

Yayıllı ve Yığılı Plastik Mafsal Modellerinin Doğrusal Olmayan Davranış Analizlerine Etkileri

Yunus Emre Akkaş¹, İsmet Vapur^{*1}, İlker Fatih Kara¹

^{*1} Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, MERSİN

(Alınış / Received: 08.09.2025 Kabul / Accepted: 16.11.2025 Online Yayınlanma/ Published Online: 31.12.2025)

Anahtar Kelimeler

TBDY 2018,
Doğrusal Olmayan Analiz,
Yığılı Plastisite,
Yayıllı Plastisite,
Etkin Kesit Rijitliği

Öz: Bu çalışmada, yapısal analizlerde sıklıkla kullanılan yayıllı ve yığılı plastisite yöntemlerinin, yapıların doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yayıllı plastisite yönteminde, kesit davranışını daha gerçekçi biçimde temsil eden integrasyon sayısı ve mafsal boyu gibi parametrelerin; yığılı plastisite yönteminde ise etkin kesit rijitliklerinin sistem davranışına olan etkileri değerlendirilmiştir. Beş katlı bir çerçeve sistem üzerinde gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman sayısının (dolayısıyla integrasyon sayısının) azaltılmasının taban kesme kuvvetlerinde %12'ye, görelî kat ötelemelerinde ise %20'ye varan değişimlere sebep olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yığılı plastisite modellerinde eleman etkin kesit rijitliklerinin değişimleri durumunda, taban kesme kuvvetlerinde %47'ye, maksimum görelî ötelemelerde ise %90'a ulaşan oranlarda farklılıklar gözlenmiştir. Dokuz farklı model üzerinde yapılan karşılaştırmalar sonucunda, periyot, kat ötelemesi, donatı uzaması–beton kısalması, plastik dönme değerleri, analiz süreleri ve taban kesme kuvvetleri gibi parametrelerde farklılıklar elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, her iki yöntemin farklı analiz koşullarında yapısal davranış üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Effects of Distributed and Lumped Plastic Hinge Models on the Nonlinear Behavior of Structures

Keywords

Tbdy 2018,
Nonlinear Analysis,
Lumped Plasticity,
Distributed Plasticity,
Effective Section Stiffness

Abstract: This study investigates the effects of widely used distributed and lumped plasticity methods on the nonlinear behavior of structures. In the distributed plasticity approach, the influence of parameters such as the number of integration points and the plastic hinge length which allow a more realistic representation of sectional behavior was evaluated, whereas in the lumped plasticity approach, the effects of effective section stiffness on the overall system response were examined. Numerical analyses conducted on a five-story frame system revealed that reducing the number of elements with small sectional (fiber) divisions and consequently the number of integration points led to variations of up to 12% in base shear and up to 20% in interstory drift ratios. Furthermore, in lumped plasticity models, variations in effective section stiffness resulted in differences of up to 47% in base shear and up to 90% in maximum interstory drift. Comparative analyses of nine different models demonstrated variations in key structural parameters such as period, story drift, reinforcement elongation–concrete shortening, plastic rotation, analysis duration, and base shear. The findings indicate that both modeling approaches have a significant influence on structural behavior under different nonlinear analysis conditions.

1. Giriş

Yapıların gerçek davranışlarının anlaşılması, yapı mühendisliği disiplininde kritik bir öneme sahiptir. Doğrusal olmayan analizler, yapıların çeşitli yükler altındaki şekil değiştirme kapasitelerini ve hasar mekanizmalarını daha gerçekçi biçimde modellemek için kullanılan önemli yöntemlerdir. Bu analizlerde kullanılan plastisite modelleri, yapı elemanlarının plastik şekil değiştirme kapasiteleri ile bu deformasyonların yapı içerisindeki dağılımını gerçeğe en yakın biçimde tahmin etmeyi amaçlamaktadır [1]. Yayıllı ve yığılı plastisite modelleri, yapıların doğrusal olmayan analizlerinde en yaygın kullanılan yaklaşımlar arasında yer almakta olup, karmaşık yapısal davranışların pratikte en gerçekçi biçimde temsil edilmesine olanak sağlamaktadır.

Yayıllı plastisite modeli, plastik şekil değiştirmenin kesit boyunca sürekli dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Bu modelde integrasyon sayısı, küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman sayısı ve mafsal boyu gibi sayısal parametrelerin seçimi, yapının genel davranışını doğrudan etkileyebilmektedir [2]. Farklı integrasyon noktası, hücreli kesitlere sahip eleman sayıları ve mafsal boylarının kullanımı; kesit rijitliği, yapı periyodu, öteleme kapasitesi, analiz süresi ve taban kesme kuvveti gibi yapısal parametrelerde farklılıklara neden olabilmektedir.

Yığılı plastisite modeli ise plastik şekil değiştirmenin belirli bölgelerde yoğunlaştığı varsayımına dayanmaktadır [3]. Bu modelde, eksenel yük düzeyleri ve etkin kesit rijitlikleri, hem model doğruluğu hem de hesaplama verimliliği üzerinde belirleyici parametrelerdir. Dolayısıyla, yayıllı plastisite analizlerinde olduğu gibi, yapı periyodu, kat öteleme, plastik dönme değerleri ve taban kesme kuvveti gibi parametrelerde farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, söz konusu parametrelerin yapısal analiz sonuçları üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Rahai ve Nafari [4], bir köprü çerçevesi üzerinde gerçekleştirdikleri itme analizlerinde yayıllı ve yığılı plastisite yaklaşımlarını karşılaştırmış; düşük deformasyon seviyelerinde iki modelin benzer sonuçlar verdiğini, yüksek deformasyonlarda ise farkların belirginleştiğini göstermişlerdir.

Barbagallo vd. [5], betonarme çerçeveler üzerinde yaptıkları çalışmada yığılı ve yayıllı plastisite modellerinin sismik davranış üzerindeki etkilerini karşılaştırmış; özellikle büyük yer değiştirmelerde ve ileri hasar seviyelerinde modelleme yaklaşımının sonuçları önemli ölçüde değiştirdiğini raporlamışlardır. Düşük yükleme seviyelerinde ise iki model arasındaki farkların azaldığı gözlemlenmiştir.

Değer ve Başdoğan [3], doğrusal olmayan davranış modelleme tekniklerini inceleyerek, farklı göçme tiplerine sahip betonarme perdeler için analitik modelleme parametrelerini deneysel verilere dayalı olarak geliştirmişlerdir. Ayrıca, deprem yönetmeliklerindeki hasar sınırlarını inceleyip deneysel bulgularla karşılaştırmış ve TBDY 2018 [6] kapsamında farklı hasar sınırlarına ait ötelenme oranı değerlerini sunmuşlardır.

Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinin yapıların doğrusal olmayan davranışına etkisi de literatürde önemli bir araştırma konusu olmuştur. Güler [7], farklı deprem ölçekleme yöntemlerinin kısa periyotlu sistemlerde tepe yer değiştirmeleri ve plastik şekil değiştirme seviyelerini artırdığını, uzun periyotlu sistemlerde ise bu etkinin sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Mansouri vd. [8], deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi işlemlerinin, sismik etkilerin büyüklüğünü artırarak yapı davranışındaki belirsizlikleri önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın temel amacı, yayıllı ve yığılı plastisite modellerinin tasarım esaslarındaki farklılıkları kapsamlı biçimde analiz etmek ve bu modellerin yapısal davranış üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak incelemektir. Bu kapsamda, her bir kat yüksekliği üç metre olan beş katlı bir çerçeve sistem üzerinde dokuz farklı doğrusal olmayan model geliştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Literatürde her iki modelin önemi ayrı ayrı vurgulanmış olsa da, doğrudan modelleme yaklaşımı ve tasarım biçimleri açısından yapılan karşılaştırmalar oldukça sınırlıdır.

Bu çalışma ile, yapı mühendisliği alanında doğrusal olmayan analizler konusundaki bilgi birikimine katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçların, yapıların daha güvenilir ve ekonomik biçimde tasarlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, yapı periyotları, kat öteleme oranları, donatı uzaması-beton kısalması, plastik dönme, taban kesme kuvveti ve analiz süresi gibi parametreler üzerinden yapılan değerlendirmeler; her iki modelin avantajlarını ve sınırlılıklarını ortaya koyarak, mühendislik uygulamaları açısından hangi durumlarda tercih edilmesi gerektiğine ilişkin yol gösterici bilgiler sunabileceği değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deprem Etkisi Altındaki Yapı Sistemlerinde Doğrusal Olmayan Davranış

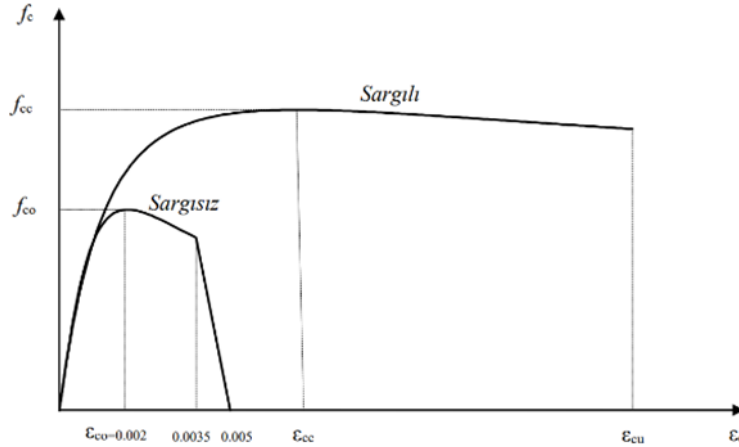
Yapı sistemlerinin statik ve dinamik davranışları, kullanılan yapı malzemelerinin doğrusal ve doğrusal olmayan mekanik özellikleriyle yakından ilişkilidir. Taşıyıcı sistemlerin analizinde doğrusal davranış varsayımı yapıldığında, yer değiştirmelerin küçük değerlerde kaldığı ve malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin doğrusal elastik kabul edildiği varsayılmaktadır. Ancak, yapıya uygulanan dış yüklerin servis yükü sınırlarını aşması durumunda yer değiştirmeler artacak ve malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışı doğrusal elastik sınırların ötesine geçecektir. Yer değiştirmelerin belirli bir eşiği aşması, denge denklemleri ve geometrik uygunluk

koşullarını etkilediğinden, yapı malzemelerinin doğrusal olmayan özelliklerinin dikkate alınması tasarım sürecinde daha gerçekçi ve aynı zamanda ekonomik çözümler elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

