

## YÜKSEK YAPILARIN PERFORMANS ESASLI TASARIMI

E. Budak<sup>1</sup> ve H. Sucuoğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Araştırma Görevlisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara

<sup>2</sup>Profesör, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, Ankara

E.posta: [budak@metu.edu.tr](mailto:budak@metu.edu.tr)

### ÖZET

Son yıllarda ülkemizde şehirlerde nüfus giderek çoalmakta ve buna bağlı olarak yüksek yapılara olan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Geleneksel yapı sistemlerinden farklı olarak; yüksek yapılarda gelişen teknoloji ve yüksek dayanımlı malzemeler kullanılmasına bağlı olarak daha yenilikçi yapı sistemleri kullanılmaktadır. Yüksek yapılarda geleneksel kuvvet esaslı yapı analiz yöntemleri yerine son yıllarda performans dayalı tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada öncelikle yüksek yapıların tasarımında performans esaslı yaklaşımların neden gerekli olduğu açıklanacaktır. Daha sonra yapısal elemanların elastik ötesi modelleme yöntemleri üzerinde bir değerlendirme yapılarak yüksek yapılar için gerekli performans kriterleri üzerinde durulacaktır. Son olarak, İstanbul'da inşae edilmesi planlanan (birinci derece deprem bölgesi) ve TDY 2007'de önerilen kriterlerle uyumlu olarak tasarlanmı 34 katlı bir konut binasının, elastik ötesi zaman tanım alanında 7 farklı (çift yönlü) deprem etkisi altında analizleri yapılarak iki farklı performans seviyesi için performans kriterleri kontrol edilmiştir. Belirlenen performans kriterleri tespit edildikten sonra tasarım revize edilip seçilen deprem etkileri altında tekrar elastik ötesi zaman tanım alanında analizler yapılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Yüksek yapılar, performans esaslı tasarım, deprem, dörusal olmayan analiz

### 1. GİRİŞ

1899 yılında New York'ta inşa edilen 119 metre yüksekliindeki "Park Row Building" in yüksek katlı binalara ilk örneği teşkil ettiğini kabul edilmektedir. Bu yapıdaki esas amaç mümkün mertebede en fazla güneş ışığından yararlanmak amacıyla kullanım alanını artırmaktır. 19.yy sonları ve 20.yy başlarında yapılan çoou yüksek bina gibi, bu bina da çelik çaprazlı çerçeve yapı sistemi kullanılarak yapılmıştır. Yapı malzemelerinin davranışlarının çok iyi bilinmemesi, analiz metodlarının ve teknolojik ekipmanlarının yetersizliğine rağmen, 1931 yılında yapı yüksekliiki "Empire State Building" binasının yapımıyla 381 metreye ulaşmış fakat bu binada dönemin diğer binalarında da gözlemlendiği üzere gereğinden fazla malzeme kullanıldığı gelişen teknolojiyle birlikte ispat edilmiştir [M.M.Ali ve K.S.Moon, 2007]. O dönemden bugüne, şehirlerdeki nüfus arttı ve şehirler de giderek büyümeye başladı. Bunun paralelinde arsa fiyatlarının yükselmesi de kaçınılmaz oldu. Diğer taraftan, gelişen teknoloji ve yüksek dayanımlı malzemeler kullanılmasına bağlı olarak daha yenilikçi yapı sistemleri kullanılmaya ve diğer etkiler karısında yapının davranışında daha gelişmiş analiz metodları ile tahmin edilmeye başlandı. Bunların hepsi bir arada düşünüldüğünde, mühendislik ve mimari biliminin daha da ön plana çıktığı daha yenilikçi yapı sistemlerinin kullanıldığı modern yüksek yapılar hayatımızda yer edinmeye başladı. Kar amacı gütmeyen bir kuruluş olan The Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH interaktif veri tabanı) 2015 yılı verilerine göre (Tablo 1) 100 metreden yüksek yaklaşık olarak yedi bin yapı ve binden fazla bina da yapı amaçlarında bulunmaktadır. Ayrıca yine CTBUH verilerine göre on binlerce yüksek binanın yapılması da planlanmaktadır. Çelik çaprazlı çerçeve yapı sistemini kullanan ilk yüksek yapılara nazaran, betonarme ve kompozit yapı sistemlerinin kullanımı giderek artmaktadır. Son yıllarda görülüyor ki yüksek yapılara olan ihtiyaç giderek artmakta ve yapının davranışının daha gerçekçi yöntemlerle belirlenmesi için performans esaslı tasarım yöntemlerinin kullanılması da ön plana çıkmaktadır.

