bir sonuç üretmiş ve özellikle H4 durumunda sistem rijitliğinin belirgin biçimde düştüğü görülmüştür. Bu bulgular, dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin yapı geometrisi ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

B3 yapı modelinde ise sistem davranışı büyük ölçüde perde duvarı tarafından belirlenmektedir. Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de B3 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde elde edilen kapasite eğrileri gösterilmektedir. Kapasite eğrilerinin başlangıç eğiminin oldukça yüksek olduğu ve sistem rijitliğinin baskın olarak perde duvar katkısıyla oluştuğu görülmektedir. Dolgu duvar malzeme türleri arasında dayanım bakımından benzer bir sıralama korunmuş olup, en yüksek kapasite değerleri W2 malzemesinde, ardından W1 malzemesinde elde edilmiş, en düşük değerler ise W3 malzemesinde gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu kapasite farklarının B1 ve B2 yapı modellerine kıyasla daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Duvar kalınlığının artırılması sistem kapasitesini artırmakla birlikte, artış oranı diğer modellere göre daha düşüktür. Kat yüksekliğinin artışı B3 modelinde kapasiteyi azaltmakla birlikte, bu azalma daha sınırlı kalmıştır. Bu durum, perde duvarların sistem davranışı üzerindeki baskın rolü ile açıklanabilir.

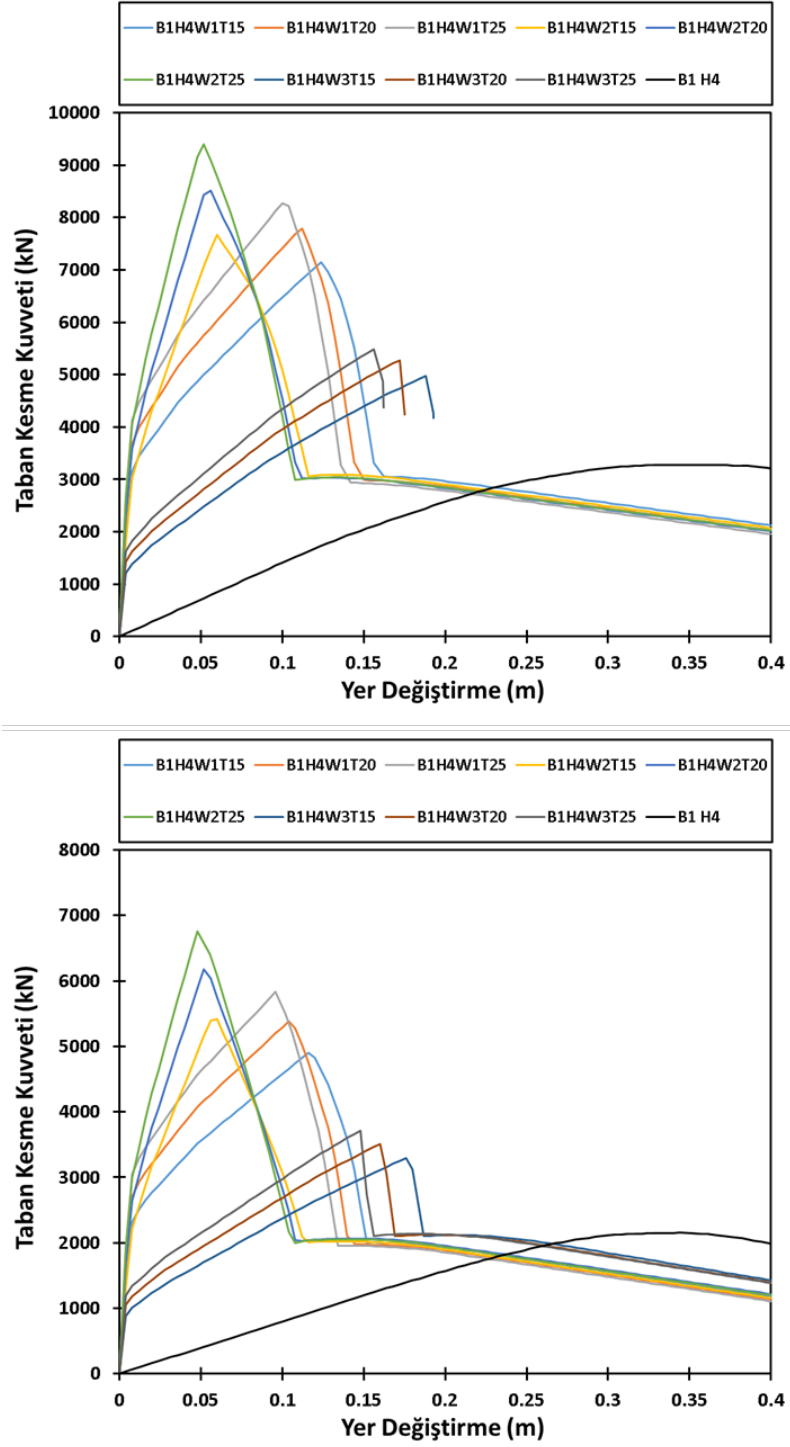
Genel olarak değerlendirildiğinde, dolgu duvar parametrelerinin yapı davranışı üzerindeki etkisinin taşıyıcı sistem tipine bağlı olarak değiştiği açıkça görülmektedir. Çerçeve sistemlerde (B1 ve B2) dolgu duvarın malzeme türü ve kalınlığı kapasite ve rijitlik üzerinde belirleyici olurken, perde duvar içeren sistemlerde (B3) bu etki ikinci planda kalmaktadır. Maksimum taban kesme kuvveti ve başlangıç rijitliği artışı genellikle süneklik azalması ile birlikte gerçekleşmiştir; özellikle W2 malzemesi yüksek dayanım sağlarken daha sınırlı süneklik göstermiştir. Buna karşılık W3 malzemesi daha düşük dayanım üretmesine rağmen daha sünek bir davranış sergilemiştir. Bu sonuçlar, dayanım-süneklik dengesi açısından dolgu duvar özelliklerinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



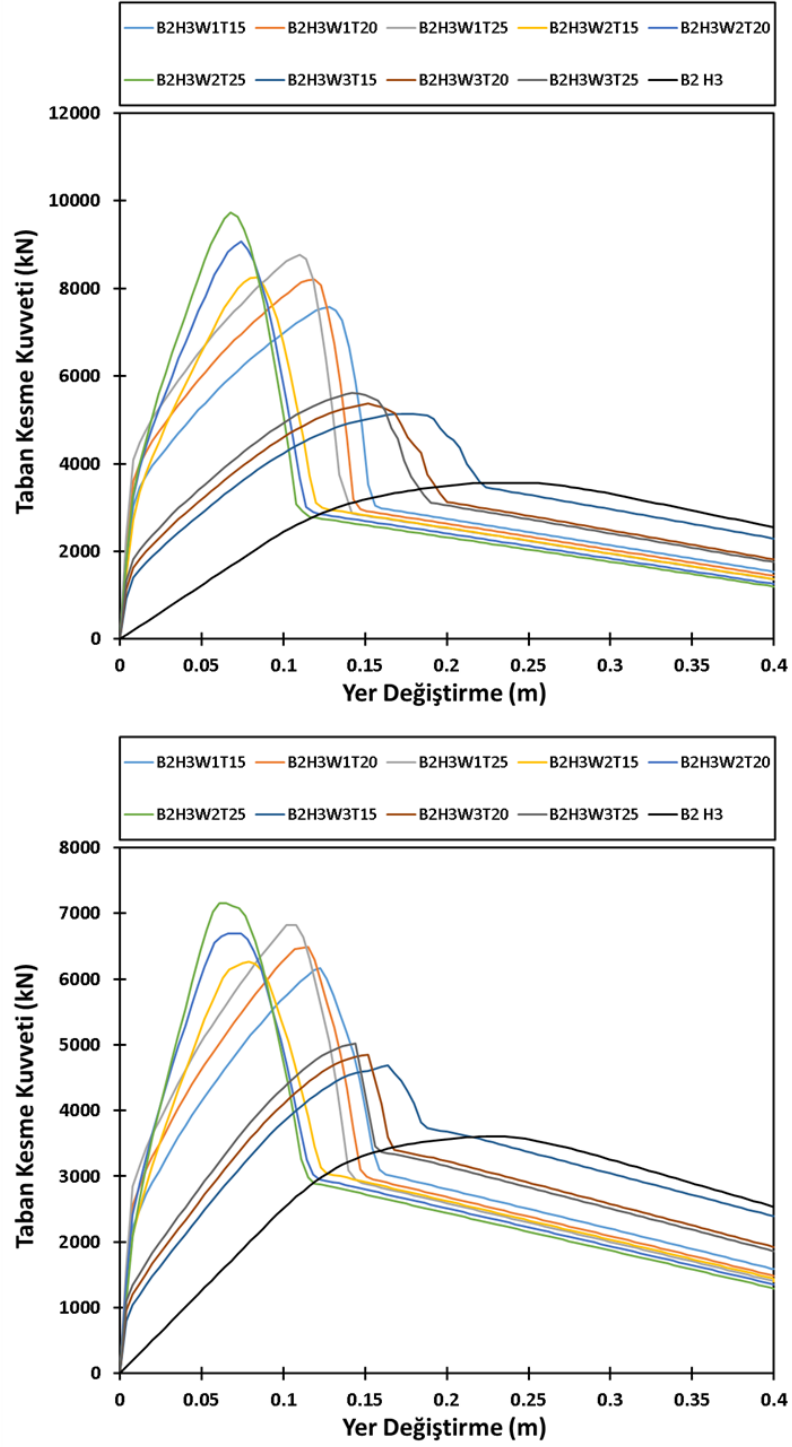
Şekil 4.4. B1 yapı modeli için H = 3 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