2.2.Beton ve Donatı Çeliği için Malzeme Modelleri

2.2.1.Beton için Malzeme Modelleri

Yapı sistemlerinin deprem yükleri altında güvenli bir performans sergileyebilmesi için, elemanların belirli bir düzeyde süneklik göstermesi ve deprem enerjisini sönmüleyebilmesi gerekmektedir. Süneklik kapasitesi, yapı malzemelerinin elastik sınırların ötesindeki davranışlarıyla doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla, yapı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, sistemin genel davranışını anlamada belirleyici bir role sahiptir. Doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle gerçekleştirilen şekil değiştirmeye dayalı değerlendirme ve tasarım yaklaşımlarında, sargısız ve sargılı beton davranışı için alternatif bir model tercih edilmediği durumlarda, TBDY 2018 [6] Ek 5A'da sunulan gerilme-şekil değiştirme ilişkileri esas alınabilmektedir. Sargısız ve sargılı beton davranışını temsil eden modeller Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.TBDY 2018 yönetmeliğinde verilen sargılı ve sargısız beton gerilme-şekil değiştirme eğrisi [6]

Sargılı betonda, betonun basınç gerilmesi f_c , basınç birim şekil değiştirmesi ε_c 'ye bağlı olarak olarak Denklem (1) ile tanımlanmaktadır.

$$f_c = \frac{f_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

Burada, f_{cc} , sargılı beton dayanımını, x , normalize edilmiş beton birim şekil değiştirmesini ve r , ise betonun sargı etkisine ve enine donatı düzenine bağlı bir katsayıdır. Bu ifadeler, Denklem (2) ve (3)'e göre hesaplanmaktadır.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (2a)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} [1 + 5(\lambda_c - 1)] \quad (2b)$$

$$\varepsilon_{co} \cong 0.002 \quad (2c)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (3a)$$

$$E_c \cong 5000 \sqrt{f_{co}} \quad (3b)$$

$$E_{sec} \cong \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (3c)$$

Bu denklemlerdeki f_{co} , sargısız betonun basınç dayanımını, E_c ise betonun elastisite modülünü göstermektedir. Ayrıca, ε_{cu} , ε_{cc} ve ε_{co} terimleri sırasıyla; sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesini, sargılı beton dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi ve sargısız beton dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir. Denklem (1)'te tanımlanan f_{cc} ile f_{co} arasındaki ilişki, Denklem (4) ile belirlenmektedir.

$$f_{cc} = \lambda_c f_{co} \quad (4a)$$

$$\lambda_c = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_e}{f_{co}} - 2 \frac{f_e}{f_{co}} - 1.254} \quad (4b)$$

Bu denklemde f_e , etkili sargılama basıncını göstermektedir. Bu değer, dikdörtgen kesitlerde birbirine dik iki doğrultu için Denklem (5)'te verilen değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

$$f_{ex} = k_e \rho_x f_{yw} \quad (5a)$$

$$f_{ey} = k_e \rho_y f_{yw} \quad (5b)$$

Burada f_{yw} enine donatı akma dayanımını, ρ_x ve ρ_y ilgili doğrultulardaki donatı oranlarını, k_e ise Denklem (6)'da tanımlanan sargılama etkinlik katsayısını ifade etmektedir.

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \left(1 - \frac{A_s}{b_o h_o}\right)^{-1} \quad (6)$$

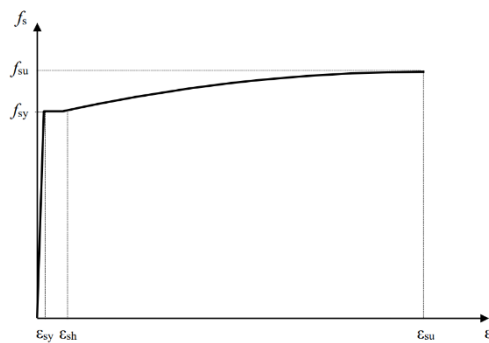
Bu denklemde, a_i , kesit çevresindeki boyuna donatı eksenleri arasındaki uzaklığı; s , boyuna doğrultudaki etriyelerin eksenleri arasındaki aralığı; A_s ise boyuna donatı alanını göstermektedir. Ayrıca, b_o ve h_o , göbek betonunu saran enine donatıların eksenleri arasında kalan kesit boyutlarını tanımlamaktadır.

2.2.2. Çelik Donatı Modeli

Beton ile birlikte kullanıldıklarında, betonun çekme dayanımındaki önemli bir eksikliği tamamlayan çelik donatı için başka bir modelin tercih edilmediği durumlarda, TBDY 2018 [6] Ek 5A.2'de verilen gerilme-şekil değiştirme bağıntıları esas alınabilmektedir. Bu bağıntılar, Denklem (7)'de sunulmuştur.

$$f_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s (\varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy}) & (7a) \\ f_{sy} (\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}) & (7b) \\ f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} (\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}) & (7c) \end{cases}$$

Burada, f_s , f_{su} ve f_{sy} terimleri sırasıyla çelik donatıdaki gerilmeyi, çelik donatının kopma dayanımını ve akma dayanımını göstermektedir. Ayrıca, ε_s , ε_{su} , ε_{sh} ve ε_{sy} terimleri sırasıyla; çelik donatı birim şekil değiştirmesini, kopma birim şekil değiştirmesini, pekleşme başlangıcındaki birim şekil değiştirmesini ve akma birim şekil değiştirmesini ifade etmektedir. TBDY 2018 [6] yönetmeliği, doğrusal olmayan davranışın modellenmesinde farklı donatı dayanımlarına ait Şekil 2'de sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ve Tablo 1'de verilen değerlerin kullanılmasını önermektedir.



Şekil 2. TBDY 2018'de verilen çelik donatı gerilme-şekil değiştirme eğrisi [6]

Tablo 1. TBDY 2018 donatı sınıfına göre akma - kopma dayanımları ve şekil değiştirme değerleri [6]

Donatı sınıfı	f_{sy} (MPa)	ε_{sy}	ε_{sh}	ε_{su}	f_{su}/f_{sy}
S220	220	0.0011	0.011	0.12	1.20
S420	420	0.0021	0.008	0.08	1.15-1.35
B420C	420	0.0021	0.008	0.08	1.15-1.35
B500C	500	0.0025	0.008	0.08	1.15-1.35

2.3. Etkin kesit rijitlikleri

Betonun çekme dayanımının sınırlı olması nedeniyle, yapı elemanlarında düşük seviyedeki yükler altında dahi, çekme gerilmelerinin yoğunlaştığı yüzey bölgelerinde çatlaklar oluşabilmektedir. DBYBHY (2007) [9] yönetmeliğinde etkin kesit rijitliklerinin kullanımı tanımlanmamışken, TBDY 2018 [6], bu durumun deprem etkileri altında yapı davranışını önemli ölçüde etkileyeceğini göz önünde bulundurarak, yapısal analizlerde etkin kesit rijitliklerinin kullanılmasını öngörmektedir. Doğrusal çözümlemelerde, eleman tipine göre Tablo 2’de verilen katsayılar esas alınarak etkin kesit rijitlikleri hesaplanırken, doğrusal olmayan analizlerde Denklem (8) ve (9)’de sunulan daha gelişmiş modeller kullanılmaktadır.

Doğrusal olmayan analizlerde etkin kesit rijitliklerinin kullanımı, yapılan analiz kabullerine bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Nitekim, yayılı plastik analizlerinde etkin kesit rijitlikleri doğrudan ilgili hücrelerden oluşan kesitlere sahip elemanların malzeme davranışından belirlerken, yığılı plastik analizlerinde ise plastik mafsallın oluşmadığı kısımlar için yönetmelikte tanımlanan değerler dikkate alınmaktadır.

$$(EI)_e = \frac{M_y L_s}{\theta_y^3} \quad (8)$$

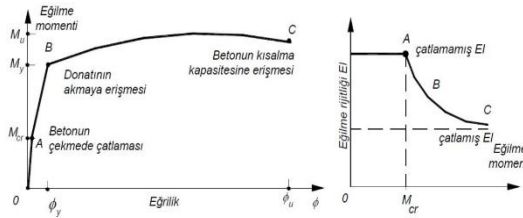
$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left(1 + 1.15 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\phi_y d_b f_{ye}}{8\sqrt{f_{ce}}} \quad (9)$$

Burada, $(EI)_e$ yığılı plastik davranışa göre modellenen kolon, kiriş, bağ kirişi veya perdenin etkin kesit rijitliğini; M_y etkin akma momentini; L_s kesme açıklığını; θ_y akma dönmesini; ϕ_y akma eğrilğini ve h kesit yüksekliğini göstermektedir. TBDY 2018 [6], η katsayısının kolon ve kirişlerde 1, perdelerde ise 0.5 olarak alınması gerektiğini belirtmektedir.