Bir yapının performansı demek, daha önce belirlenen deprem riskleri altında yapının ne düzeyde hasar göreceği ve bu hasarın yapının güvenliğini ve kullanımını hangi düzeyde etkileyeceğini daha gerçekçi olasılıklarla tahmin

etmektedir [Sucuo lu, 2015]. Farklı deprem tehlikesine ve yapının türüne ba lı olarak bir yapıda hemen kullanım, can güvenli i, göçme öncesi ve göçme durumu performans düzeyleri tanımlanabilir. Yüksek yapıların tasarımında ise genellikle iki performans seviyesi dikkate alınır. Birincisi, tekerrür süresi 43~72 yıllık küçük depremler etkisi altında hemen kullanım performans düzeyi, di eri ise tekerrür süresi 2475 yıllık güçlü depremler altında yapının göçme öncesi performans düzeyini sa lamasıdır. Bir yapının performansı hem elastik hem de elastik ötesi analiz yöntemleri kullanılarak belirlenebilir. Yüksek yapıların performans esaslı tasarımında özellikle elastik ötesi hasar oluşması durumunda zaman tanım aralığında do rusal olmayan analiz yöntemleri kullanılması gerekmektedir. Bunun sebepleri bir sonraki bölümde ayrıntılarıyla açıklanacaktır. Ayrıca bu çalı mada, zaman tanım aralığında do rusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak yapının performans seviyesinin belirlenmesi üzerinde durulacaktır.

Tablo 1. 2015 yılına kadar bölgelere göre bitirilen ve yapıma amasında olan 100m'den yüksek binalar

Bölge	Ülke sayısı	Yapımı Tamamlanmış		Yapım a amasında	
		Bina sayısı	Yüzde %	Bina sayısı	Yüzde %
K.Amerika	3	2508	36.74	178	17.23
Asya	32	2480	36.33	592	57.31
Avrupa	48	672	9.84	84	8.13
Orta Do u	13	413	6.05	69	6.68
G.Amerika	11	216	3.16	39	3.78
Okyanusya	5	322	4.72	52	5.03
O.Amerika	18	118	1.73	14	1.36
Afrika	39	98	1.44	5	0.48
Toplam	169	6827		1033	

Yüksek yapılar denilince aklımıza gelen ilk soru muhtemelen yüksek yapılar nedir sorusudur. Hepimizin verebilece i ilk cevap yapının yüksekli le alakalıdır. Kesin bir tanımı olmamakla beraber, deprem arnamelerinde ve alternatif tasarım dokümanlarında farklı tanımlar yapılmaktadır. Örne in, LATBSDS (2015), AB-083, PEER-TBI (2010) göre yaklaşık 50 metreden yüksek binalar, stanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeli i'ne ( YBDY) göre de 60 metreden yüksek binalar yüksek bina kategorisine girmektedir. Ayrıca yine YBDY göre 75 metreden yüksek binalar farklı bir kategoride de erlendirilmektedir. CTHBUH ise bu yönetmenliklerden farklı olarak sadece yüksekli i dikkate almamı , bunun yerine bir yapının yüksek bina davranı şı sergileyebilecek bir narinlikte olup olmadığı na ve yenilikçi bir ta rıyıcı sistem kullanıp kullanılmadığı na göre bir binayı yüksek bina kategorisine almaktadır. Ama u bir gerçek ki, orta ve dü ük yükseklikteki yapı sistemlerinden farklı olarak, yapı yüksekli i artıça yapının mimari özellikleri de i mekte ve yapıya etki eden yatay ve dü ey yüklerin etkileri artmaktadır. Bu sebeplerden ötürü geleneksel analiz ve yapıım yöntemleri yüksek yapılar için yetersiz kalmaktadır. Bu ihtiyaç yeni alternatif tasarım ve analiz yöntemlerinin geli mesine önayak olmu tur. Genellikle mevcut deprem arnameleri ve yönetmenlikler buna izin vermektedir. Örne in, International Building Code (IBC, 2012), ASCE/SEI 7-10 (2010) ve San Francisco Building Code (2013) alternatif olabilecek analiz yöntemleri ve malzemelerin kullanımına izin verir. Lakin kullanılacak malzemelerin yönetmenlikte verilen minimum dayanım ve dayanıklılı ı sa ladı ı deneylerle kanıtlanmı olması ve analiz yöntemlerinin de uzmanlı ını belgelerle kanıtlamı uzman ki ilerini gözetimi altında yapılması artına ba lamaktadırlar. Yüksek yapıların performans esaslı tasarımı için LATBSDC(2015), SFBID (2014), TBI (2010), YBDY (2008), CTBUH (2008) ve SEONAC (2007) a ırlıklı olarak do rusal olmayan dinamik yöntemlere dayanan alternatif dokümanlar yayınlamı tur.

## 2. YÜKSEK YAPILARIN PERFORMANS ESASLI TASARIMI

Betonarme yüksek yapılar genellikle merkezinde bir çekirdek perdesi ve çevresinde yo unlu u az olan bir çerçeve yapı sistemine sahip olarak tasarlanır. Geleneksel yapı sistemlerinden farklı olarak yüksek yapılarda,

çekirdek perde duvarlar yatay yüklerden oluşacak etkilerin yanında düşey yük etkilerinin de önemli bir kısmını karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu yüzden normal yapılardan farklı olarak, yüksek yapıların yapı sisteminde oluşacak aşırı bir hasar yapının kullanılabilirliğini tehlikeye sokabilir. Bu sebepten ötürü yüksek yapıların göçmeye karşı güvenlik faktörü düşüktür.