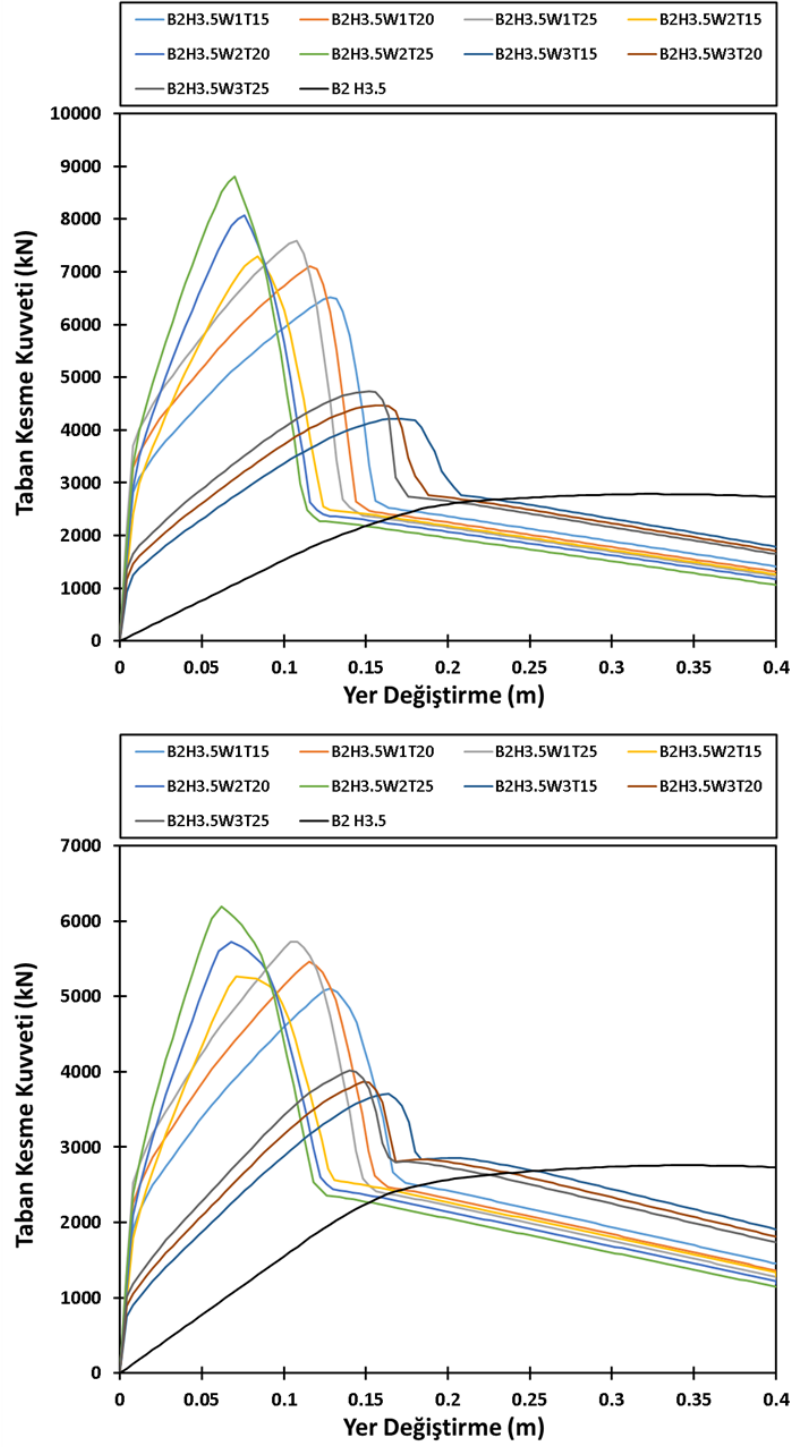
Şekil 4.5. B1 yapı modeli için H = 3.5 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



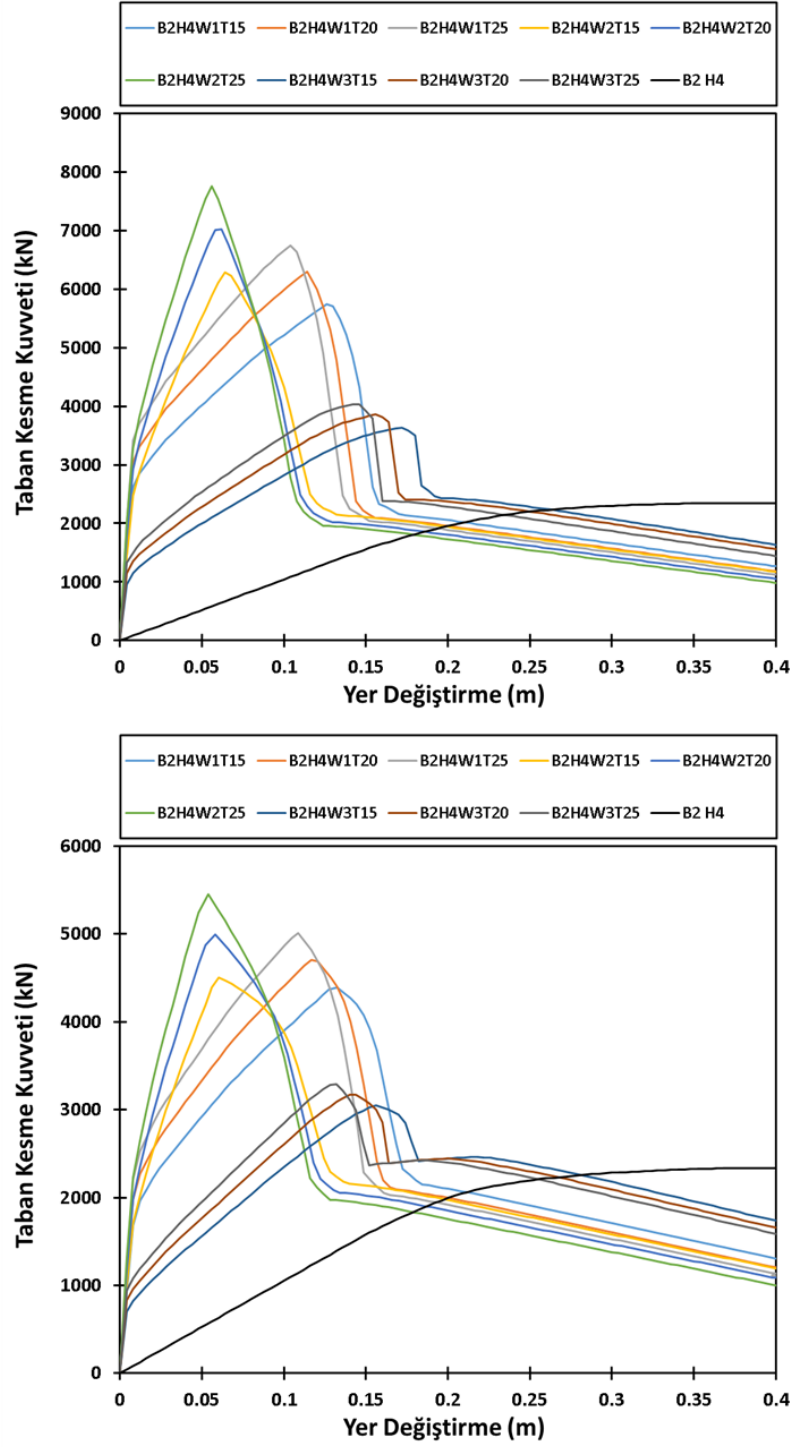
Şekil 4.6. B1 yapı modeli için H = 4 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



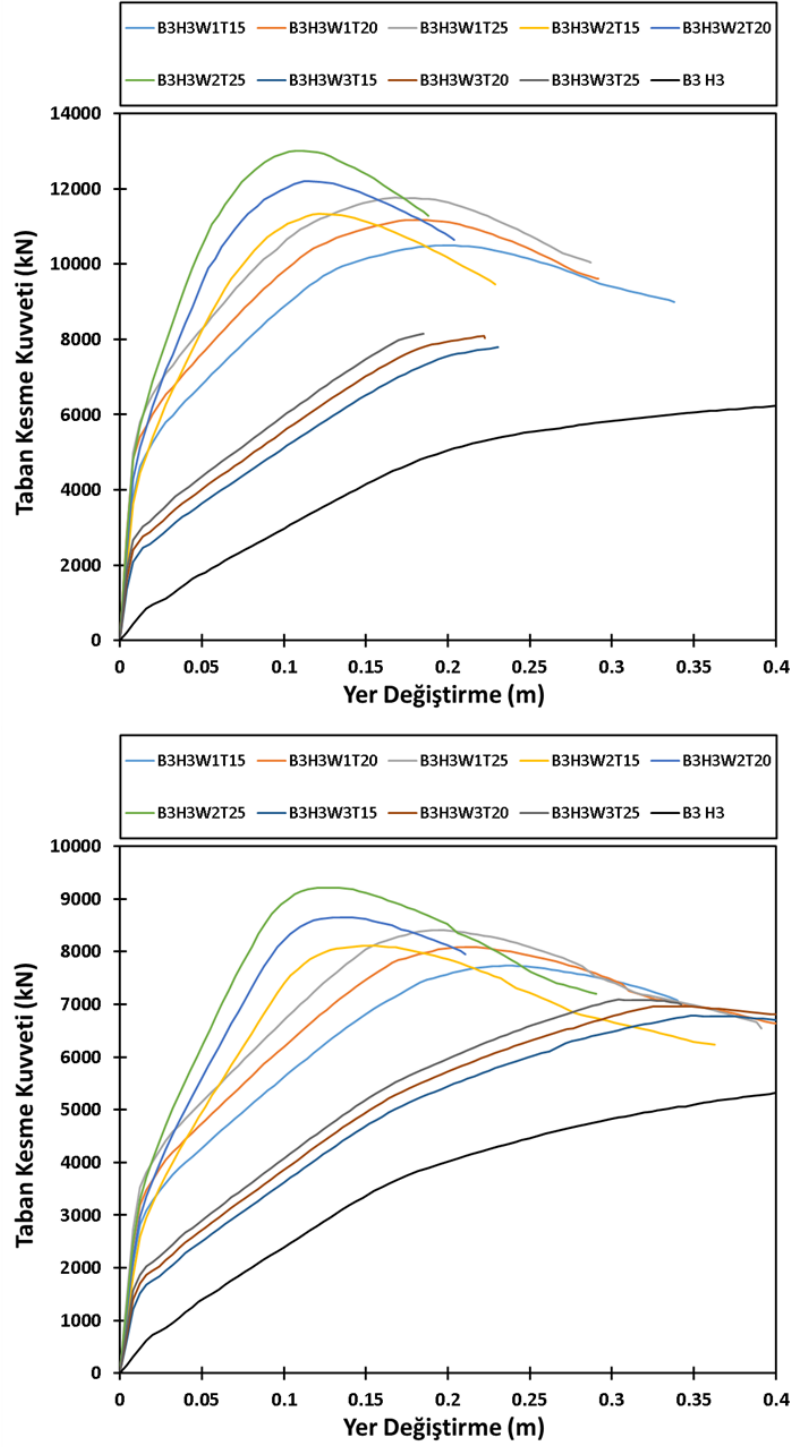
Şekil 4.7. B2 yapı modeli için H = 3 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