Çalışmada, eleman doğrusal olmayan etkin kesit rijitliklerinde, eleman kesitinin moment-eğrilik bağıntılarından (Şekil 3) yararlanılmıştır.

Tablo 2. TBDY 2018’ de etkin kesit rijitlikleri [6]

Betonarme taşıyıcı sistem elemanı	Etkin kesit rijitliği çarpanı	
	Eksenel	Kayma
Perde-döşeme (düzlem içi)		
Perde	0.50	0.50
Bodrum perdesi	0.80	0.50
Döşeme	0.25	0.25
Perde-döşeme (düzlem dışı)	Eğilme	Kesme
Perde	0.25	1.00
Bodrum perdesi	0.50	1.00
Döşeme	0.25	1.00
Çubuk Eleman	Eğilme	Kesme
Bağ kirişi	0.15	1.00
Çerçeve kirişi	0.35	1.00
Çerçeve kolonu	0.70	1.00
Perde (eşdeğer çubuk)	0.50	0.50



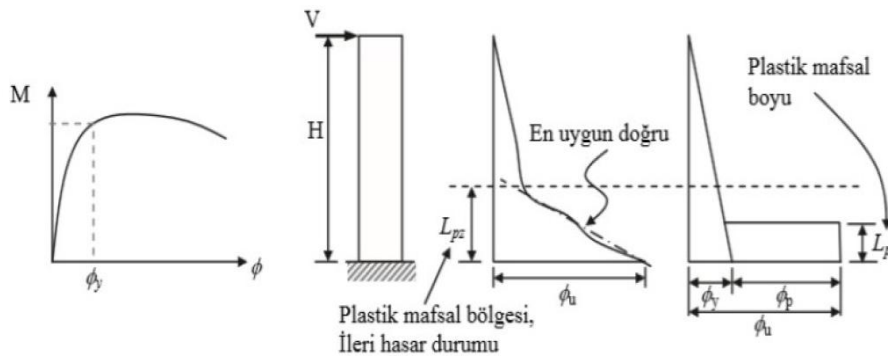
Şekil 3. Moment-eğrilik ilişkisi [10]

2.4. Plastik Mafsal Kavramı

Yapılar, özellikle şiddetli deprem etkileri altında doğrusal elastik davranıştan uzaklaşma eğilimi gösterir. Bu nedenle, tasarım sürecinde deprem yüklerinin doğrudan yapıya aktarılmasından ziyade, yapıya belirli bir düzeyde hasar toleransı kazandırılarak enerji sönümlenmesi sağlanması hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, yapıların sünek davranış sergilemesini ve deprem enerjisinin daha etkin şekilde dağıtılmasını amaçlamaktadır.

Doğrusal olmayan davranışın hakim olduğu bölgelerde yapısal hasarlar, çoğunlukla yüksek kesme kuvvetlerinin etkisi altındaki kolon-kiriş birleşim bölgelerinde başlamaktadır [11]. Bu kritik bölgelerdeki davranış, yapının genel süneklik performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, tasarım yönetmeliklerinde belirtilen özel hesap yöntemleri ve donatı detaylandırma kuralları, kesme kuvvetlerinin neden olabileceği gevrek kırılmaları önleyerek, yapı elemanlarının eğilme mekanizmasına göre daha sünek bir davranış sergilemesini sağlamaktadır. Böylece, deprem sırasında hasar oluşsa dahi, göçme riski minimize edilerek eğilme etkisi altında kontrollü ve sünek hasar meydana gelmesi amaçlanmaktadır.

Plastik mafsal, bir yapı elemanında plastik şekil değiştirmenin yoğunlaştığı belirli bir bölge olarak tanımlanmaktadır [12]. Bu bölgeler, genellikle eleman kesit yüksekliğinin yarısı kadar bir idealize edilmiş uzunluk ile modellenmektedir (Şekil 4).

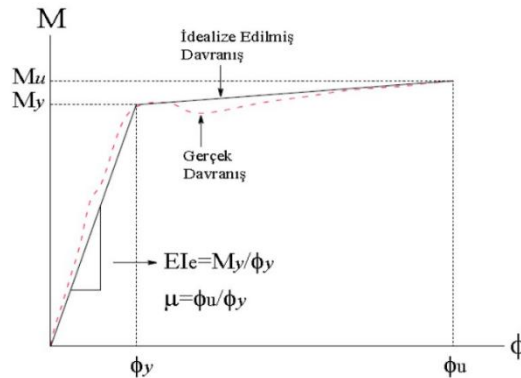


Şekil 4. Plastik mafsal modeli [10]

2.4.1. Yığılı Plastik Mafsal Modeli

Yığılı plastik mafsal modeli, yapıların doğrusal olmayan davranışların belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir tasarım yöntemidir. Bu modelleme yaklaşımında, plastik şekil değiştirmelerin olabileceği potansiyel bölgeler belirlenmekte olup bu bölgelerin eleman uçlarında yoğunlaştığı kabulü hakimdir. Dolayısıyla bu bölgelere özel plastik mafsal modellemeleri geliştirilir. Elemanların bu özel bölgeleri dışında kalan kısımlarında ise elastik davranış gösterdiği varsayımı yapılır. Plastik mafsal, sadece eğilme momenti (M_3) nedeniyle oluşan mafsal şeklinde tasarlanabileceği gibi, eksenel kuvvet ile çift doğrultulu eğilme momenti ($P-M_2-M_3$) nedeniyle oluşan mafsal şeklinde de tasarlanabilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde yapıların doğrusal olmayan dinamik davranışlarında etkin sonuçlara ulaşılabilir.

Bir elemanın mafsal özellikleri, kesitine ait moment-eğrilik bağıntısından elde edilmektedir. Bu bağıntı yardımıyla ilgili mafsalın dönme kapasitesi hesaplanabilmektedir. Şekil 5'te sunulan moment-eğrilik bağıntısına göre, plastik mafsalın maksimum dönmesi Denklem (10) ile belirlenmektedir.



Şekil 5. Betonarme bir kesite ait tipik moment - eğrilik ilişkisi [13]

$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y) L_p$$

(10)

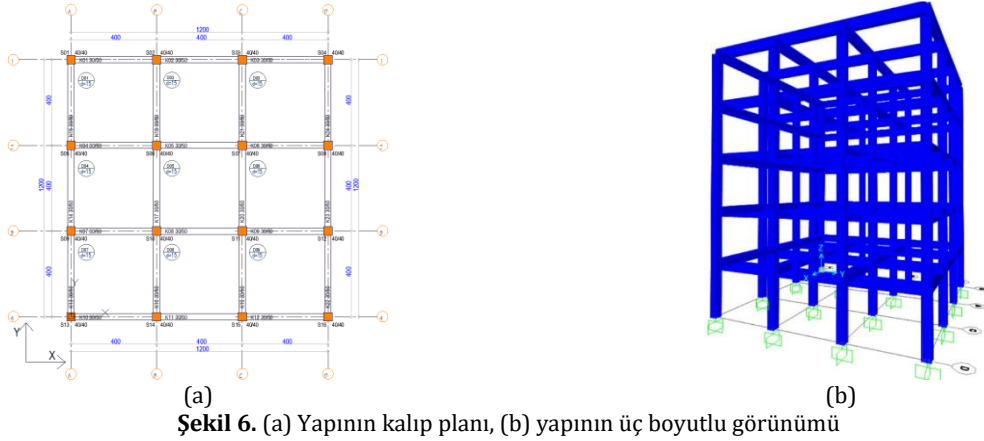
Burada, ϕ_u göçme öncesi toplam eğriliği, ϕ_y akma eğriliğini, L_p plastik mafsal boyunu, M_u göçme öncesi toplam momenti ve M_y akma momentini ifade etmektedir.

2.4.2. Yayıllı Plastik Mafsal Modeli

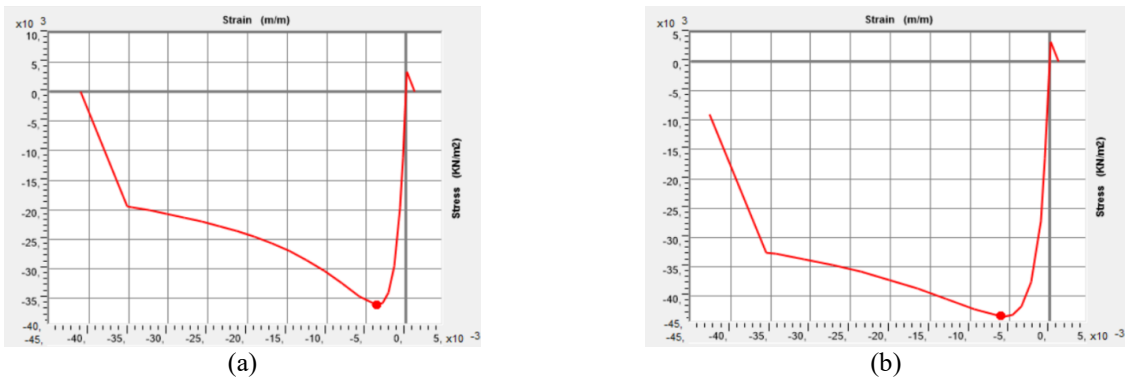
Yayıllı plastik mafsal modeli, plastik şekil değiştirmelerin yapı elemanı boyunca dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Bu model, daha gerçekçi sonuçlar sunmasına karşın, sayısal analizlerde yüksek hesaplama maliyeti gerektirmektedir [14]. Modelin doğruluğu, eleman boyunca tanımlanan integrasyon noktalarının sayısı ile doğru orantılıdır. Her bir integrasyon noktası, hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman boyunca belirli aralıklarla yerleştirilmiş kesit elemanlar ile temsil edilmektedir. Bu hücreye sahip kesitler, beton, donatı çeliği ve diğer malzemelerin doğrusal olmayan davranışını temsil eden belirli sayılarda bölünmüş küçük hücrelerden oluşmaktadır. Böylece, eleman etkin kesit rijitlikleri, doğrudan eleman birim şekil değiştirme değerlerini (uzama/kısalma) temsil eden kesit hücrelerinin davranış biçiminden belirlenebilmektedir. Bu tasarım modelinde, kesitlerin her zaman düzlemsel kaldığı kabul edilmekte olup, kesit hücrelerinin yalnızca düzlemsel uzama veya kısalma yapabildiği varsayılmaktadır.