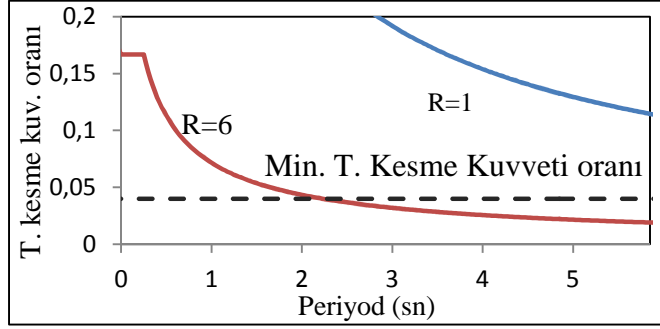
Yüksek yapıları daha gerçekçi mühendislik yaklaşımlarıyla tasarlamak için NDA'nın (Nonlinear Dynamic Analysis, Doğrusal olmayan dinamik analiz) kullanılması aşağıdaki belirtilen sebeplerden ötürü için gereklidir. Fakat NDA'nın uygulanabilmesi için yapısal elemanların ön tasarımı yapılmış olması ve gerekli donatıların belirlenmiş olması gerekir. Yüksek binalarda, büyük doğal periyotlara sahip olmalarından ötürü, genellikle yönetmenlikteki minimum taban kesme kuvveti koşulu tasarımda etkili olur. Ön tasarım aşamasında alternatif arnameler kendi aralarında farklılıklar gösterir. Her biri farklı yaklaşım vardır: iki aşamalı süreç ve üç aşamalı süreç. Yapılar tasarlanırken esas amaç öngörülen deprem altında yeterli güvenli ve sünekliği sağlamaktır. Mevcut deprem arnamelerindeki koşullarda elastik yöntemlerle (azaltılmış kuvvetlerle) ve kapasite tasarım ilkeleri ile dolaylı olarak bu sünekliği sağlamaktadır. Lakin mevcut deprem yönetmenlikleri yüksek yapıların tasarımı için çok kısıtlayıcı ve noksanlıkları olabilir. İki aşamalı süreç yöntemi ön tasarım ve iki farklı performans kontrolüne dayanır. Ön tasarım tamamıyla tasarım mühendisinin bilgi ve tecrübesine bırakılmakta, yani başka bir deyişle mevcut elastik yöntemlere dayalı deprem arnameleri tamamıyla yok sayılmaktadır. Belirtilen performans kriterleri (küçük deprem etkisi altında hemen kullanım performans düzeyi ve güçlü deprem etkisi altında da göçme öncesi performans düzeyini sağlaması beklenilmektedir. Eğer sağlanmayan performans kriterleri varsa ön tasarım revize edilmekte ve buna bağlı olarak yine iki aşamalı performans analizleri yapılmaktadır. Bütün öngörülen performans kriterleri sağlandı mıda tasarım sonlandırılmaktadır. Üç aşamalı süreç yaklaşımında ise, ön tasarım normal binalarda olduğu gibi deprem arnamesine göre yapılmaktadır yani minimum taban kesme kuvveti artırılması sağlanması gerekir. Eğer uygulanamayan bir durum ya da yönetmenlikte açıklanamayan bir husus varsa belirtilir. Ondan sonra iki aşamalı süreçte olduğu gibi yapının iki farklı performans düzeyine göre gerekli kontrolleri yapılır. Gerekli bütün koşullar sağlandı mıda tasarım sonlandırılır. Özetleyecek olursak, NDA yönteminin uygulanabilmesi için ön tasarımın yapılmış ve gerekli donatıların belirlenmiş olması gerekir. İyi bir NDA için iyi bir ön tasarım şarttır. Ön tasarımı kötü yapılmış bir yapıya NDA uygulanması optimum bir çözüm sunmamaktadır. Minimum taban kesme kuvveti koşulu ön tasarımı da direkt etkilediği için ara tirmacılar arasında ortak bir payda da bulunmamaktadır. LATBSDC ve PEER/TBI iki aşamalı süreci, YBDY, SEONAC ve SFDBI üç aşamalı süreç yaklaşımını önermektedir.

### 2.1. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz (Nonlinear Dynamic Analysis, NDA) Yönteminin Yüksek Yapılar İçin Uygulanmasının Gereklilikleri

Performans esaslı yüksek yapı tasarımında en önemli sorulardan biri de belirlenen performans seviyelerinin kontrolü için hangi analiz yönteminin kullanılacak olmasıdır. Hemen kullanım performans düzeyi için yapının elastik kalması ve kalıcı herhangi bir hasarın oluşmaması öngörülmektedir. Bu aşamada mod birleştirme yöntemi (spektrum analizi) ya da doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleri uygulanabilir. Ama göçme öncesi performans seviyesi için doğrusal olmayan dinamik yöntemleri uygulanması gereklidir. Bunun sebeplerini iki ayrı başlık altında toplayabiliriz. Birincisi spektrum analizi yöntemine dayanan mevcut deprem arnamelerinin yetersizliği ikincisi ise doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin eksiklikleri olarak gruplandırılabilir.