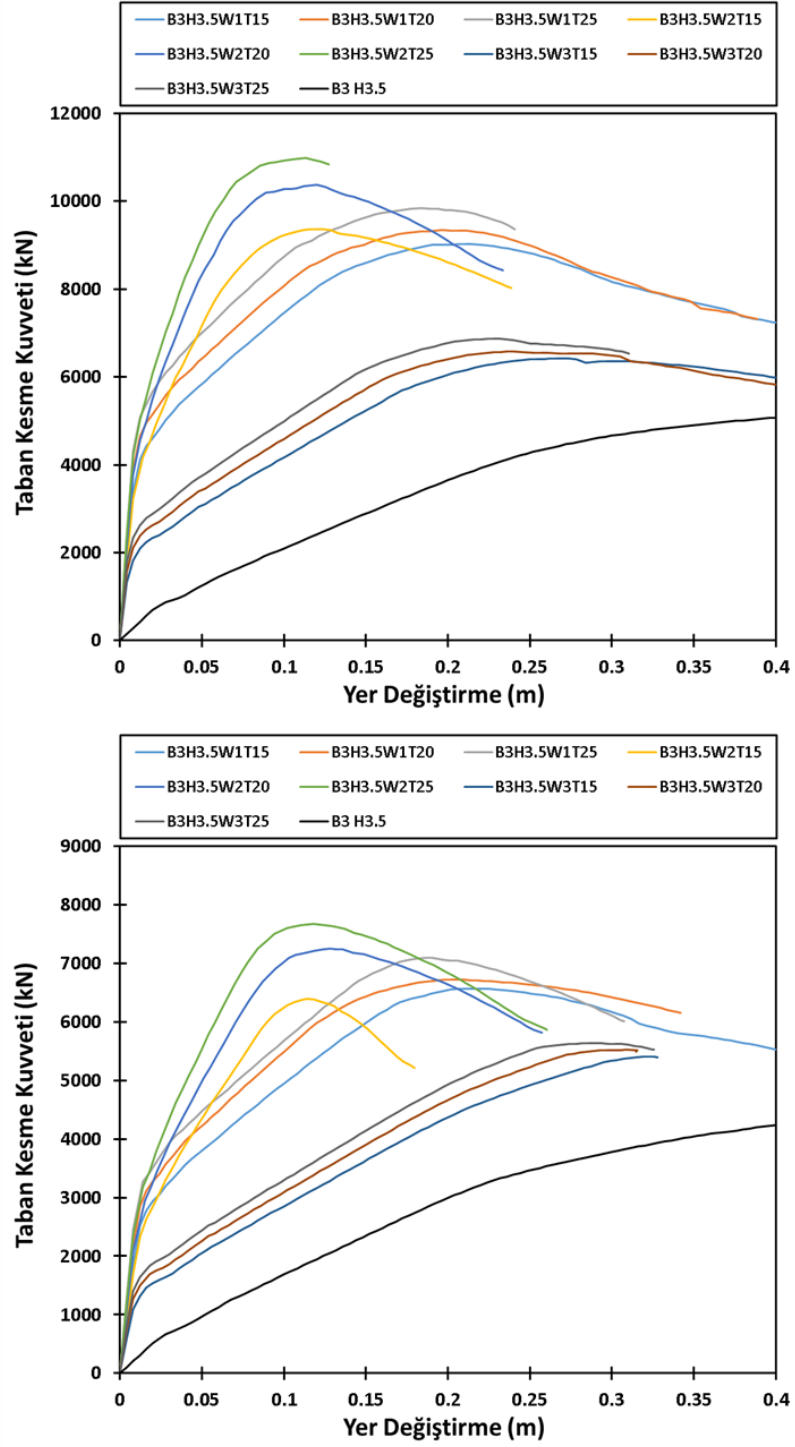
Şekil 4.8. B2 yapı modeli için H = 3.5 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



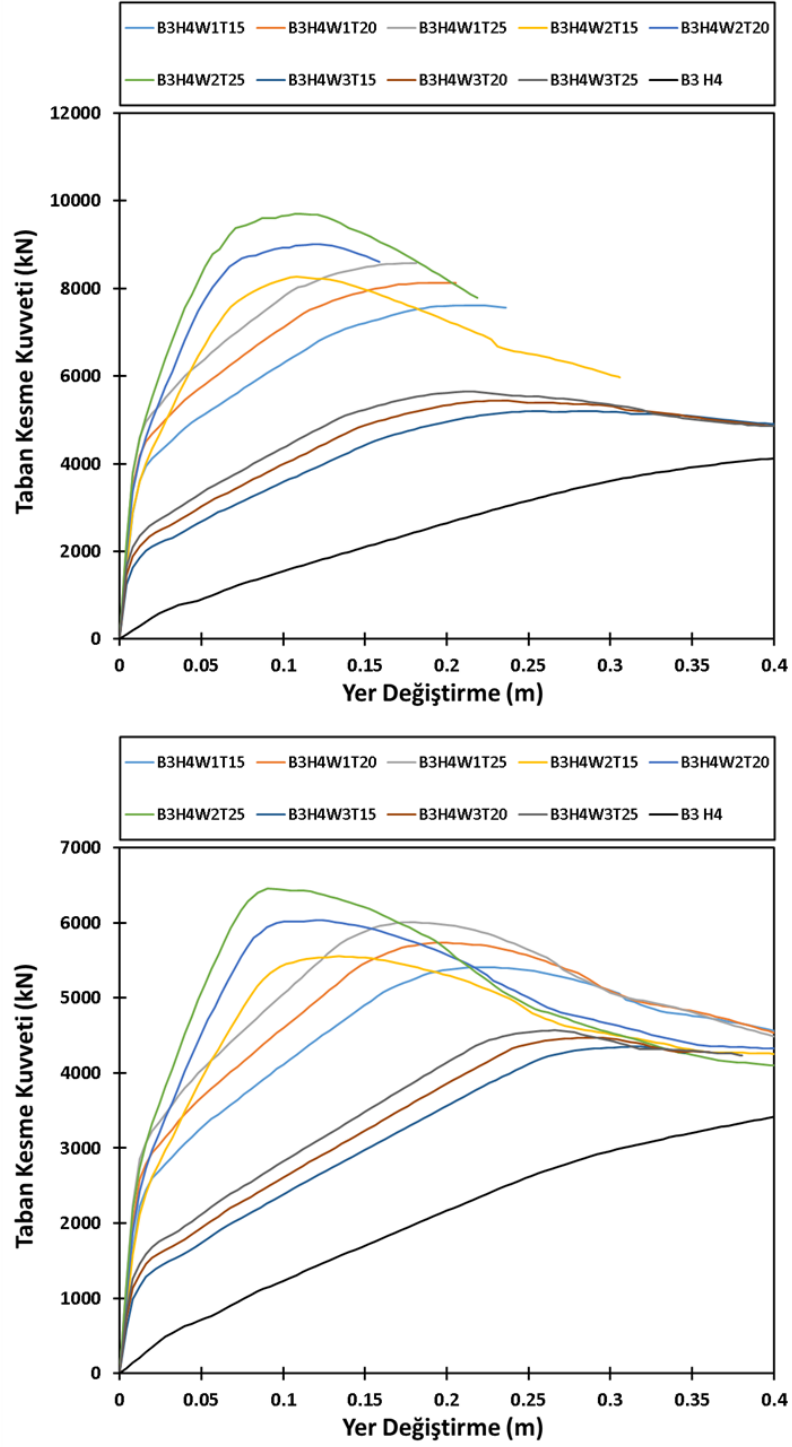
Şekil 4.9. B2 yapı modeli için H = 4 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



Şekil 4.10. B3 yapı modeli için H = 3 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



Şekil 4.11. B3 yapı modeli için H = 3.5 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri



Şekil 4.12. B3 yapı modeli için H = 4 m kat yüksekliğinde, X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri

Bu kapsamda kapasite eğrilerinden elde edilen maksimum taban kesme kuvveti

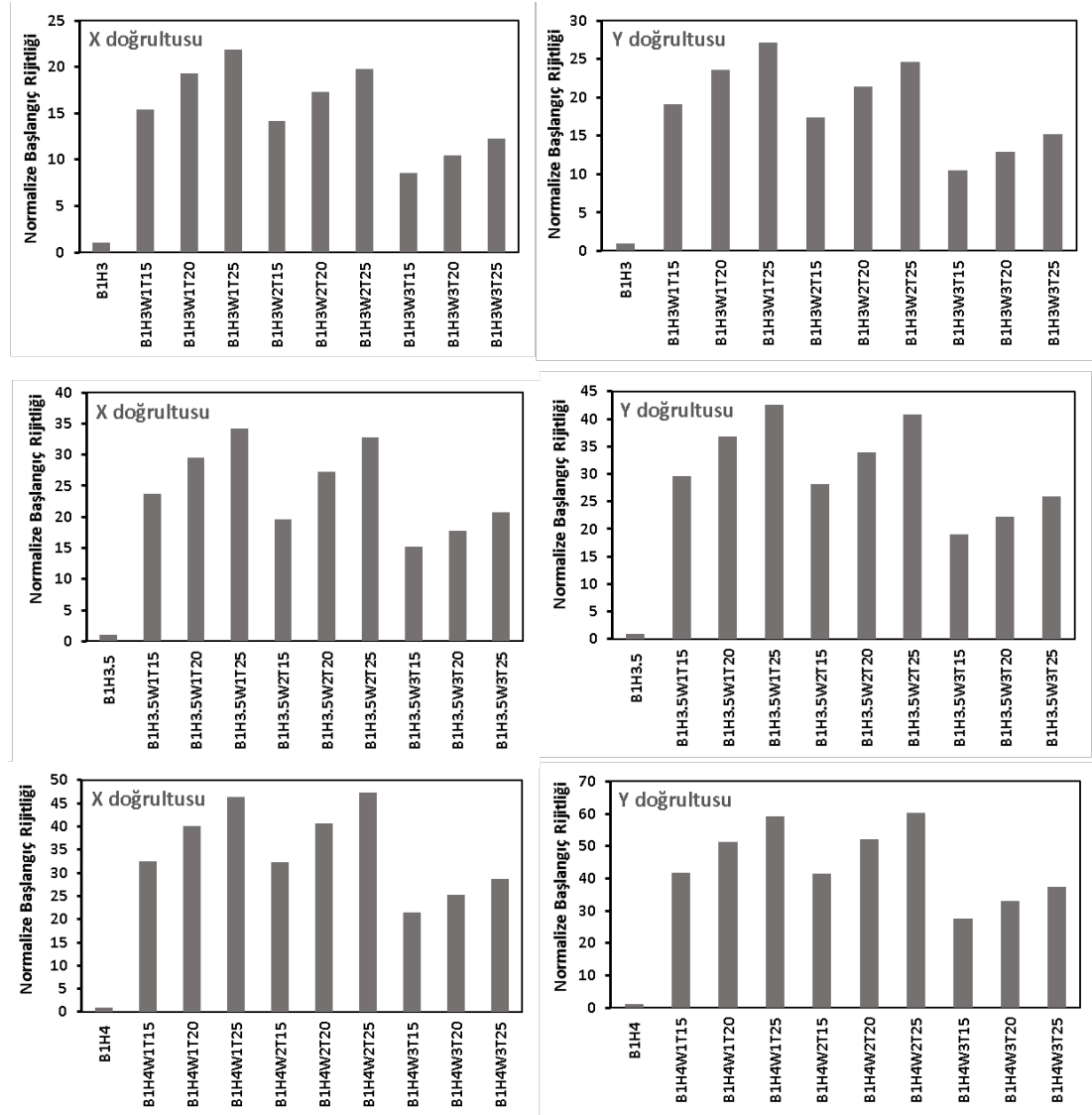
ve başlangıç rijitliği ile birlikte sistem sünekliği de değerlendirilmiştir. Süneklik oranının belirlenmesinde, Kakaletsis ve Karayannis (2009) tarafından önerilen ve daha sonra Cavaleri ve Di Trapani (2014) tarafından da uygulanan $\mu 0.85$ yaklaşımı esas alınmıştır. Kapasite eğrilerinde başlangıç kısmının belirgin doğrusal olmaması ve yumuşama bölgesinin düşük eğime sahip olması nedeniyle akma ve nihai yer değiştirmelerin doğrudan tanımlanması güçleşmektedir. Bu nedenle maksimum dayanımın %85'i seviyesinde yatay bir doğru çizilmiş ve bu doğru eğriyi artan ve azalan kısımlardaki iki farklı noktada kesmiştir. Eğrinin artan kısmı ile kesişen ilk nokta akma noktası olarak kabul edilmiş ve bu noktaya karşılık gelen yer değiştirme değeri akma yer değiştirmesi (D_y) olarak tanımlanmıştır. Eğrinin azalan kısmı ile kesişen ikinci nokta ise nihai yer değiştirme (D_u) olarak kabul edilmiştir. Bazı kapasite eğrilerinde azalan kısım ile kesişim oluşmadığında, nihai yer değiştirme değeri olarak kapasite eğrisinin son noktası esas alınmıştır. Süneklik katsayısı, nihai yer değiştirme ile akma yer değiştirmesinin oranı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır:

$$\mu = \frac{D_u}{D_y} \quad (9)$$

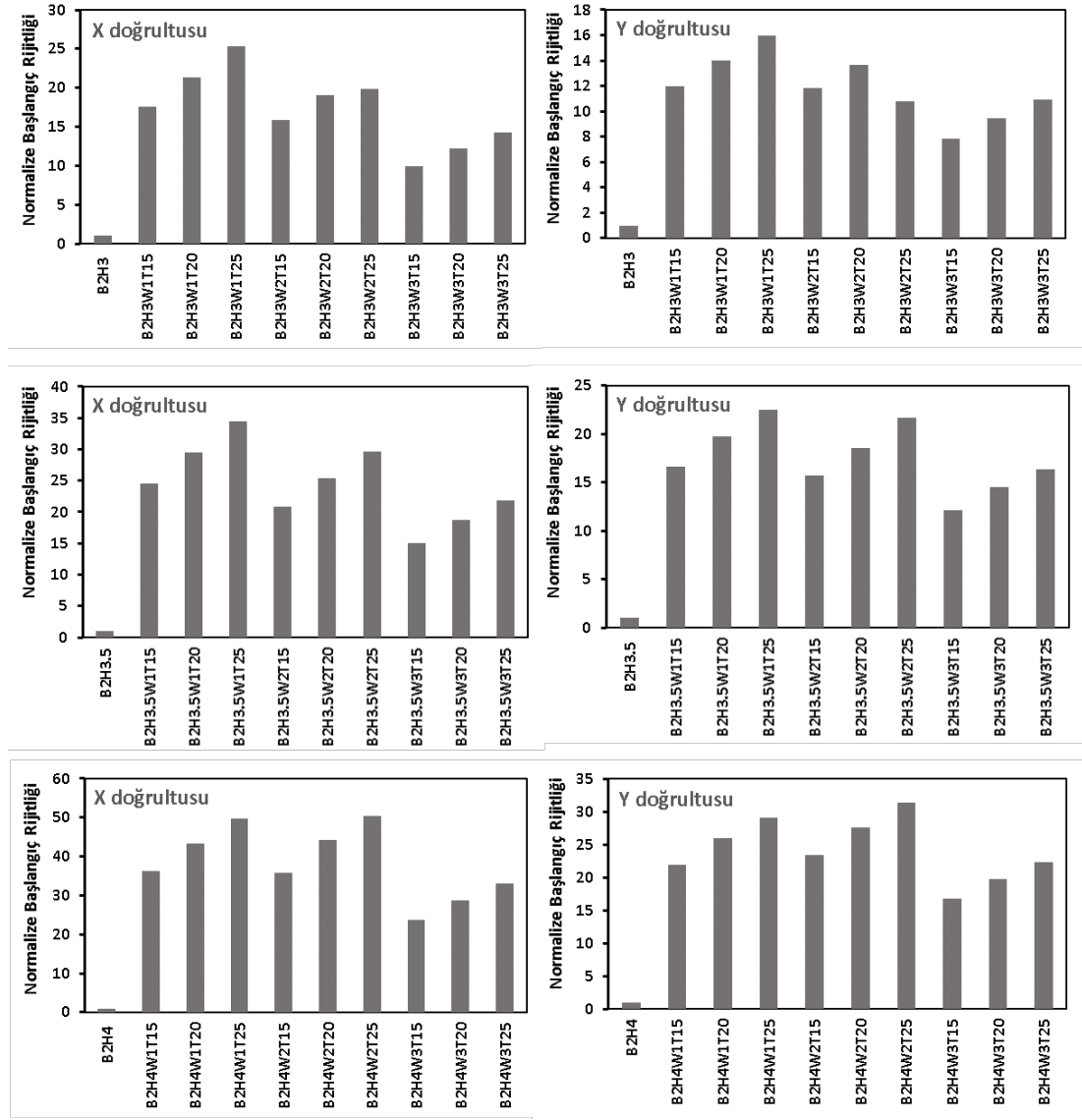
Bazı kapasite eğrilerinde ise %85 seviyesinde çizilen yatay doğrunun eğrinin azalan kısmı ile kesişmediği gözlenmiştir. Bu tür durumlarda, azalan kısım üzerindeki kesişim noktası yerine kapasite eğrisinin son noktası esas alınmış ve nihai yer değiştirme değeri kullanılmıştır. Bu yaklaşım, sistem davranışının gerçekçi biçimde temsil edilebilmesi amacıyla tercih edilmiştir.

Bu yöntem sayesinde farklı dolgu duvar malzeme türleri, duvar kalınlıkları ve kat yüksekliklerinin yapıların küresel davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan statik itme analizlerinden elde edilen başlangıç rijitliği, süneklik ve maksimum taba kesme kuvvet sonuçları dolgu duvarsız model sonuçlarına bölünerek normalize edilmiş ve sunulmuştur. Elde edilen başlangıç rijitliği oranları Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sırasıyla B1, B2 ve B3 yapı modelleri için farklı kat yükseklikleri (H3, H3.5 ve H4) altında karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu grafikler, dolgu duvar parametrelerinin sistem rijitliği üzerindeki etkisinin taşıyıcı sistem tipine bağlı