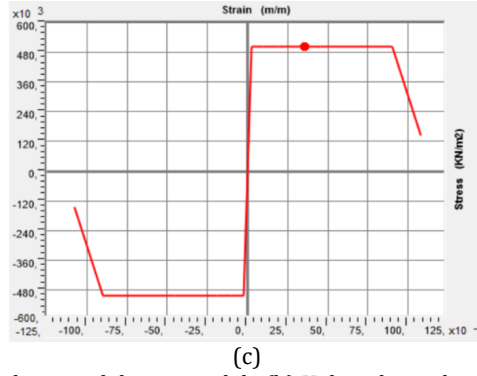
2.5. Sistem modelinin oluşturulması

Şekil 6'da, çalışmada dikkate alınan ve SAP2000 [15] programında modellenen beş katlı çerçeve sistemin kalıp planı ile üç boyutlu görünümü sunulmaktadır. İncelenen yapı beş katlı olup, her katın yüksekliği 3 m'dir. Yapının plan ölçüleri 12×12 m, döşeme kalınlığı ise 150 mm'dir. Taşıyıcı elemanlar C30 dayanım sınıfına sahip beton ile tasarlanmıştır. Kolon kesitleri 400×400 mm, kiriş kesitleri ise 300×500 mm boyutlarındadır. Kolonlarda boyuna donatı olarak 8φ16, kirişlerde ise alt ve üst donatı olarak 3φ16 kullanılmıştır. Enine donatı olarak tüm taşıyıcı elemanlarda φ8/100 mm sargı donatısı uygulanmıştır. Yapıda sabit ve hareketli yükler sırasıyla 175 kg/m² ve 200 kg/m² olarak tanımlanmış, ayrıca duvar yükü 4 kN/m olarak dikkate alınmıştır.



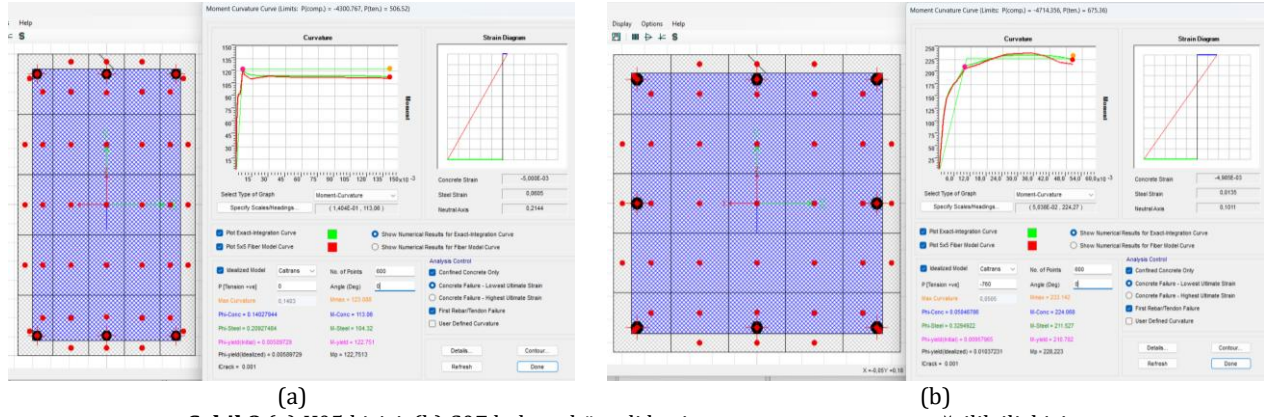
Şekil 7, çalışmada kullanılan beton ve donatı malzemelerinin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme eğrilerini sunmaktadır.



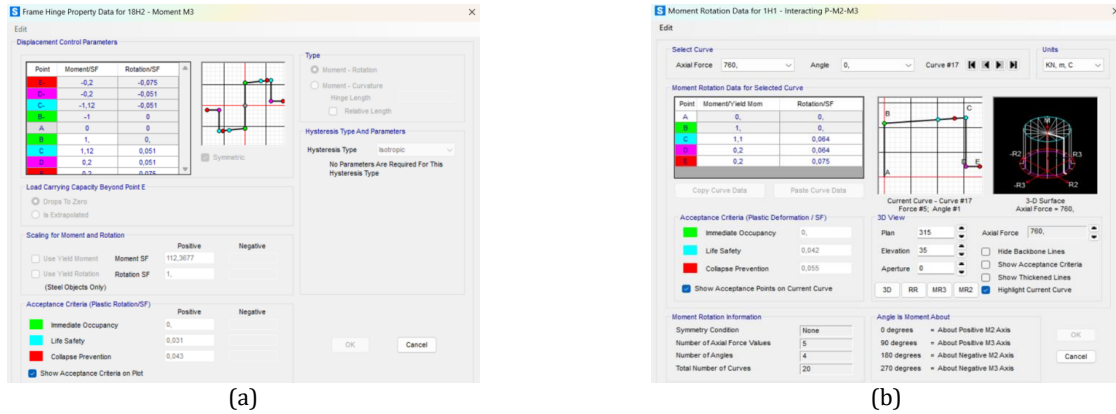


Şekil 7.(a) Kiriş elemanlarda kullanılan sargılı beton modeli, (b) Kolon elemanlarda kullanılan sargılı beton modeli, (c) B420 donatı çeliği modeli

Şekil 8’de, çerçeve sistemini oluşturan 400×400 mm boyutlarındaki kolonlar ile 300×500 mm boyutlarındaki kiriş elemanlarının doğrusal olmayan davranış analizlerinde kullanılan kesit özellikleri ve hücreye sahip kesit tasarımları gösterilmektedir. Bu doğrultuda Şekil 4’te gösterilen teorik plastik mafsal boyu hesabında 300x500 mm boyutlarındaki kiriş elemanlar için teorik plastik mafsal boyu $h_k/2$ den 250mm olmaktadır. Benzer şekilde 400x400 mm kolon elemanlar için ise 200 mm olmaktadır. Elemanların plastik dönme kapasiteleri, Şekil 8’de sunulan moment–eğrilik ilişkilerinden elde edilerek Denk. 13 yardımıyla hesaplanmıştır. Yayıllı plastisite analizlerinde ise Kolon ve kiriş elemanları her iki yön içinde 5 x 5 adet hücreli kesite bölünmüştür. Şekil 9, kolon ve kiriş elemanlarının yığılı plastisite davranışına ilişkin dönme kapasitesi tanımlarını göstermektedir.



Şekil 8.(a) K05 kirişi, (b) S07 kolonu hücreli kesit tasarımı ve moment – eğrilik ilişkisi.

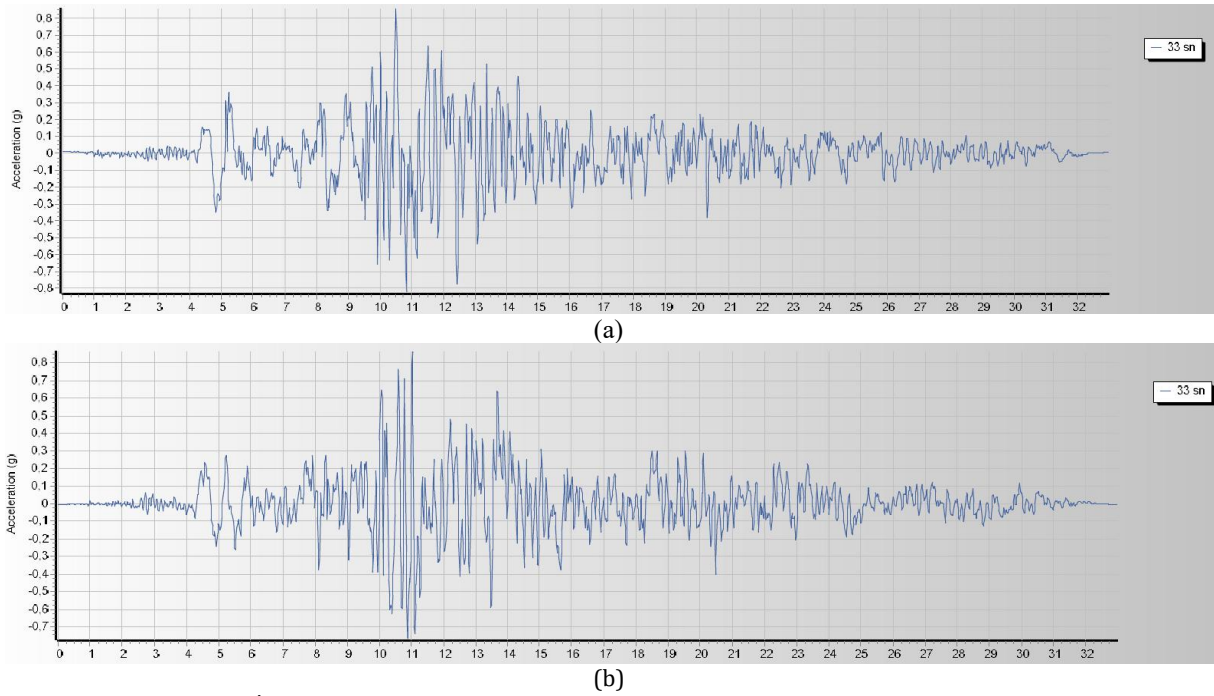


Şekil 9.(a) K05 kirişi için, (b) S07 kolonu için yığılı plastisite davranışında kullanılacak mafsal modeli