Yüksek yapılarda NDA yönteminin kullanılması zorunluluğunu anlamak için ilk önce mevcut arnamelerin dayandığı temel ilkeleri iyi kavramak gerekir. Yapısal binalar tasarlanırken genellikle mevcut tasarım ve güçlü depremler etkisi altında daha ekonomik bir tasarım için elastik ötesi davranışa izin verilir. Mevcut deprem arnameleri bunun için yapının taşıyıcı sistem türüne ve süneklik düzeyine göre belirlenen taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ile azaltılmış deprem yükleri altında elastik analiz yöntemleri kullanılarak ve bazı ilkeleri (kuvvetli kolon - zayıf kiriş, vb.) sağlanarak dolaylı olarak yapının elastik ötesi davranışını

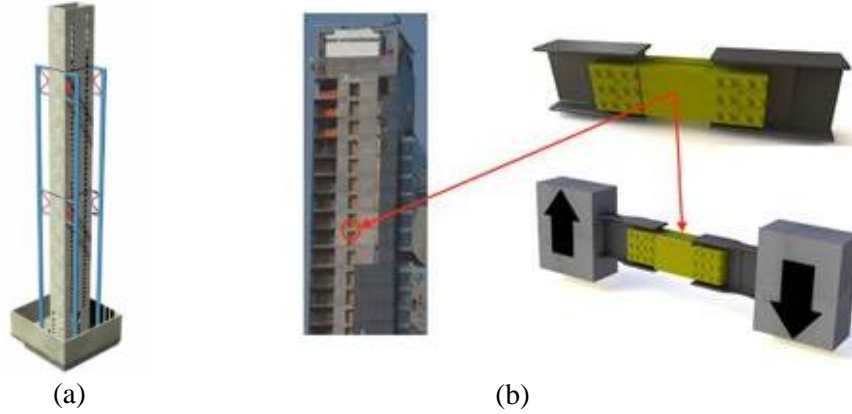
dikkate alır. Elastik yöntemlerle bu hasarın yeri ve miktarı bilinmez ama kapasite tasarım ilkeleri kullanılarak sünek bir yapı tasarlanmıştır ve bu farz edilir. Orta ve düşük katlı binalarda bu mantıklı bir yaklaşımdır. Fakat yüksek yapılar uzun periyoda sahip yapılar olduğundan ( $>3s_n$ ) ekil 2’de görüldüğü gibi tasarım esnasında minimum taban kesme kuvveti koşulu belirleyici rol oynar. Bu esnasında artınamanın önerdiği R katsayısından daha düşük bir R katsayısı kullanmasına sebep olur. Bu da yüksek yapılar için seçilecek R katsayısının çok da bir anlam ifade etmediğini göstermektedir.



ekil 2. Tasarım spektrumu ve minimum taban kesme kuvveti oranı

Mevcut Türk deprem artnamesinde olmamakla birlikte Amerikan deprem artnamesi (ASCE/SEI 7-10, 2010) seçilen taşıyıcı sistem türüne göre yapı yüksekliğine bir sınırlama koymaktadır. Ayrıca yapının periyodu da sınırlanmaktadır. Bir diğer taraftan yapının düzensizliğine göre ekstra detaylandırma ve donatı koşulları da mevcuttur. Zaman tanım aralığında dinamik yöntemlere dayanan alternatif dokümanlar (kodlar) mevcut artnamedeki bahsedilen eksiklik veya kısıtlayıcı faktörleri elemine ederek tasarımcının daha rahat davranmasını sağlar. Ayrıca, yüksek binalarda ekil 3’de görüldüğü gibi yenilikçi yapı sistemleri kullanılabilir. Bunlardan birincisi çelik çaprazlarla güçlendirilmiş çekirdek perde duvarlı yapı sistemi diğerlerine göre belli bazı katlarda bükülme eğilimi yerine enerji sönmüleyici viskoz damperler kullanılan bir taşıyıcı sistemdir. Bu yenilikçi yapı sistemlerinin yapı davranışına etkisini mevcut elastik yöntemlerle belirlemek mümkün değildir. Ayrıca bu yenilikçi yapı sistemlerinin tasarım kriterlerine ilişkin kurallar mevcut artnamelerde bulunmamaktadır. Bu sebeple bu tip yapıların yük taleplerine nasıl tepki verecekleri ancak NDA kullanılarak belirlenebilmektedir. Bunlara ek olarak, diğer önemli sebeplerden biri de ekonomidir. Yüksek yapılar maliyeti yüksek ve binlerce insanın yaşamını sürdürdüğü yaşam alanlarıdır. Ayrıca geleneksel yapılardan farklı olarak ciddi yatay ve dikey yük etkilerine maruz kalırlar. Bu yüzden bu yapılar tasarlanırken bu etkileri karşılayabilmek için dayanım ve dayanıklılığı yüksek yapı malzemeleri ve ekil 3 görüldüğü gibi yenilikçi yapı sistemleri kullanılır. En ekonomik ve güvenilir sonuçlara NDA yöntemiyle ulaşılabileceği kabul edilir.