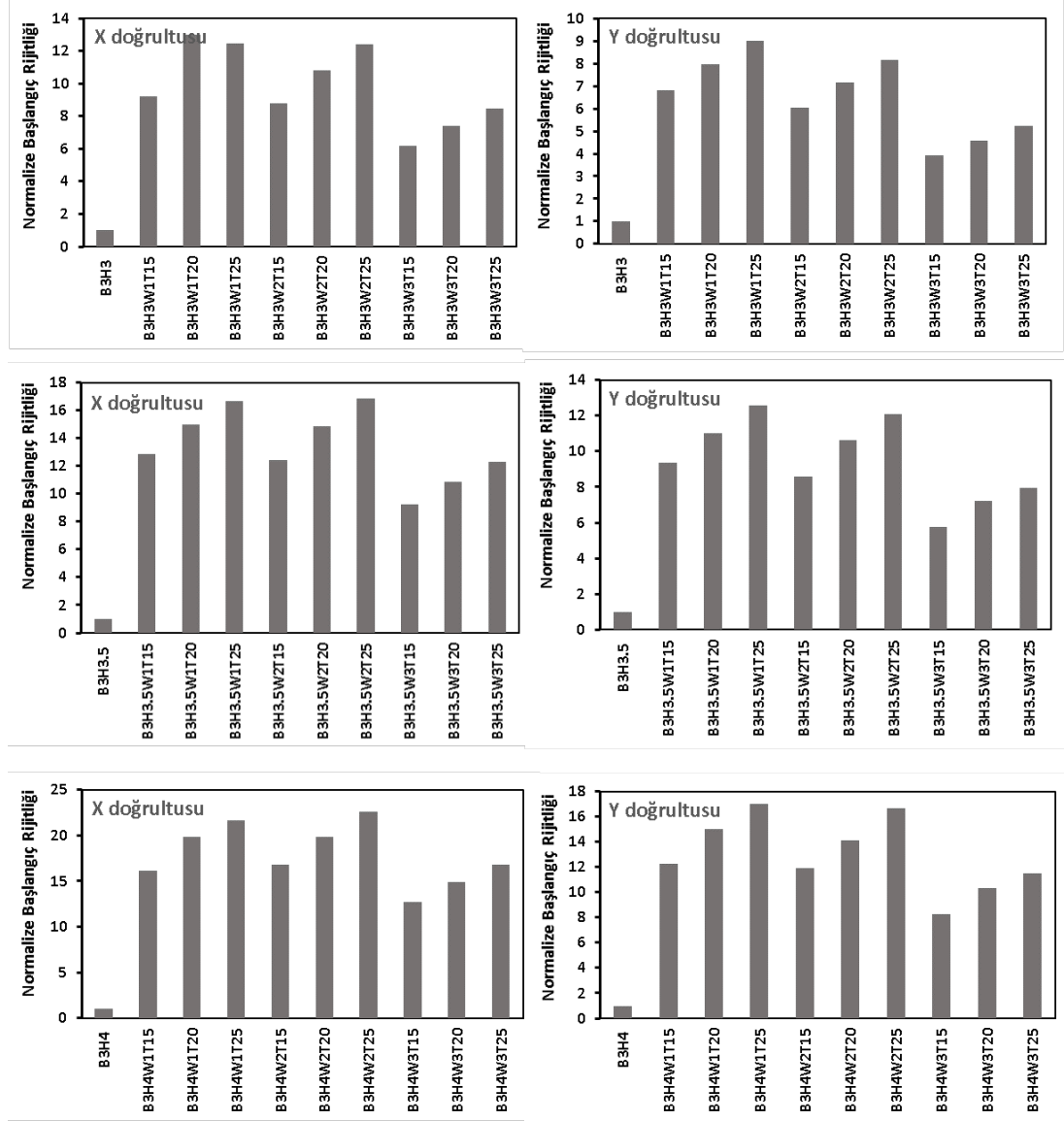
olarak değiştiğini göstermektedir. Benzer şekilde, süneklik oranlarına ait sonuçlar şekil 4.16, şekil 4.17 ve şekil 4.18’de sırasıyla B1, B2 ve B3 yapı modelleri için verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, dolgu duvar malzeme türünün ve duvar kalınlığının sistem sünekliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Maksimum taban kesme kuvveti oranlarına ait karşılaştırmalar ise şekil 4.19, şekil 4.20 ve şekil 4.21’de sırasıyla B1, B2 ve B3 yapı modelleri için sunulmuştur. Bu sonuçlar, dolgu duvar malzeme özellikleri ve geometrik parametrelerin sistem kapasitesi üzerindeki etkisinin yapı tipine göre farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır.



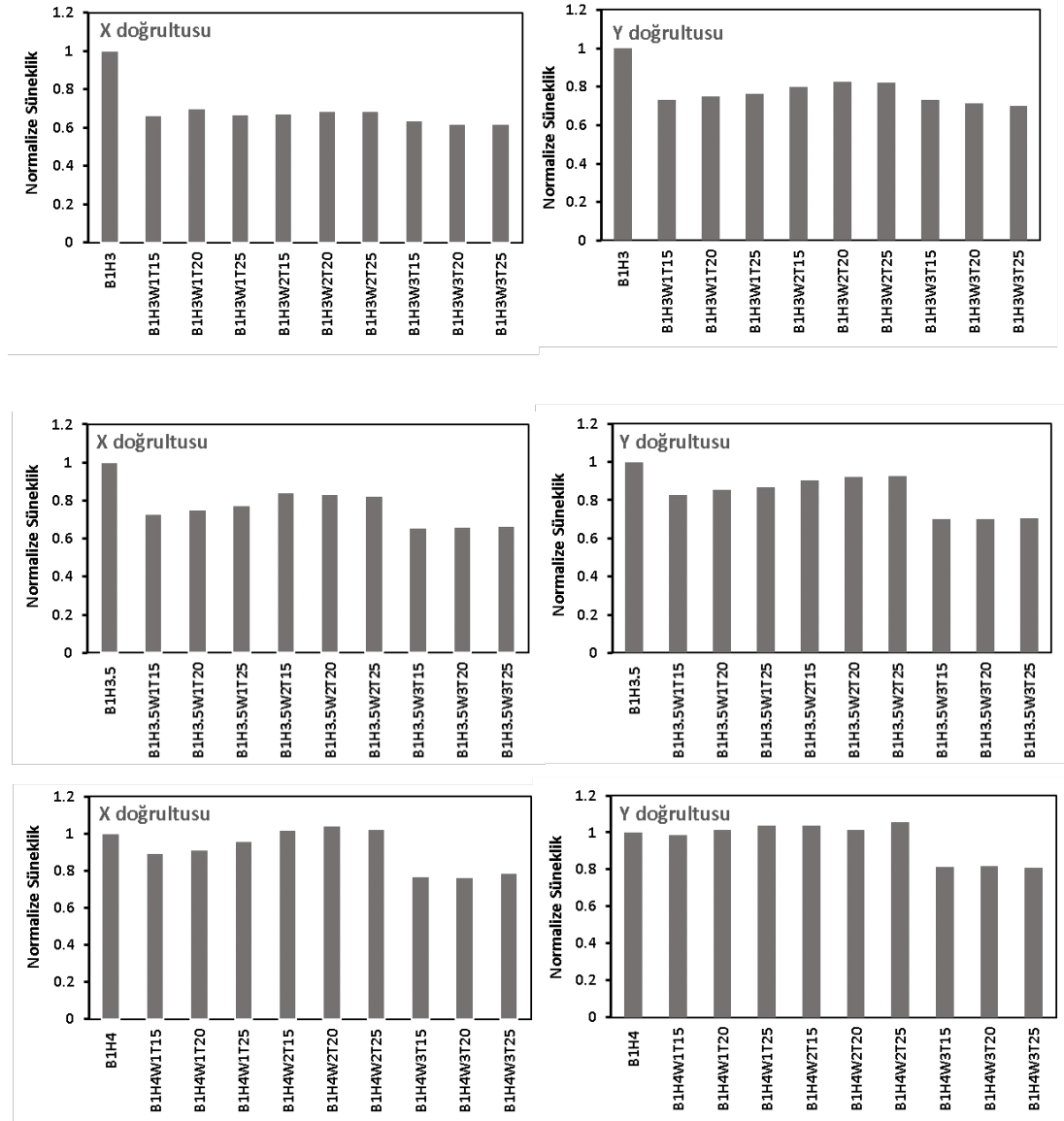
Şekil 4.13. B1 bina modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen başlangıç rijitliği oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



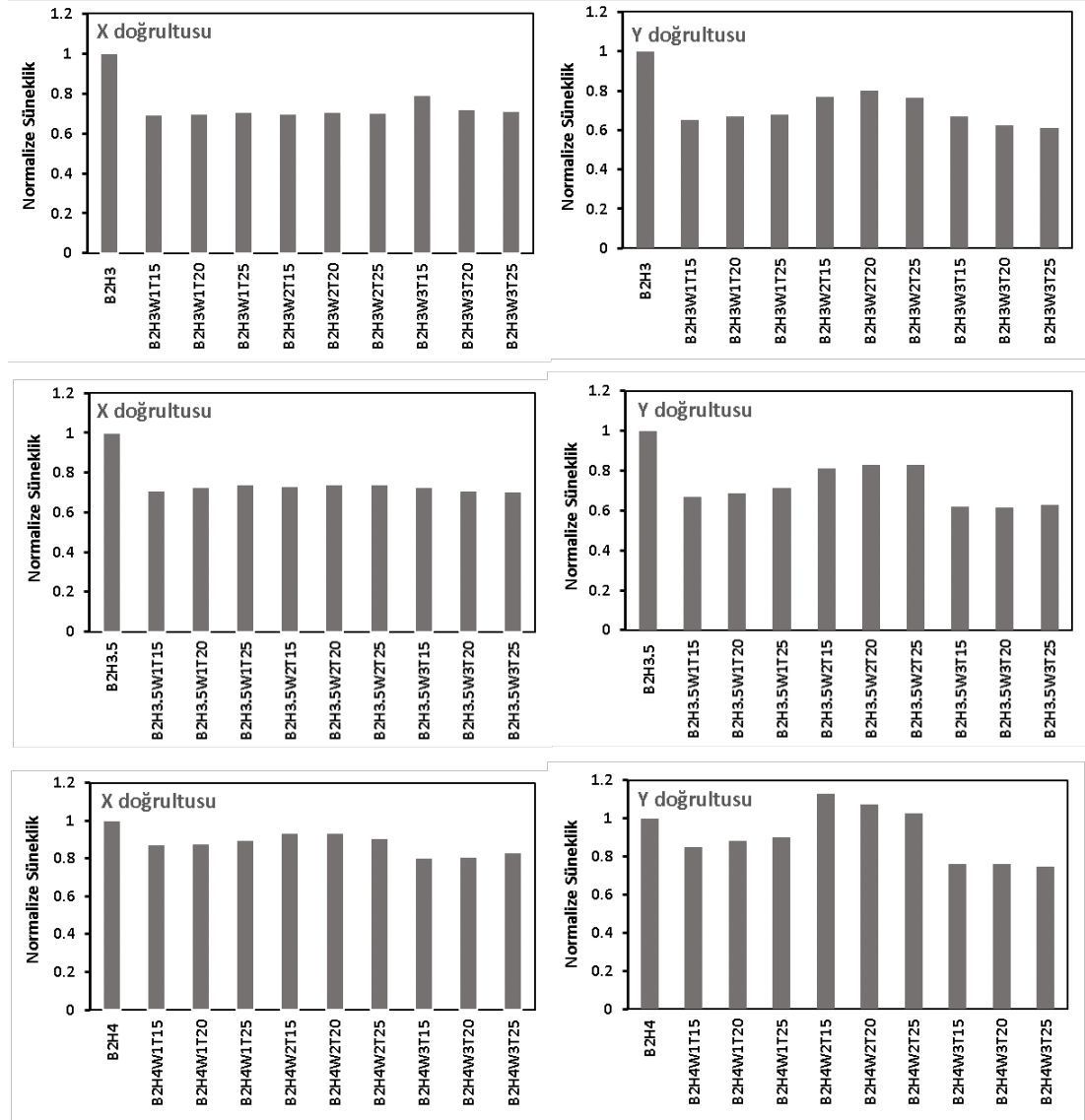
Şekil 4.14. B2 bina modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen başlangıç rijitliği oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