2.6. Depremsellik Verileri

Çalışmada, farklı plastisite model yaklaşımları arasındaki farkların doğrudan karşılaştırılabilmesi amacıyla, tek bir deprem ivme kaydı kullanılarak doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen deprem kaydının göreceli yüksek genlikli ivme değerlerine sahip olması ($a_{max} = 0,85g$), kaydın seçilmesindeki en önemli unsuru oluşturmuştur. Bu sayede eleman hasar seviyelerinde belirgin şekil değiştirme değerleri elde edilerek, karşılaştırmalarda daha net sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 10’da depremin yatay ivme

bileşenleri olan H_1 ve H_2 doğrultuları verilmiştir. Ölçekleme yapılmaksızın kullanılan İran Tabas depremine ait başlıca parametreler Tablo 3'te gösterilmiştir.

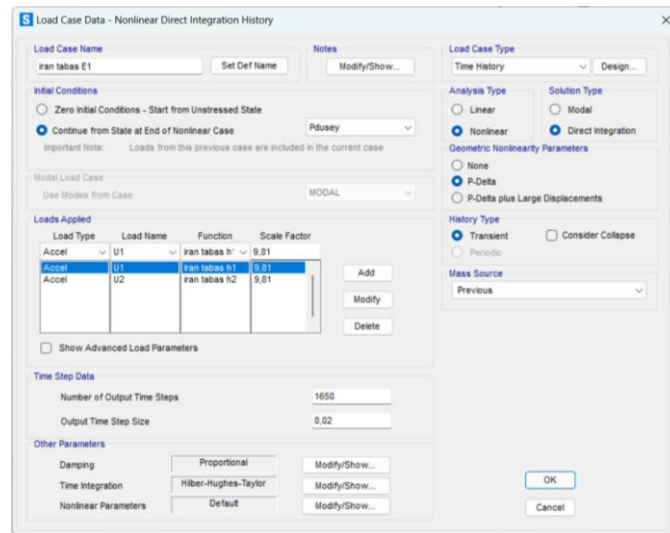


Şekil 10. İran Tabas deprem kaydına ait (a) yatay bileşen 1 (H_1), (b) yatay bileşen 2 (H_2)

Tablo 3. İran Tabas depremine ait diğer özellikler

Kayıt Sıra Numarası	Deprem	Yıl	İstasyon	Büyükölç (Mw)	V_{s30} (m/s)	Ölçek Katsayısı	ZamanAdım Aralığı (sn)
143	Tabas, İran	1978	Tabas	7.35	766.77	1,00	0.02

Şekil 11'da, zaman tanım alanında doğrusal olmayan davranış analizlerinde kullanılan İran-Tabas Depremi ivme kaydının SAP2000 [15] programına tanıtımı verilmiştir. Başlangıç adımında düşey yükler, sabit yük (G) ile hareketli yükün %30'unun (0,3Q) birleşimi şeklinde tanımlanmıştır. Hesaplamalarda %5 yapısal sönüm oranı dikkate alınmış olup, ayrıca P-Δ ikinci mertebe etkileri de analize dahil edilmiştir.



Şekil 11. İran-Tabas deprem ivme kaydının tanıtımı

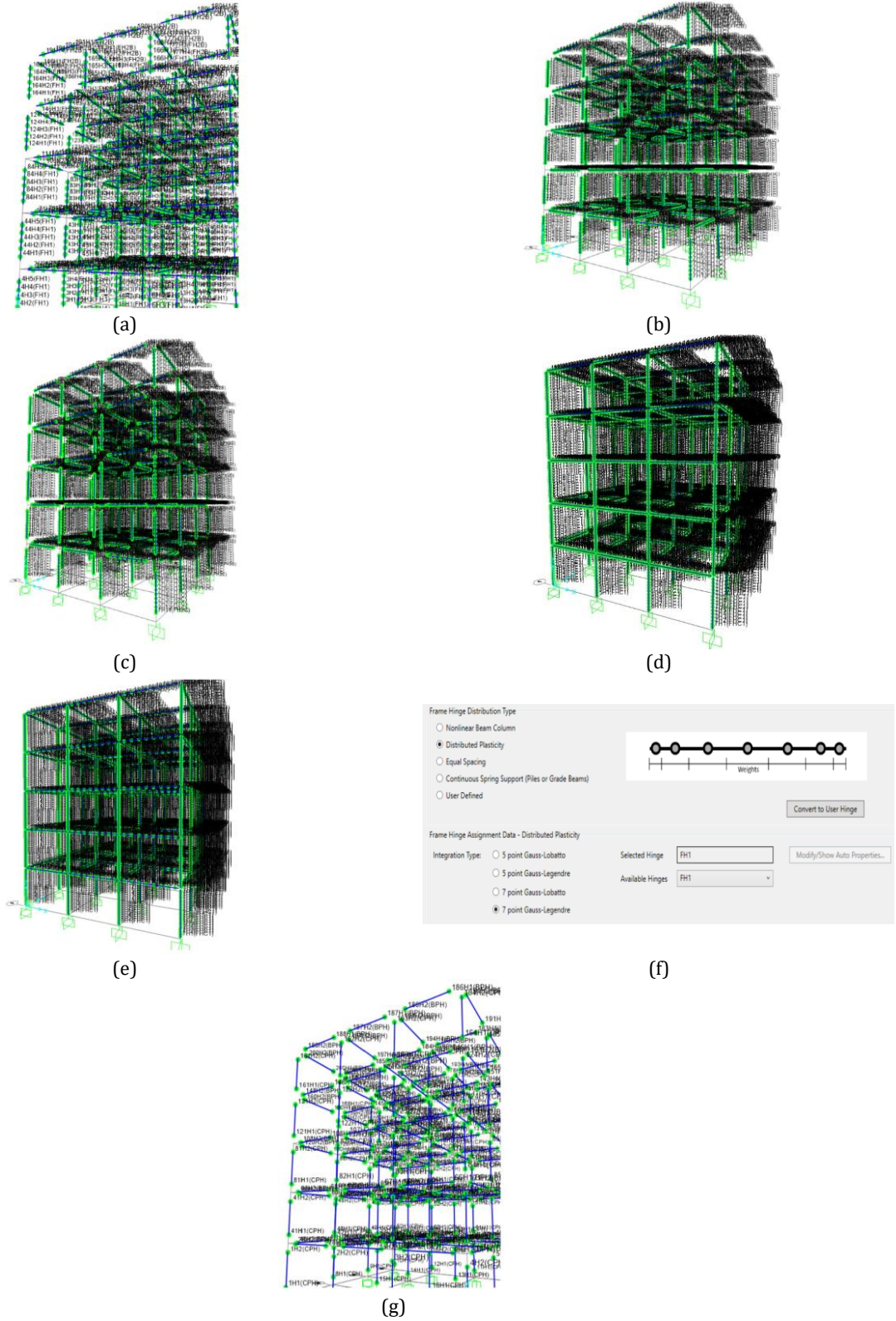
Zaman tanım alanı analizleri, doğrudan zaman integrasyon esasına dayanan Hilber-Hughes-Taylor (HHT) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin %5'lik viskoz sönüm oranına karşılık gelen Rayleigh sönüm katsayıları ise, modal bazlı periyot kontrolleri üzerinden belirlenmiştir.

Yayıllı plastisite analizlerinde dikkate alınması gereken bazı önemli hususlar bulunmaktadır. Bunların başlıcaları; hücreye sahip kesit sayısı, eleman boyunca yerleştirilen hücreli kesit adedi ve bu kesitlerin boylarıdır. Bu kabuller; eleman hasar düzeylerini, kesit rijitliklerini, analiz sürelerini ve dolayısıyla sistemin genel davranışını doğrudan etkilemektedir. Çalışmanın temel amacını oluşturan bu farklılıkların belirlenebilmesi için, ilerleyen bölümlerde ayrıntıları verilen altı farklı yayıllı plastik analiz modeli geliştirilmiştir.

Yığılı plastik analizlerde ise düşey taşıyıcı elemanların eksenel yük düzeylerinin doğru biçimde tanımlanması, analiz sürecinin kritik aşamalarından birini oluşturmaktadır. Bunun nedeni, eksenel yüklerdeki değişimin düşey elemanların eğilme kapasiteleri üzerinde olan etkileridir. Bu kapsamda, çalışmada her katın kolonları, ilgili kat döşeme alanlarından ve üst kat kolonlarından gelen eksenel yük değerleri dikkate alınarak tanımlanmıştır.

Böylece, altı adet yayıllı plastik model ve üç adet yığılı plastik model olmak üzere toplam dokuz farklı sistem modeli geliştirilmiştir. Aşağıda, söz konusu model tasarımları ve adlandırmaları özet biçimde sunulmuştur.