Birçok doğrusal olmayan statik yöntem geliştirilmesinden dolayı yüksek yapıların tasarımında doğrusal olmayan statik yöntemlerin (itme analizi) kullanılmamasının sebepleri çok değildir. Ama en önemli neden olarak geleneksel itme analizinin yapının birinci doğal periyoduna dayanması ve diğer taraftan yüksek mod etkilerinin yüksek yapılarda oldukça etkili olduğu gerçektir. Yüksek modları dikkate alan itme analizleri göz önüne alınırsa yapının genel davranışı ve elemanlardaki yer değiştirmeleri gerçeğe yakın bir olasılıkla tahmin edilmesine rağmen iç kuvvetlerin gerçek değerlerinden oldukça uzak olduğu görülmektedir. Çünkü bu yöntemler her bir modun etkisini istatistiksel kurullarla [CQC, SRSS] birleştirilmektedir. Diğer bir takım gelişmiş yüksek mod etkilerini dikkate alan itme analizi yöntemleri düşünüldüğünde bu eksikler giderilmesine rağmen bu yöntemlerin uygulaması standart değildir [Soner, 2013]. Bir başka deyişle yeni geliştirilen itme analizleri NDA analizinden daha karmaşık ve zaman alıcı bir hal almıştır. Son olarak; yüksek modları dikkate alan hiçbir doğrusal olmayan statik yöntem mevcut ticari analiz programlarına uyarlanmamıştır ve daha çok ara tırmaya dayalı programlarla yapılmaktadır.



ekil 3. Çelik çaprazlı perde duvarlı sistem (a) ve enerji sönmüleyici viskoz damperli sistem (b)

### 3. ELASTİK ÖTESİ MODELLEME YÖNTEMLERİ VE ELEMAN TİPLERİ

Lineer analiz yöntemlerinden farklı olarak doğrusal olmayan analiz yöntemleri bir çok akılcı varsayıma dayalı efektif yöntemlerdir. Bu nedenle aynı yapı farklı yüklerde modellenilebilir ve farklı sonuçlar elde edilebilir. Temel olarak doğrusal olmayan dinamik yöntem üç aşamadan oluşmaktadır: i- Model oluşturulması, ii- analiz aşaması ve iii- analiz sonuçlarının değerlendirilmesi aşaması. Modelleme aşamasında yapılan akılcı varsayımlar ve bu varsayımların yapı üzerindeki etkisinin çok iyi değerlendirilmesi gerekmektedir. Performans düzeyine göre yer hareketi seçimi ve kullanılan analiz programının güvenilirliği yapının davranışını daha gerçekçi bir şekilde tahmin etmek için çok önemlidir. Model oluşturulması ve analiz aşamaları kullanılan analiz programına direkt olarak bağlı olarak sonuçların yorumlanması mühendise ve belirlenen performans kriterlerine bağlıdır.

Performans esaslı yüksek yapı tasarımında NDA yöntemi kullanıldığında malzemenin karakteristik veya tasarım dayanımları yerine ortalama dayanımları dikkate alınır. Buradaki amaç yapının davranışını daha tarafsız ve daha gerçekçi bir yaklaşımla tahmin etmektir. Tasarlanan yapıda kullanılacak malzemelerin deneysel sonuçları var ise bu değerlerin kullanılması öncelikli tercihtir. Lakin çoğu zaman malzeme üretimi tasarım aşamasından sonra gerçekleştiği için tasarım aşamasında ortalama dayanım değerlerine ulaşmak pek kolay değildir. Bu sebeple yüksek yapılar için hazırlanan NDA'ya dayalı alternatif tasarım dokümanları ortalama dayanım değerlerini karakteristik değerlerden elde etmek için katsayılar önermektedir. Örneğin beton ve çelik için karakteristik dayanımı ortalama dayanıma dönüştürme katsayısı sırasıyla 1.20~1.30 ve 1.13~1.17, olarak önerilmektedir.

Literatürde yapı elemanları için birçok elastik ötesi modelleme yöntemi olmasına rağmen, elemanın elastik ötesi davranışının idealize edilmiş biçimine göre üç tip modelleme yöntemi olduğu kabul edilmektedir [ATC-72, 2010]. Bunlar, sonlu elemanlar modeli (SEM), fiber (yayıllı) model (FM) ve toplanmış plastisite modelidir (TPM). Seçilen doğrusal olmayan modelleme yöntemi hem elemanın hem de yapının genel davranışını direkt olarak etkilemektedir. Performans esaslı yüksek yapı tasarımı için mevcut yapılar çalımlar ve bilgisayar analiz programlarının performansı düzleştiğinde SEM'nin kullanımı mümkün olmadığı, FM'nin daha çok perde duvar tipi elemanların modellenmesinde ve TPM ise daha çok çubuk tipi elemanların modellenmesinde kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

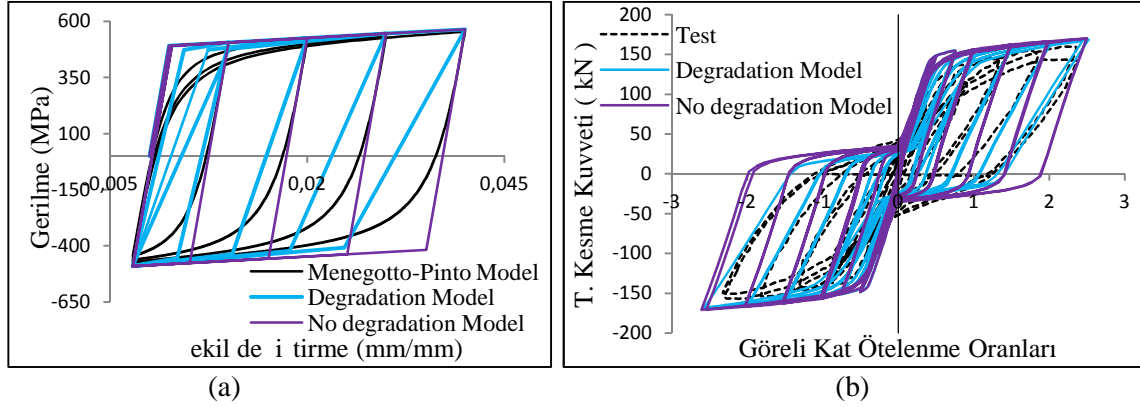
Her bir yöntem matematiksel bir alt yapıya sahip, yapılan deneysel ve analitik çalımlarla kullanılabilirliği kanıtlanmış yöntemlerdir. SEM ve FM modelinde elemanlarda oluşacak elastik ötesi deformasyonlar ve yapının genel davranışını direkt olarak malzemenin gerilme-ekillemesi ve kırılmasından elde edilir. SEM modelinde yapı elemanı kompleks 1,2 ve 3 eksenli doğrusal olmayan çelik ve beton malzeme modelleri