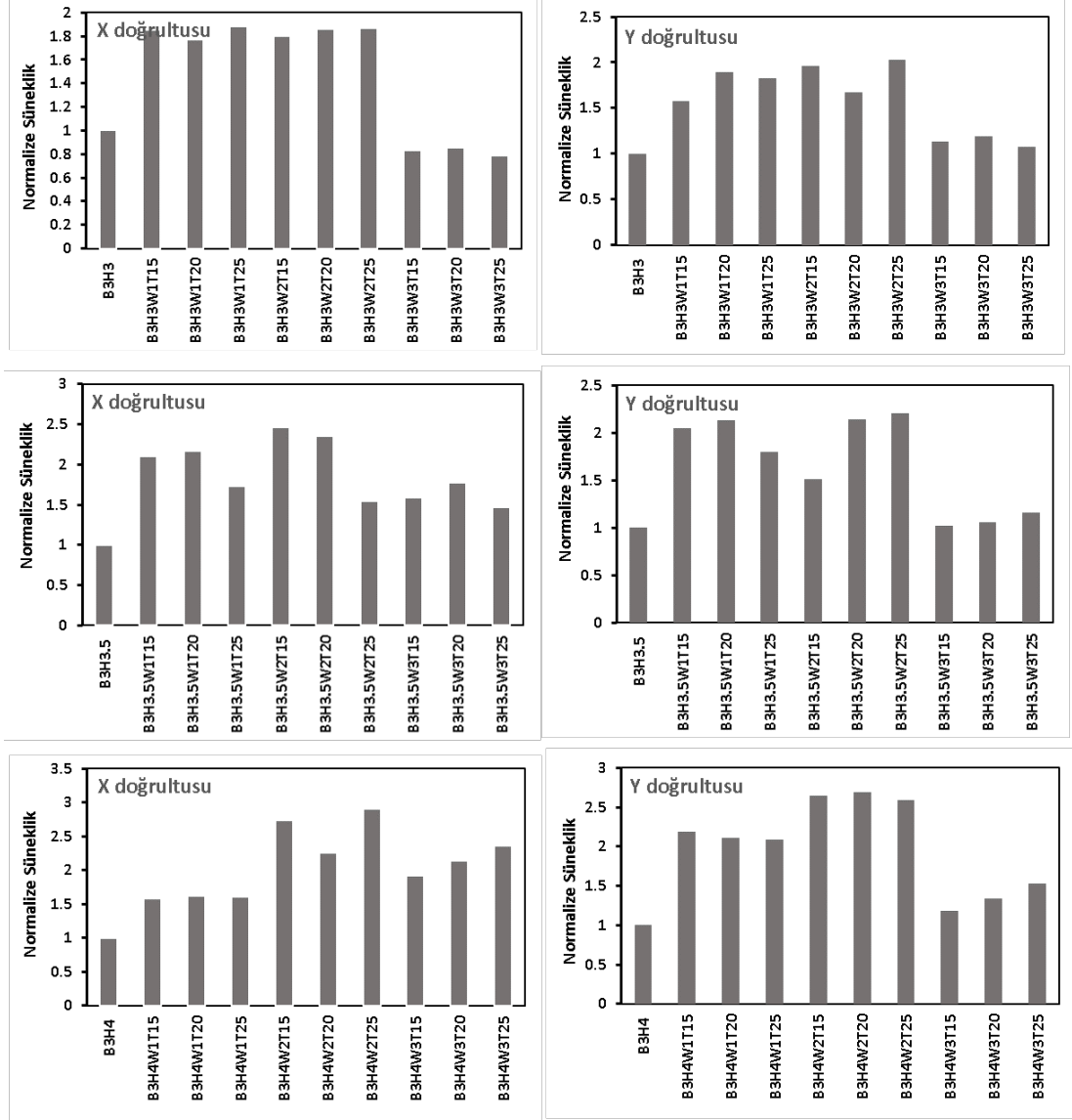
Şekil 4.15. B3 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen başlangıç rijitliği oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



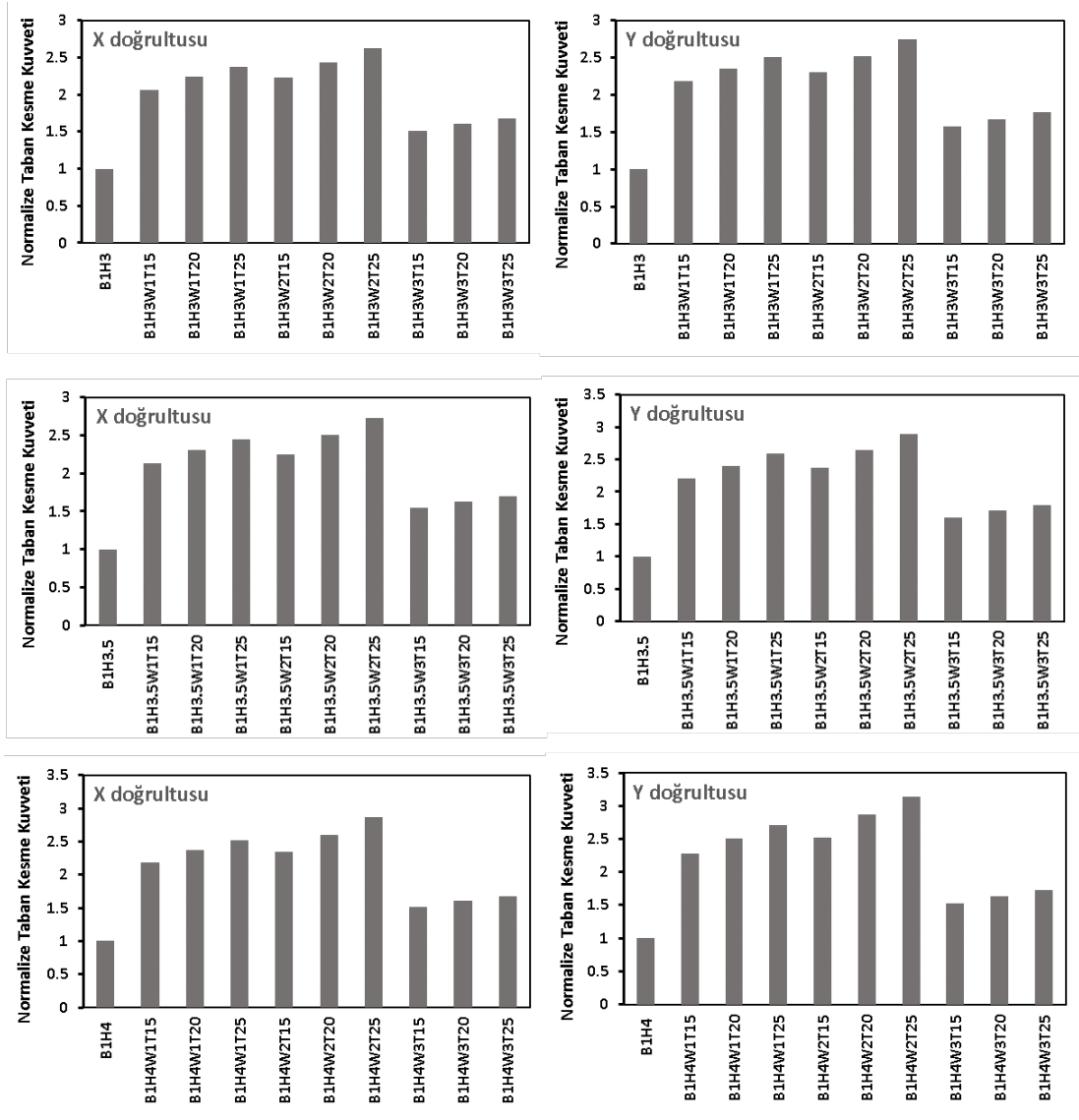
Şekil 4.16. B1 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen süneklilik oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