- **Yayıllı Plastik Model 1 (YAM1):** Şekil 12a'da görüldüğü üzere, kolon ve kirişler uzunlukları boyunca beş eşit küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip elemana bölünmüştür.
- **Yayıllı Plastik Model 2 (YAM2):** Kolon ve kirişler on eşit uzunlukta küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip elemana bölünmüştür (Şekil 12b).
- **Yayıllı Plastik Model 3 (YAM3):** Şekil 12c'de görüldüğü üzere, kolon ve kiriş uçlarında iki, orta bölgelerinde dokuz eşit uzunlukta küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman tanımlanmıştır.
- **Yayıllı Plastik Model 4 (YAM4):** Kolonlar on beş, kirişler on altı küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip elemana bölünmüştür. Bu modelde, kesit boyları teorik plastik mafsallı boyunu ifade eden $h/2$ oranına karşılık gelmektedir (Şekil 12d).
- **Yayıllı Plastik Model 5 (YAM5):** Kolonlar yirmi, kirişler ise sekiz eşit küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip elemana bölünmüştür (Şekil 12e).
- **Yayıllı Plastik Model 6 (YAM6):** Kolon ve kirişler, eleman uçlarında yoğunlaşacak şekilde yedi adet küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip elemana bölünmüştür (Şekil 12f).
- **Yığılı Plastik Model 1 (YIM1):** Kolon ve kiriş elemanlar üzerinde herhangi bir etkin kesit rijitliğinin kullanılmadığı hesap yaklaşımı benimsenmiştir (Şekil 12g).
- **Yığılı Plastik Model 2 (YIM2):** Kolon ve kiriş elemanlar üzerinde TBDY (2018) [6] yönetmeliğinde doğrusal analizler için tanımlanan etkin kesit rijitliklerinin kullanıldığı hesap yaklaşımı benimsenmiştir (Şekil 12g).
- **Yığılı Plastik Model 3 (YIM3):** Kolon ve kiriş elemanlar üzerinde TBDY (2018) [6] yönetmeliğinde doğrusal olmayan analizler için tanımlanan etkin kesit rijitliklerinin kullanıldığı hesap yaklaşımı benimsenmiştir (Şekil 12g).



Şekil. 12. (a) YAM1, (b) YAM2, (c) YAM3, (d) YAM4, (e) YAM5, (f) YAM6, (g) YIM1-2-3

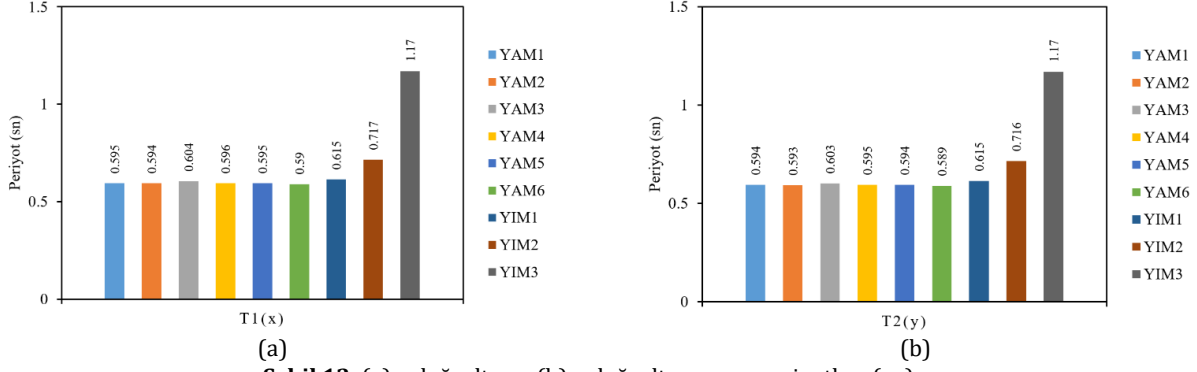
3. Bulgular

Bu kısımda sunulan sonuçlar, detayları Bölüm 2.6'da ayrıntılı biçimde açıklanan İran-Tabas depremine ait ivme kaydının kullanıldığı doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinden elde edilmiştir. Bu kapsamda, farklı sistemlere ait periyot, maksimum tepe yer değiştirme, taban kesme kuvveti, görelî kat ötelemesi, plastik mafsallı oluşumları ve analiz süresi gibi yapısal analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

3.1. Periyot Değerlerinin Karşılaştırılması

Yapı, görece olarak düzenli bir forma ve taşıyıcı sistem dağılımına sahip olduğu için, birinci ve ikinci mod şekilleri X ve Y doğrultularında, üçüncü mod ise burulma modu şeklindedir. Bu davranış biçimi, dokuz farklı analiz yaklaşımı için de geçerlidir. Ayrıca tüm modellerde ilk üç modun her biri, toplam kütle için yaklaşık %85'ini temsil eden kütle katılım oranına ulaşabilmektedir.

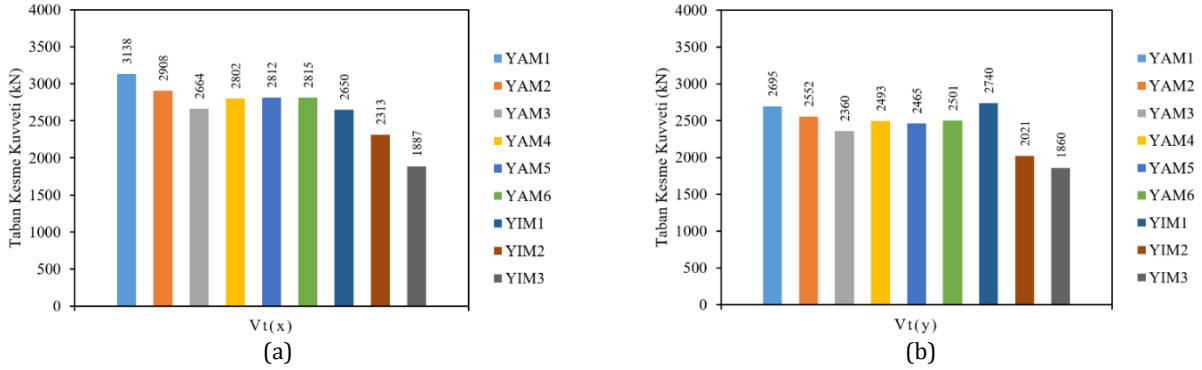
Şekil 13'te, dokuz farklı sistem modeline ait analizler sonucunda X ve Y doğrultuları için elde edilen periyot değerleri gösterilmektedir. Doğrusal olmayan analizlerde, en düşük etkin kesit rijitliklerine sahip YIM3 plastik mafsal modelinde, periyot değerlerinin diğer tüm sistemlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yayılı plastik mafsal modeline sahip sistemlerde ise birbirine yakın periyot değerleri elde edilmiştir.



Şekil 13. (a) x doğrultusu, (b) y doğrultusu yapı periyotları (sn)

3.2. Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

Şekil 14'te, dokuz farklı sistem modelinin İran-Tabas Depremi ivme kaydı kullanılarak elde edilen x ve y yönlerindeki taban kesme kuvvetleri ($V_{t(x)}$ ve $V_{t(y)}$) sunulmaktadır. YIM3 plastik mafsal modeline sahip sistemde, taban kesme kuvvetleri her iki yönde de görece düşük bulunmuştur. Yayılı plastik mafsal modeline sahip sistemlerde ise, YAM1 modeli dışında birbirine oldukça yakın taban kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti değerleri, beklenildiği gibi yapıların periyotları ile ters yönlü eğilim göstermiştir. Görece esnek ve yüksek periyotlu yapılar daha düşük taban kesme kuvveti değerlerine ulaşırken, daha rijit ve düşük periyotlu sistemlerde taban kesme kuvvetleri daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 14. (a) x doğrultusu, (b) y doğrultusu taban kesme kuvvetleri (kN)

3.3. Kolon ve Kiriş Donatı Uzama ve Beton Kısılma Değerlerinin Karşılaştırılması

Tablo 4 ve Tablo 5'te, dokuz farklı sistem modelinden seçilen örnek kolon ve kiriş elemanlarına ait donatı uzaması, beton kısılması ve dönme değerleri sunulmaktadır. Bulgulara göre, yayılı plastik mafsal modeline sahip elemanlarda belirgin şekil değiştirmeler gözlenirken, yığılı plastik mafsal modeline sahip sistemlerde ise plastik dönmelerin öne çıktığı görülmüştür.

S07 kolonunda elde edilen maksimum beton kısılması ve donatı uzaması değerleri incelendiğinde, en düşük değerlerin YAM1 modeliyle oluşturulan sistemlerde ortaya çıktığı görülmüştür. Teorik plastik mafsal boyunun ($h/2$), hücreli kesite sahip eleman boyu olarak tasarlandığı YAM4 modeli ile, elemanların uçlarda yoğunlaştığı YAM6 modelinde yaklaşık olarak benzer değerler elde edilmiştir. YAM3 ve YAM5 modellerinde ise birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Diğer yandan, S07 kolonunda en yüksek plastik dönme değerlerinin YIM1 modelinde olduğu görülmüştür.

K05 kirişi incelendiğinde, en yüksek beton kısalması ve donatı uzaması değerlerinin YAM3 modelinde olduğu görülürken, YAM6 modelinde elde edilen maksimum şekil değiştirmelerin, YAM3 modeline oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca K05 kiriş elemanında en yüksek plastik dönme değeri ise YIM3 modelinde oluşmuştur.