ve uygun bir sonlu eleman sayısına bölünerek idealize edilirken, FM’de ise yapı elemanları doğrusal ve kanıtlanmış tek eksenli (boyuna) basit malzeme modelleri kullanılarak ve eleman kesiti bir doğrultuda (boyuna) belirli bir çelik ve beton fiberine bölünerek idealize edilir. Örneğin FM’de bir perde duvar kesiti uygun sayıda eleman sayısına bölünerek ve her eleman da uygun sayıda fiberlere ayrı ayrı modellenir. Bu iki yöntemin de en güçlü tarafı; elemanın dayanım, rijitlik ve yer deplasmanı tırme kapasitesi hesaplanırken dolaylı olarak da olsa eksenel yük deplasmanı etkisini dikkate almalarıdır. Betonun çatlaması ve ezilmesi, çelikin akması ve çelik ile beton arasındaki etkileşim bu yaklaşımlarla iyi yakalanırken, elemanda oluşabilecek donatı sızılması, kesme etkileri ve çevrimsel yükler altında oluşacak rijitlik ve kapasite azalma etkileri iyi tahmin edilemez.

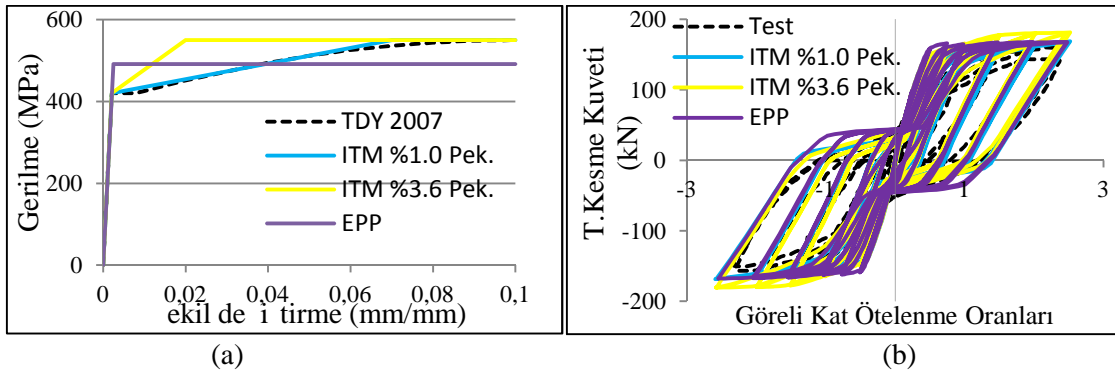
Yüksek yapılar da kullanılan çekirdek perde duvarlar, genelde karmaşık ve büyük ana taşıyıcı yapı elemanlarıdır. Bu yüzden bu yapı elemanlarında oluşacak elastik ötesi yer deplasmanları TPM yaklaşımı ile modellemek gerçekçi görünmemektedir. Bunun yerine beklenen davranışın doğrusal bir şekilde modellenmesi için FM kullanılmalıdır. Yüksek yapıların modellenmesinde, NDA yapabilen ticari programlar düşünüldüğünde, kompleks malzeme modelleri yerine daha basit olarak idealize edilmiş doğrusal olmayan malzeme modellerin (iki doğrultuya da üç doğrultu) ve limitli sayıda fiberin kullanımı gerekmektedir. Kullanılacak basit malzeme modellerinin ve çevrimsel etkiler sonucu elemanda oluşacak etkilerin belirlenmesi için deneysel sonuçlarla analiz sonuçlarının karşılaştırılması gerekmektedir. Etiler 4-5’te görüldüğü gibi, yaklaşık olarak % 1 pekiştirme ve çevrimsel etkilerin dikkate alınmış basit idealize edilmiş çelik malzeme modeli kullanılarak, perde uç bölgesi için sargılı ve perde gövdesi için sargısız idealize edilmiş beton malzeme modeli kullanarak, ayrıca eleman yüksekliğinin de plastik mafsallık boyu kadar ( $0.5 \cdot l_w$ ) alınıp elde edilen analiz sonuçları test sonuçları ile karşılaştırıldığında uyumsuz gözlenmektedir. Uygun fiber sayısı da detaylı kesit analizi yapan programlar kullanılarak (XTRACT) bulunmalıdır. Çünkü yüksek yapıların NDA yöntemiyle analizi oldukça zaman almaktadır ve gereğinden fazla fiber kullanmak analiz sürelerini oldukça arttırmaktadır. Ayrıca bazen arzu edilen davranışı yakalamak için aşırı fiber kullanmak gereksiz de olabilir. Genel olarak perde uç bölgesinde yoğun fiber sayısı ile perde gövde bölgesi için daha seyrek fiber sayısı kullanımı makul sonuçlar elde edilmesi için yeterlidir.