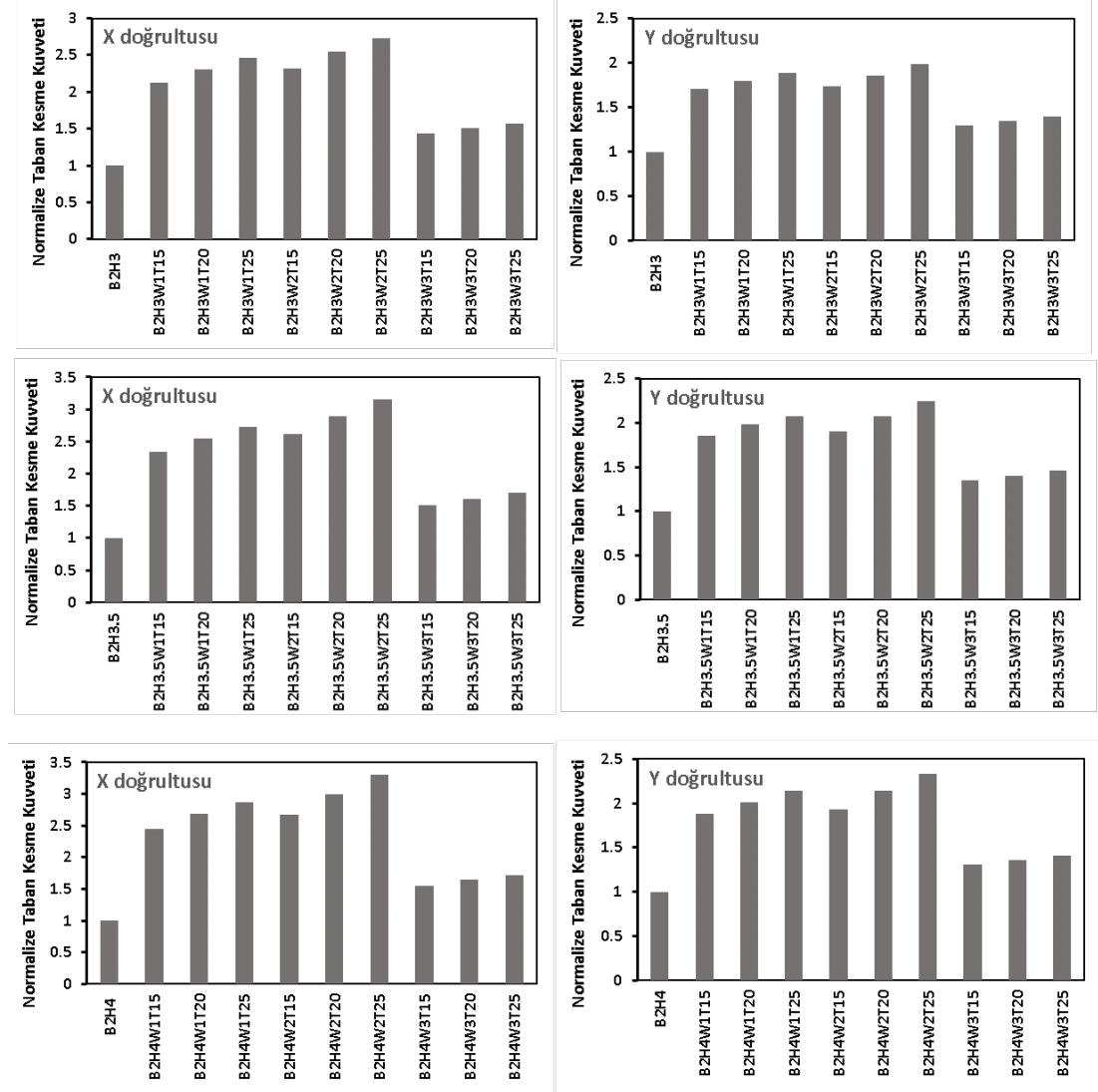
Şekil 4.17. B2 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen süneklik oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



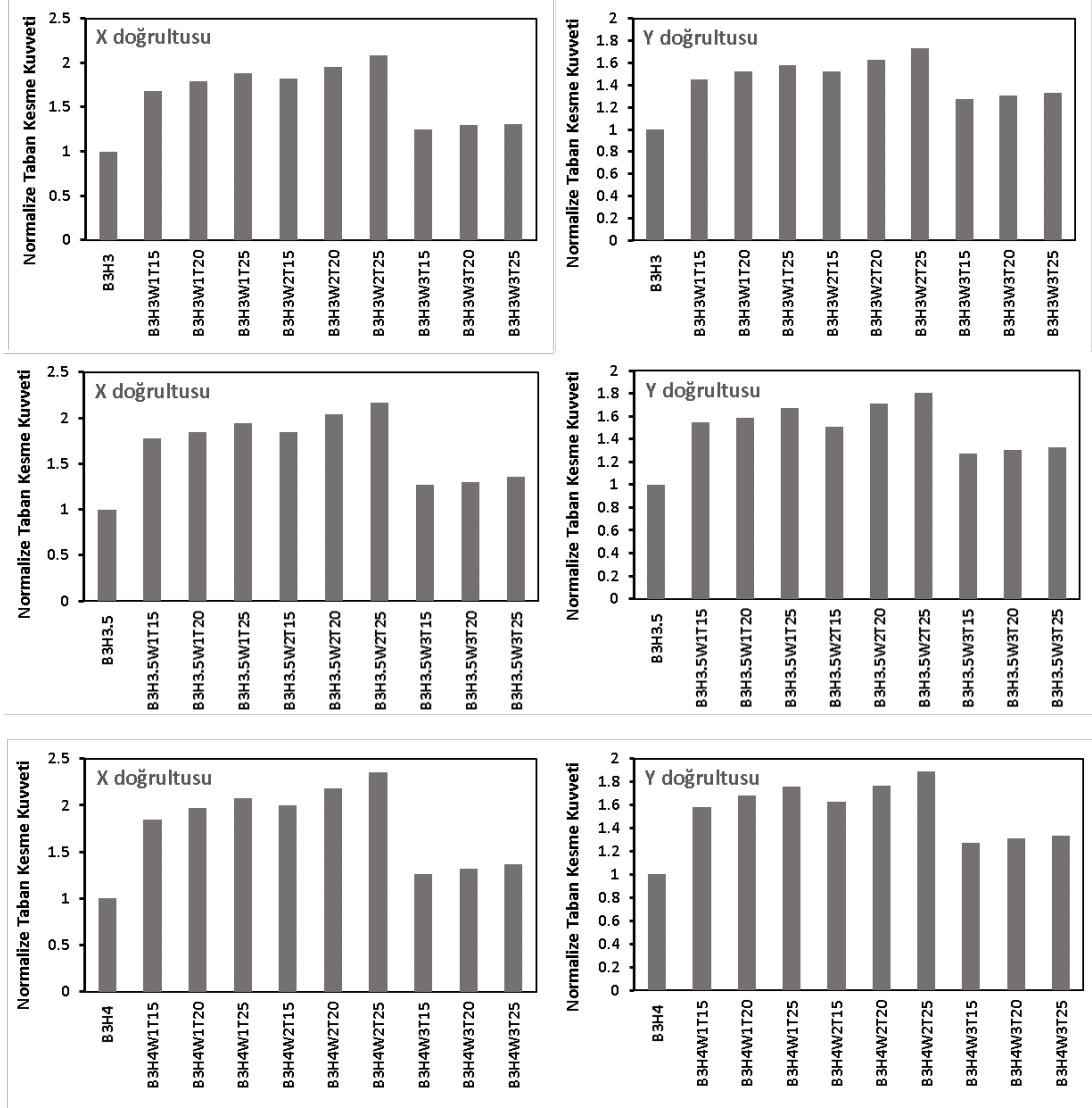
Şekil 4.18. B3 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen süneklik oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



Şekil 4.19. B1 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen maksimum taban kesme kuvveti oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



Şekil 4.20. B2 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen maksimum taban kesme kuvveti oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması



Şekil 4.21. B3 yapı modeli için farklı kat yüksekliklerinde (H3, H3.5 ve H4) X ve Y doğrultularında elde edilen maksimum taban kesme kuvveti oranlarının dolgu duvarsız model ile karşılaştırılması

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, dolgu duvarlara ait malzeme ve geometrik parametrelerin betonarme yapıların doğrusal olmayan sismik davranışı üzerindeki etkileri üç farklı yapı modeli (B1, B2 ve B3) üzerinden parametrik olarak incelenmiştir. Elde edilen kapasite eğrileri, maksimum taban kesme kuvveti, başlangıç rijitliği ve süneklik katsayısı esas alınarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, dolgu duvarların yapı sistemine katkısının yalnızca malzeme özelliklerine bağlı olmadığını; aynı zamanda taşıyıcı sistem tipi, kat yüksekliği ve yapı geometrisi ile de yakından ilişkili olduğunu göstermiştir.

Çerçeve sistemden oluşan B1 ve B2 yapı modellerinde dolgu duvar parametrelerinin sistem davranışı üzerindeki etkisi oldukça belirgin biçimde gözlenmiştir. Özellikle kil tuğla esaslı dolgu duvarlara (W2) sahip modellerin, incelenen tüm kat yüksekliği ve duvar kalınlığı kombinasyonlarında en yüksek maksimum taban kesme kuvveti değerlerini sağladığı görülmüştür. Bu durum, söz konusu malzemenin daha yüksek basınç dayanımına ve daha etkin elastisite özelliklerine sahip olmasıyla açıklanabilir. Kalkerli kum taşı yığma dolgu duvarlara sahip modeller (W1) ikinci sırada yer alırken, hafif beton esaslı dolgu duvarlara sahip modeller (W3) en düşük kapasite değerlerini üretmiştir. Bu sıralama, doğrulama aşamasında elde edilen deneysel bulgularla da uyumlu sonuçlar vermiştir.

Duvar kalınlığının artırılması, tüm çerçeve sistemli modellerde başlangıç rijitliğinin ve maksimum kapasitenin artmasına neden olmuştur. Ancak bu artışın doğrusal olmadığı ve özellikle yüksek dayanımlı dolgu malzemelerinde belirli bir kalınlıktan sonra kapasite artış oranının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin yalnızca kesit alanına bağlı olmadığını, aynı zamanda sistemin genel deformasyon kapasitesi ile de ilişkili olduğunu göstermektedir. Dolgu duvar kalınlığındaki artışın özellikle başlangıç rijitliği üzerinde daha belirgin bir etkisi olduğu, buna karşılık nihai yer değiştirme kapasitesinde sınırlı değişimler oluşturduğu görülmüştür.

Kat yüksekliğinin artması ise tüm modellerde başlangıç rijitliği ve maksimum taban kesme kuvveti değerlerinde azalma ile sonuçlanmıştır. Kat yüksekliği arttıkça çerçeve elemanlarının eğilme hâkim davranışı artmakta ve dolgu duvarların sisteme sağladığı katkı göreceli olarak azalmaktadır. Bu sonuç, dolgu duvar katkısının yalnızca malzeme

özelliğlerine değil, aynı zamanda yapı geometrisine de güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek kat açıklıklarında çerçeve sistemin daha esnek davranması, dolgu duvarların etkin rijitlik katkısını sınırlayan bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

Süneklik davranışı incelendiğinde, maksimum dayanım artışının çoğu durumda süneklik azalması ile birlikte gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle W2 malzemesine sahip modeller daha yüksek dayanım üretmesine rağmen daha sınırlı süneklik değerleri göstermiştir. Buna karşılık W3 malzemesi daha düşük dayanım değerleri üretmiş olmasına rağmen daha yüksek nihai yer değiştirmelere ulaşarak daha sünek bir davranış sergilemiştir. Bu durum, dayanım ve süneklik arasında belirli bir denge bulunduğunu ve tasarım sürecinde bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Perde duvar içeren B3 yapı modelinde ise sistem davranışının büyük ölçüde perde elemanlar tarafından kontrol edildiği görülmüştür. Dolgu duvar malzeme türü ve kalınlığındaki değişimlerin sistem rijitliği ve maksimum kapasite üzerindeki etkisi, B1 ve B2 modellerine kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Bununla birlikte malzeme türleri arasında benzer bir kapasite sıralaması korunmuştur. En yüksek dayanım değerleri W2 malzemesinde elde edilirken, W1 malzemesi ikinci sırada yer almış ve W3 malzemesi en düşük kapasite değerlerini üretmiştir. Ancak bu farkların büyüklüğü çerçeve sistemli modellere kıyasla daha küçük kalmıştır.