Tablo 4. Zemin kat S07 kolonunun doğrusal olmayan kısalma, uzama ve dönme analiz sonuçları

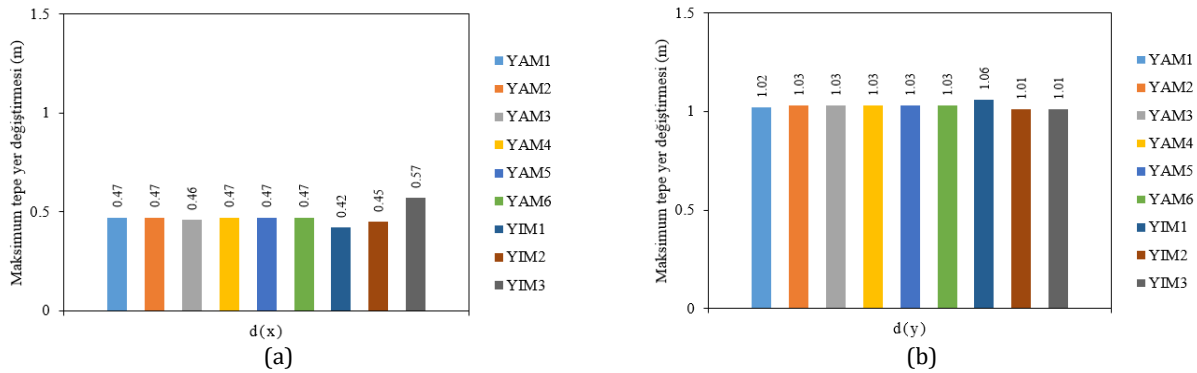
S07 kolonu (zemin kat)	Max. beton kısalma	Max. donatı uzama	Max. dönme
YAM1	-0.01	0.0285	-
YAM2	-0.0203	0.0546	-
YAM3	-0.0451	0.11	-
YAM4	-0.0321	0.0805	-
YAM5	-0.045	0.11	-
YAM6	-0.0321	0.0803	-
YIM1	-	-	0.0551
YIM2	-	-	0.0279
YIM3	-	-	0.0393

Tablo 5. Zemin kat B05 kirişinin doğrusal olmayan kısalma, uzama ve dönme analiz sonuçları

B05 kirişi (zemin kat)	Max. beton kısalma	Max. donatı uzama	Max. dönme
YAM1	-0.0006	0.00094	-
YAM2	-0.00071	0.00028	-
YAM3	-0.00085	0.00373	-
YAM4	-0.00078	0.00305	-
YAM5	-0.00068	0.00167	-
YAM6	-0.00084	0.0036	-
YIM1	-	-	0.0282
YIM2	-	-	0.0328
YIM3	-	-	0.0451

3.4. Tepe Yer Değiştirme Değerlerinin Karşılaştırılması

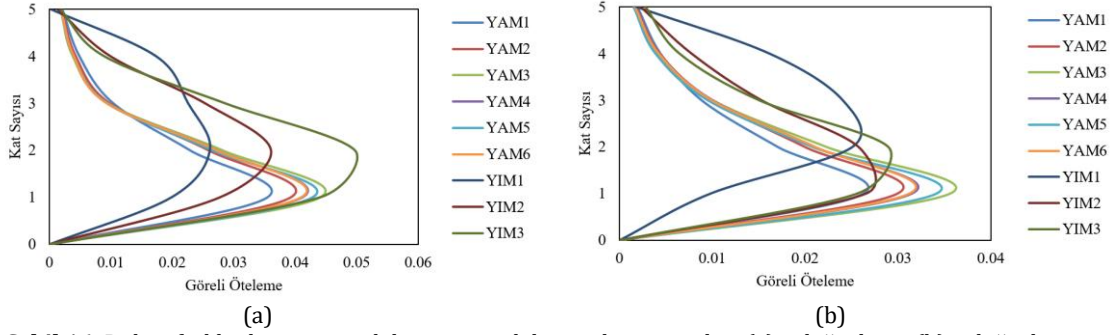
Şekil 15'te, dokuz farklı sistem modelinin analizi sonucunda X ve Y yönlerinde elde edilen tepe yer değıştirmedeğerleri ($d(x)$ ve $d(y)$) sunulmaktadır. Tepe yer değıştirme değeri incelendiğinde, aynı doğrultular için benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Ancak YIM3 sistemi özelinde, X yönündeki tepe yer değıştirme değeri diğer modellere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Y doğrultusunda ise tüm sistemlerde tepe yer değıştirme değeri birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 15. (a) x doğrultusu, (b) y doğrultusu maksimum tepe yer değıştirmeleri (m)

3.5. Göreli Kat Ötelemelerinin Karşılaştırılması

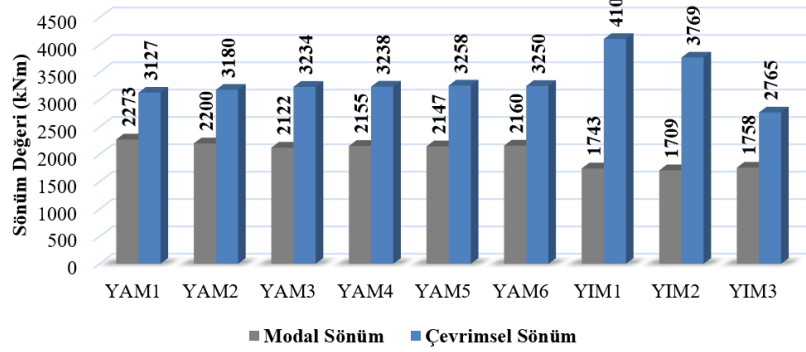
Şekil 16'da, dokuz farklı model yaklaşımına ait göreli kat öteleme oranı değeri gösterilmektedir. X ve Y yönlerindeki göreli kat öteleme oranları incelendiğinde, yayılı plastisite modellerinde elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Benzer bir eğilim, tepe yer değıştirme değeri de gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 15). Ancak yığılı plastisite modelleri incelendiğinde, etkin kesit rijitlik değeri azalma ile birlikte göreli öteleme oranlarının arttığı görülmektedir. Bu duruma örnek olarak, YIM1 modelinde X yönündeki göreli kat öteleme oranının 0,0261 olması ve bu değerin, 0,0497 göreli öteleme oranına sahip YIM3 modeline kıyasla yaklaşık %53 oranında daha düşük olması verilebilir. Yayılı plastisite modelleriyle en yakın göreli kat öteleme sonuçlarını veren yığılı plastisite modelinin YIM2 olduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu modellerin tepe yer değıştirme değeri benzerliklerle de tutarlılık göstermektedir.



Şekil 16. Dokuz farklı plastisite modeline ait göreceli kat öteleme oranları (a) x doğrultusunda (b) y doğrultusunda

3.6. Enerji Sönümlerinin Karşılaştırılması

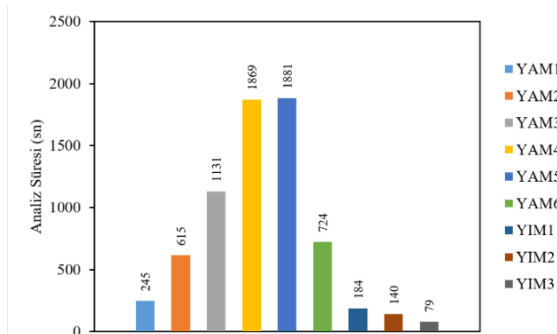
Şekil 17’de sunulan yapısal toplam enerji sönümleri incelendiğinde, yayılı plastisite analizlerinde modal ve histeretik (çevrimsel) sönüm değerleri bakımından birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Ancak bu durum, yığılı plastisite analizleri için geçerli değildir. Etkin kesit rijitliklerinin dikkate alınmadığı YIM1 modelinde doğrusal olmayan çevrimsel sönüm değerlerinin belirgin biçimde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Benzer bir durum, etkin kesit rijitlik değerlerinin YIM3 modeline göre daha yüksek olduğu YIM2 modelinin sonuçlarında da gözlemlenmektedir. Bu durum, yapının rijitleşmesine bağlı olarak deprem etkisinin (diğer bir ifadeyle enerjisinin) yapı geneline daha yüksek oranda iletilmesiyle açıklanabilir (bkz. Şekil 14).



Şekil 17. Enerji sönümlerinin karşılaştırılması

3.7. Analiz Sürelerinin Karşılaştırılması

Şekil 18’de, dokuz farklı sistem modelinin analiz sürelerine ilişkin sonuçlar sunulmaktadır. Çalışmada, i5-12450H işlemci, 8 GB DDR3 RAM ve 520 GB SSD depolama birimine sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Yayıllı plastisite modellerinin, yığılı plastisite modellere kıyasla analiz sürelerinde bariz bir fark görülmektedir. Özellikle, bir eleman boyunca küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman sayısı arttığında analiz süresi de, doğrusal olmayan bir şekilde artış eğilimi göstermektedir. YAM6 yayılı plastisite modeline sahip sistemin, YAM4 ve YAM5 modellerine sahip sistemlere göre analiz sürelerinin daha kısa sürdüğü görülmüştür. Bu sonuç, optimize edilen YAM6 modelinin daha verimli ve mühendislik uygulamaları açısından daha uygun bir yaklaşım modeli olduğunu göstermektedir.