Toplanmış plastisite modeli (TPM) ise elemanın genel davranışına dayalı elastik ötesi deformasyonların sonsuz bir noktada yoğunlaşması varsayımına dayanan mafsallar ve yarı elastik elemanlardan oluşur. Plastik mafsallığın özellikleri, elemanın özelliklerine ve elemanın maruz kaldığı yük etkilerine göre idealize bir kuvvet-yer deplasmanı tırme ekseninden (iskelet ekseninden) oluşur. ASCE41-06, TDY 2007 ve ATC 72 kullanılabilecek plastik mafsallık özelliklerinin nasıl tanımlanacağını açıklanmaktadır. TDY 2007 çevrimsel etkilerin dikkate alınmış mafsallık modelini önerirken, ASCE 41-06 ise çevrimsel etkilerin dolaylı olarak dikkate alınmış ve eleman dönme kapasitesini verildiği çubuk dönmesi modelini önermektedir. ATC 72 ise plastik mafsallığın özelliklerini belirlemek için analitik formülasyonlar önermekte ve çevrimsel etkilerin de dikkate alınması gerektiğini savunmaktadır. TPM modelinin güçlü yönlerinden biri çevrimsel yükler altında meydana gelebilecek rijitlik ve dayanım düşmesi etkilerini direkt ya da dolaylı olarak dikkate alabiliyor olmasıdır. Yarı elastik elemanlar yardımıyla (bu modelin güçlü taraflarından biri) elemanda oluşabilecek donatı sızılması ve burkulması, kesme etkileri ve betonun çatlaması gibi davranışa direkt etkisi olan özellikleri dolaylı olarak efektif rijitlikler kullanılarak dikkate alır. Deprem artnameleri efektif rijitlik değerleri içinde öneriler sunmaktadır. TDY 2007 ve ASCE 41-06’de önerilen efektif rijitlikler yüksek yapıların hemen kullanım performans seviyesi için oldukça konservatif sonuçlara yol açmaktadır. Bu yüzden PEER/TBI ve LATBDSC’nin yüksek yapıların analizinde kullanılmak üzere her bir performans derecesi için önerdiği efektif rijitlik değerleri kullanılmalıdır. Son olarak, yüksek yapılarda eksenel yük seviyesi oldukça fazladır. Küçük mertebe etkileri, yapı yatay olarak yer deplasmanı içinde eksenel yükten dolayı yapıda ilave edilmiş deplasmanların oluşması ve buna bağlı olarak yatay yer

değiştirilmesinin de artmasına sebebiyet olmalıdır. Bunun için yüksek yapılarda her iki performans seviyesi içinde ikincil mertebeye etkileri dikkate alınmalıdır.



ekil 4. Kullanılan çelik malzeme modellerin M. Pinto model ile karşılaştırılması (a) ve bu malzemeler kullanılarak yapılan analitik çalı şmanın test (Wallece RW2) sonuçları ile karşılaştırılması (b)



ekil 5. dealle tirilmi çelik malzeme modelleri (a) ve bu malzeme modelleri kullanılarak yapılan analitik çalı şmaların sonuçlarının test (Wallece RW2) sonuçları ile karşılaştırılması (b) (ITM : idealize edilmi tri-linear model, pek: pekle me)

#### 4. KUVVETLİ YER HAREKETİ SEÇİMİ

NDA yönteminde gerçeğe yakın sonuçların elde edilebilmesi için performans seviyelerine göre uygun yer hareketlerinin seçilmesi son derece önemlidir. Öncelikli yaklaşım, o yapının olduğu yerde daha önce kayıt edilmiş uygun yer hareketlerinin kullanılmasıdır. Bu genellikle uzun periyodlu olan yüksek yapılar için mümkündür. Bu yüzden yüksek yapılar için daha önce kayıt edilmiş uygun yer hareketleri spektruma uyumlu yöntem ya da ölçeklendirme yöntemi kullanılarak elde edilen tasarım spektrumuna uygun yer hareketi türetilmektedir. Bilindiği gibi tasarım spektrumları deprem yönetmenlerinde belirlenen standart yöntemlerle belirlendiği gibi özellikle özel yapılarda gerekli saha çalı şmaları yapılarak yapıya özgü olacak şekilde elde edilebilir. Detayları ilgili dokümanlarda anlatılmakla birlikte özet olarak, spektruma uyumlu yöntem kullanılacaksa manipüle edilecek yer hareketinin karakteristik özelliklerini bozmayacak şekilde yapılmalıdır. Ölçeklendirme yönteminde ise en önemli husus ölçek faktörünün 2'den büyük olmaması ve manipüle edilen yer hareketlerinden elde edilen spektrumun yapının hakim periyodunun 0.2 ile 1.5 katı aralığında tasarım spektrumundan az olmaması gerekir. Hangi yöntemin daha gerçekçi sonuçlar verdiği tartışılmalı bir durum olmasına rağmen uzun periyodlu olan yüksek yapılarda istenilen aralığa uygun mevcut standart tasarım spektrumu kullanarak yer hareketi elde etmek için genellikle büyük ölçek faktörü kullanmak

gerekir ve bu da gerçekçi olmayan deprem dalgaları yaratabilir. Bunun yerine yapıya özgü elde edilen tasarım spektrumu kullanılarak uygun ölçeklendirme faktörleri kullanması önerilir. Mevcut standart tasarım spektrumu kullanılması durumunda spektrum uyumlu yöntemin kullanılması tavsiye edilir [Moehle, 2006].