Bu bulgular, dolgu duvarların betonarme yapıların sismik davranışında önemli bir rol oynadığını, ancak bu etkinin büyüklüğünün taşıyıcı sistem tipine bağlı olarak değiştirdiğini göstermektedir. Çerçeve sistemli yapılarda dolgu duvar parametreleri sistem davranışını belirgin biçimde etkilerken, perde duvar içeren sistemlerde bu etkinin görece sınırlı kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla dolgu duvarların sismik performans değerlendirmelerinde göz ardı edilmesi, özellikle çerçeve sistemli yapılarda önemli hatalara yol açabilir.

6. SONUÇLAR

Bu bölümde, gerçekleştirilen parametrik analizlerden elde edilen temel bulgular özetlenmiş ve dolgu duvar parametrelerinin betonarme yapıların sismik davranışı üzerindeki başlıca etkileri ortaya konulmuştur.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, dolgu duvar malzeme türünün maksimum taban kesme kuvveti üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu göstermiştir. Kil tuğla esaslı dolgu duvarlara sahip modellerin tüm parametre kombinasyonlarında en yüksek kapasite değerlerini sağladığı görülmüştür. Buna karşılık, hafif beton esaslı dolgu duvarlar daha düşük kapasite değerleri üretmiştir.

Duvar kalınlığının artırılması sistem rijitliğinde ve maksimum taban kesme kuvvetinde artış sağlamıştır. Bununla birlikte, bu artışın doğrusal olmadığı ve belirli bir kalınlıktan sonra kapasite artış oranının azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin yalnızca kesit boyutlarına bağlı olmadığını göstermektedir.

Kat yüksekliğinin artması tüm yapı modellerinde başlangıç rijitliği ve maksimum taban kesme kuvveti değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Artan kat yüksekliği ile birlikte çerçeve sistemin esnekliği artmakta ve dolgu duvarların sisteme sağladığı katkı göreceli olarak azalmaktadır.

Süneklik davranışı açısından değerlendirildiğinde, yüksek dayanım sağlayan dolgu duvar malzemelerinin çoğu durumda daha düşük süneklik değerleri ürettiği görülmüştür. Buna karşılık, daha düşük dayanım sağlayan dolgu duvar malzemeleri daha sünek bir davranış sergilemiştir. Bu bulgu, dayanım ve süneklik arasında bir denge bulunduğunu göstermektedir.

Perde duvar içeren yapı modelinde dolgu duvar parametrelerinin sistem davranışı üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğu belirlenmiştir. Bu durum, perde duvarların sistem rijitliği üzerindeki baskın etkisinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, dolgu duvarların betonarme yapıların sismik performansının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Özellikle çerçeve sistemli yapılarda dolgu duvar parametrelerinin dikkate alınması, yapı davranışının daha gerçekçi biçimde

temsil edilmesini sağlayacaktır.

7. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında dolgu duvarların malzeme ve geometrik özelliklerinin betonarme yapıların doğrusal olmayan sismik davranışı üzerindeki etkileri parametrik analizler yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulabilir.

Öncelikle, betonarme çerçeve sistemli yapılarda dolgu duvarların yapısal modele dahil edilmesi, yapı davranışının daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi açısından önem taşımaktadır. Özellikle doğrusal olmayan statik itme analizlerinde dolgu duvarların ihmal edilmesi, sistem rijitliği ve yatay yük taşıma kapasitesinin hatalı değerlendirilmesine yol açabilmektedir.

Çalışma sonuçları, dolgu duvar malzeme türünün ve duvar kalınlığının sistem rijitliği ve maksimum taban kesme kuvveti üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, mevcut yapıların deprem performansı değerlendirilirken dolgu duvarların mekanik özelliklerinin mümkün olduğunca gerçekçi biçimde belirlenmesi önerilmektedir.

Kat yüksekliğinin artmasıyla birlikte yapı sisteminin rijitliğinde ve yatay yük taşıma kapasitesinde azalma meydana geldiği gözlenmiştir. Bu nedenle özellikle yüksek kat açıklıklarına sahip betonarme yapılarda dolgu duvar-çerçeve etkileşiminin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Perde duvar içeren yapı sistemlerinde dolgu duvar parametrelerinin sistem davranışı üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, çerçeve sistemli yapılarda dolgu duvar özelliklerinin sistem performansını önemli ölçüde etkileyebileceği görülmüştür.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, dolgu duvarların yapı içerisindeki düzensiz dağılımı, duvarlarda bulunan kapı ve pencere boşluklarının etkisi ve farklı yükleme senaryoları altında davranışın incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler kullanılarak elde edilen sonuçların bu çalışmada elde edilen doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçları ile karşılaştırılması, dolgu duvar modellemesinin doğruluğunu daha kapsamlı şekilde değerlendirmeye katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Adibi, S., Malekzadeh, A., & Rahimi, S. (2023). Mitigating soft-story effects in reinforced concrete frames using optimized infill wall configurations. *Engineering Structures*, 267, 114836. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.114836>
- AFAD. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)* (tek. rap.). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara.
- Alhalil, I., & Gullu, M. F. (2023). Investigating the effect of masonry infill walls on the 2D RC structural systems with asymmetry along the elevation. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 1019–1039. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1019033>
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)* (tek. rap.).
- Asteris, P. G., Cotsovos, D. M., Chrysostomou, C. Z., Mohebkhah, A., & Kappos, A. J. (2011). Mathematical macromodeling of infilled frames: State of the art. *Journal of Structural Engineering*, 137(12), 1508–1517. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000404)
- Bal, I. E. (2018). *Betonarme yapılarda dolgu duvar-cerceve etkilesiminin deprem davranışına etkisi* [Y. L. tezi, Turkey].
- Basha, S. H., & Kaushik, H. B. (2015). Behavior of masonry-infilled reinforced concrete frames subjected to seismic loads. *Journal of Structural Engineering*, 141(8), 04014173. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001181](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001181)
- Cavaleri, L., Papia, M., & Fossetti, M. (2005). Infilled frames: Developments in the evaluation of the infill/frame interaction. *Engineering Structures*, 27(7), 1042–1054. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.02.009>
- Cavaleri, L., & Trapani, F. D. (2014). Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65, 224–242. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.016>
- Celik, O. C., & Ellingwood, B. R. (2009). Seismic risk assessment of gravity load designed reinforced concrete frames subjected to mid-America ground motions. *Journal of Structural Engineering*, 135(4), 414–424. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:4\(414\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:4(414))
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 561–582.
- Crisafulli, F. J., & Carr, A. J. (2007). Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(1), 89–107. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-0>
- Dolsek, M., & Fajfar, P. (2008). The effect of masonry infills on the seismic response of a four-story reinforced concrete frame. *Engineering Structures*, 30(7), 1991–2001. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.001>

- Dowell, O. K., Seible, F., & Wilson, E. L. (1998). Pivot hysteresis model for reinforced concrete members. *ACI Structural Journal*, *95*, 607–617.
- Durrani, A. J., & Luo, Y. H. (1994). Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. *ACI Structural Journal*, *91*(2), 123–133.
- Farghaly, A., Nofal, A., & Elafandy, T. (2022). Ultra-high-performance concrete (UHPC) infill walls for enhanced seismic resistance. *Journal of Advanced Structural Engineering*, *45*(6), 342–356.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)* (tek. rap.).
- Guettala, A., Benmesbah, H., & Hadj-Hamou, S. (2024). Advanced modeling techniques for masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, *150*(2), 215–233. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-12615>
- Kakaletsis, D. J., & Karayannis, C. G. (2009). Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings. *ACI Structural Journal*, *106*(2), 132–141.
- Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(9), 728–739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:9\(728\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728))
- Klingner, R. E., & Bertero, V. V. (1978). Earthquake resistance of infilled frames. *Journal of the Structural Division*, *104*(6), 849–863.
- Koutromanos, I., Shing, P. B., Stavridis, A., & Willam, K. (2013). Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads. *Computers & Structures*, *127*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.11.012>
- Kuran, F., Misir, I. S., Aldemir, O., Tuna, E., & Firat, S. (2020). 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Yigma Yapılar Bölümü Üzerine Bir Değerlendirme. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, *2*(1), 47–60.
- Lourenco, P. B., Rots, J. G., & Blaauwendraad, J. (2004). Continuum model for masonry: Parameter estimation and validation. *Journal of Structural Engineering*, *130*(4), 607–615. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:4\(607\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:4(607))
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, *114*(8), 1804–1826. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Mohammadi, M., & Nikfar, F. (2013). Strength and stiffness of masonry-infilled frames with central openings based on experimental results. *Journal of Structural Engineering*, *139*(6), 974–984.
- Paulay, T., & Priestley, M. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. Wiley.

- Risi, M. T. D., Gaudio, C. D., & Verderame, G. M. (2018). Evaluation of infill influence on RC frame seismic performance. *Engineering Structures*, *168*, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.034>
- Shing, P. B., Mehrabi, A. B., Schuller, M. P., & Noland, J. L. (1996). Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, *122*(3), 228–237.
- Trapani, F. D., Malavisi, M., & D’Ayala, D. (2015). Influence of opening position on the lateral response of infilled frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *13*(7), 1885–1909. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9686-7>

ÖZ GEÇMİŞ
KİŞİSEL BİLGİLER

Ad Soyadı : İSA EL SINEDİH
Öğrenci No : 235102010
E-posta : K.3esaeng@gmail.com
Telefon : 05360169886
Doğum Yeri : RAKKA
Doğum Tarihi : 1991-01-01
ORCID : 0009-0003-4216-5049
ABD (TR) : İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
ABD (EN) : Department of Civil Engineering
:

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Adı, Bölüm	Yıl
1.	Harran üniversitesi / İnşaat mühendisliği	2023-Devam