Şekil 18. Analiz süresi (sn)

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, yayılı ve yığılı plastisite yöntemlerinin doğrusal olmayan davranış analizlerinde ortaya çıkardığı farklılıklar incelenmiştir. Beş katlı bir çerçeve sistem üzerinde dokuz farklı model değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Yayılı plastisite yaklaşımında, hücreli kesit eleman boylarının sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılmış; etkin kesit rijitlikleri, periyot, görel kat öteleme, taban kesme kuvveti, sönüm ve analiz süresi gibi parametrelerdeki değişimler incelenmiştir. Elde edilen başlıca bulgular şunlardır:

- **Periyotlar:** YIM3 plastik mafsal modeli ile analiz edilen sistemlerde elde edilen periyot değerleri, diğer yayılı ve yığılı plastisite model yaklaşımlarına kıyasla belirgin biçimde daha uzun bulunmuştur. Bu durum, yönetmeliğin doğrusal olmayan analizler için öngördüğü etkin kesit rijitlik katsayılarının görece düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan, yayılı plastisite analizlerinde elde edilen periyot değerleri, etkin kesit rijitliklerinin kullanılmadığı yığılı plastisite modelleriyle benzer sonuçlar vermiştir.
- **Taban Kesme Kuvvetleri:** En düşük taban kesme kuvveti değerleri, diğer model yaklaşımlarına kıyasla en yüksek periyot değerine sahip olan YIM3 modelinde elde edilmiştir. Yayılı plastisite modellerinde ise taban kesme kuvvetleri birbirine yakın değerler göstermiştir. Bulgular, taban kesme kuvvetinin yapı periyodu ile ters orantılı bir şekilde değiştiğini göstermektedir. Daha uzun periyotlu (esnek) yapılar daha düşük yatay kuvvetlere maruz kalırken, daha kısa periyotlu (rijit) yapılar ise daha yüksek yatay kuvvetlere maruz kalmaktadır.
- **Kolon Davranışı:** S07 kolonunda, betondaki maksimum kısalma ve donatıdaki maksimum uzama değerleri dikkate alındığında, en düşük hasarın YAM1 modelinde meydana geldiği belirlenmiştir. En hassas sistem davranışını temsil eden ve teorik plastik mafsal boyunun ($h_k/2$) küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman boyunu belirlediği YAM4 modeli ile, küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip elemanların uç bölgelerde yoğunlaştığı YAM6 modeline benzer olduğu görülmüştür. YAM3 ve YAM5 modelleri benzer şekil değiştirmeler sergilemiş olup, yığılı plastisite modelleri arasında en yüksek plastik dönme değeri YIM1 modelinde gözlenmiştir.
- **Kiriş Davranışı:** B05 kirişinde, betonun maksimum birim kısalması ve donatının maksimum birim uzaması değerlerinin en yüksek olduğu sistemin YAM3 modeline ait olduğu görülmüştür. Hücreli kesite sahip elemanların uç bölgelerde yoğunlaştığı YAM6 modeli ise bu açıdan YAM3 modeline göre oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Öte yandan, yığılı plastisite modellerinde en yüksek plastik dönme değerleri YIM3 modelinde gözlenmiştir.
- **Görel Kat Öteleme Oranları:** Yayılı plastisite model yaklaşımlarında görel kat öteleme değerleri birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Buna karşılık, periyot değerlerinde belirgin farklılıkların görüldüğü yığılı plastisite modellerinde, en yüksek görel öteleme oranı en uzun periyoda sahip YIM3 modelinde, en düşük oran ise YIM1 modelinde elde edilmiştir. Ayrıca, etkin kesit rijitliklerinin dikkate alınmadığı YIM1 modelinde oluşan maksimum görel öteleme değerinin, diğer tüm plastisite model yaklaşımlarına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- **Tepe Yer Değiştirmeleri:** Tüm sistemlerde tepe yer değiştirmelerinin genel olarak benzer dağılımlar sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak YIM3 modelinde, özellikle X doğrultusunda tepe yer değiştirmelerin diğer modellere göre yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Y doğrultusundaki değerler ise birbirine oldukça yakındır.
- **Sönüm Oranları:** Modal ve çevrimsel sönüm oranı sonuçları incelendiğinde, yayılı plastisite modellerinde elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Buna karşılık, yığılı plastisite analizlerinde çevrimsel sönüm oranları arasında daha belirgin farklılıklar oluşmuştur. En yüksek çevrimsel sönüm değeri YIM1 modelinde, en düşük değer ise YIM3 modelinde gözlemlenmiştir.
- **Analiz Süresi:** Yayılı plastisite modellerinin, yığılı plastisite modellerine göre belirgin biçimde daha uzun analiz süresine sahip olduğu görülmüştür. Özellikle bir eleman üzerindeki küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman sayısının artması, çözüm süresini doğrudan etkileyerek analiz sürelerinin önemli ölçüde uzamasına neden olmuştur. Buna karşın, plastik mafsalların uç bölgelerde yoğunlaştırıldığı ve teorik plastik mafsal boyunun, eleman uçlarındaki hücreli kesit boyu olarak tanımlandığı YAM6 modeli, küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman sayısı tamamen teorik plastik mafsal boyuna göre belirlenen YAM4 ve YAM5 modellerine kıyasla daha kısa sürede çözümlenmiştir. Bu durum, YAM6 modelinin hesaplama maliyeti açısından daha verimli ve mühendislik uygulamaları için uygun bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.
- **Etkin Kesit Rijitlikleri:** Tüm karşılaştırma sonuçları incelendiğinde, yayılı plastisite model yaklaşımlarındaki tasarım farklılıklarına rağmen yapısal davranış açısından birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna karşılık, etkin kesit rijitliklerinin dikkate alındığı yığılı plastisite modellerinde farklar belirgin biçimde ortaya çıkmaktadır. Örneğin, periyot değerlerinde %52'ye, taban kesme kuvvetlerinde %68'e, plastik dönme değerlerinde %63'e ve görel kat öteleme oranlarında ise %53'e varan farklılıklar olduğu belirlenmiştir.

Genel olarak, farklı modelleme yaklaşımlarının görel kat öteleme, periyot, taban kesme kuvveti, ve şekil değiştirme gibi önemli yapısal parametrelerde değişkenlikler gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu parametreler,

yapı tasarımında kritik unsurlar olup, doğru analiz yaklaşımının seçimi büyük ölçüde tasarımcının bilgi, deneyim ve öngörüsüne bağlıdır.

Yazarlar, etkin kesit rijitlikleri ve düşey yük değişimlerinin, yığılı plastisite yaklaşımıyla yapılan analizlerde farklı yapısal sonuçlara sebep olabileceğinden, özellikle düşey taşıyıcı elemanlarda yayılı plastisite modelinin kullanılmasının daha uygun olabileceğini değerlendirmektedir. Bununla birlikte, analiz süresinde tasarruf sağlamak amacıyla, düşey elemanlarda uç bölgelerde yoğunlaşan küçük hücrelerden oluşan kesitlere sahip eleman tasarımına sahip yayılı plastisite modellerinin tercih edilmesi önerilmektedir. Düşey yük etkisi altında olmayan giriş elemanlarda ise yığılı plastisite modellerinin kullanılması, hesaplama etkinliği açısından daha optimize bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, daha fazla deprem kaydının değerlendirilmesi, daha çok elemanda şekil değiştirme ölçümlerinin yapılması ve farklı taşıyıcı sistemler üzerinde incelemelerin genişletilmesi önerilmektedir.

Kaynakça

- [1] Esener, E. 2020. Plastisite Modellerinde Pekleşme Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi İle Tespiti. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(1), 171-181.
- [2] Sevinç, S., Bal, İ.E. 2018. Betonarme yapıların doğrusal olmayan analizinde yayılı plastisite modellerinin hassaslık analizi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(2), 907-918.
- [3] Değer Z.T., Başdoğan Ç. 2021. Betonarme perdelerin yığılı plastik davranış ile doğrusal olmayan modellenmesi ve hasar sınırları. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 36(2), 641-653.
- [4] Rahai, A.R., Fallah Nafari, S. 2013. A comparison between lumped and distributed plasticity approaches in the pushover analysis results of a PC frame bridge. International Journal of Civil Engineering, 11(4), 217-225.
- [5] Barbagallo, F., Cannizzaro, F., Pantò, B. 2023. Influence of the modelling approach on seismic response of frames. Engineering Structures, 288, 116252.
- [6] TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara.
- [7] Güler, M. 2025. Investigation of the effects of different earthquake scaling strategies on nonlinear structural behavior. Applied Sciences, 15(7), 3566.
- [8] Mansouri, I., Kontoni, D.P.N., Pouraminian, M. 2023. The effects of selection and scaling procedures of earthquake records on the seismic response dispersion of structures and recommendations toward seismic upgrading of codes. SN Applied Sciences, 5(7), 1005.
- [9] DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık İmar ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [10] Kazaz, İ., Gülkan, P. 2012. Süneklik Düzeyi Yüksek Betonarme Perdelerdeki Hasar Sınırları. İMO Teknik Dergi, 6113-6140.
- [11] Damcı, E. 2008. Yapıların Doğrusal Olmayan Çözümlemesi Ve Deprem Performansları. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 151s,
- [12] Kürkçü, F. 2019. 20 Katlı Betonarme Bir Yapının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Tasarımı ve Bina Performansının Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 237s, İstanbul.
- [13] Akkaya, A. 2014. Betonarme Kolon Davranışının Moment Eğrilik İlişkisi İle Parametrik Olarak İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, Sakarya.
- [14] Özmen, H.B., İnel, M., Bilgin, H. 2007. Betonarme Elemanların Doğrusal Ötesi Davranışlarının Modellenmesi. 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, Türkiye, 207-216.
- [15] SAP2000. Integrated Software for Structural Analysis and Design Program. Computers and Structures Inc., Berkeley, California.