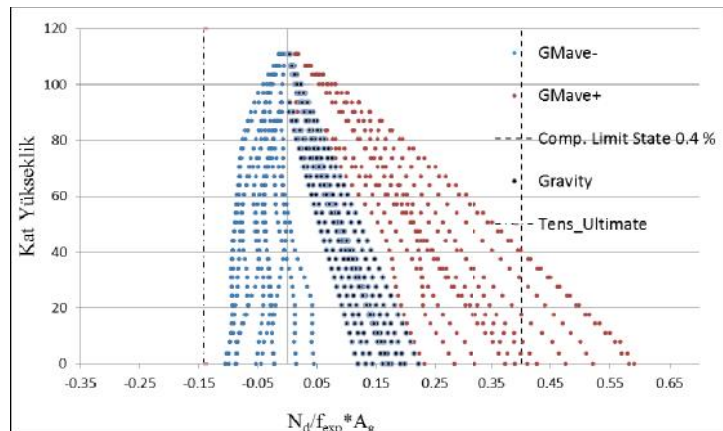
## 5. PERFORMANS KRİTERLERİ

Performans esaslı yaklaşımlarda ön önemli amaçlardan biri sonuçların doğru bir şekilde değerlendirilmesidir. Bunun için hem yapının öngörülen genel davranışının hem de her bir elemanda öngörülen davranış performans kriterleri doğru bir şekilde tanımlanması gerekir. Yüksek yapılarda öngörülen iki performans düzeyi vardır. Bunlar, tekrar olasılığı yüksek küçük depremler (43-72 yıl) altında hemen kullanım sürmesi gerekliliği ve tekrar olasılığı düşük ama güçlü depremler (2475 yıl) altında da göçmenin olmamasıdır. NDA yöntemi kullanılırsa, hemen kullanım performans düzeyi için en az 3 çift yer hareketi, göçme öncesi performans düzeyi içinse en az 7 çift kuvvetli yer hareketi altında yapının değerlendirilmesi gerekir. Hemen kullanım performans düzeyi için yapının elastik davranış göstermesi öngörülür. Eğer 7'den fazla yer hareketi kullanılıyorsa, eleman düzeyinde her bir elemanın bu depremler altında elastik sınırı aşılamaması istenilir. Görelî kat ötelenmesinin de yüzde yarım (%0,5) altında olması öngörülür. Eğer 7'den fazla yer hareketi kullanılacaksa sonuçların ortalamasının bu değerlerin altında olması arzu edilir. Göçme öncesi performans düzeyi için eleman bazında analiz sonuçlarının ortalaması yönetmelikte öngörülen limitlerin altında olması gerekir. Örneğin perdede eksenel yüklerin %30'ten ( $P/f_{ex} \cdot A_{ck}$ ), kolonlarda %40'tan ( $P/f_{ex} \cdot A_{ck}$ ), plastik dönmelerin ya da gerilme değerlerinin, perdede kesme gerilmelerin yönetmelikte öngörülen limitlerin altında olması gerekir. Ayrıca yapının genel davranışını kontrol etmek için ortalama yatay görelî kat ötelenmelerinin ortalamasının %3'ten, her bir yer hareketi sonucu oluşan maksimum yatay görelî kat ötelenmelerinin ise %4.5'ten az olması şart koşulmuştur. Yine yüksek yapılarda elemanlar üzerinde eksenel yük seviyesi yüksek olduğundan kalıcı görelî kat ötelenmesinin %1'in altında olması istenilir. Ayrıca güçlü herhangi bir deprem etkisi altında herhangi bir katta %20'den fazla kuvvet kaybı olması istenilmez.

## 6. PERFORMANS ESASLI YÜKSEK YAPI TASARIMI UYGULAMASI

İstanbul birinci dereceden deprem bölgesinde bulunan, TDY 2007'ye göre konut olarak tasarlanan ve C45/420 yapı malzemesi kullanılan 34 katlı 115 metre yükseklikteki betonarme binanın görünümü ve tipik kat planı ekil 7'de gösterilmiştir.  $R=6$  alınıp ön tasarım yapılmış ama tasarımda minimum taban kesme kuvveti koşullunu sağlamak için düzenleme yapılmış ve buna göre tasarım yapılmıştır. Kesit boyutları ve gerekli donatılar belirlenmiştir. Daha sonra ekil 8'de verilen %2,5 sönümlü 43 yıllık ve 2475 yıllık tasarım spektrumuna uyumlu 7 çift yer hareketi etkisi altında NDA yapılmış ve hemen kullanım ve göçme öncesi performans düzeyleri kontrol edilmiştir. Seçilmiş bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir.

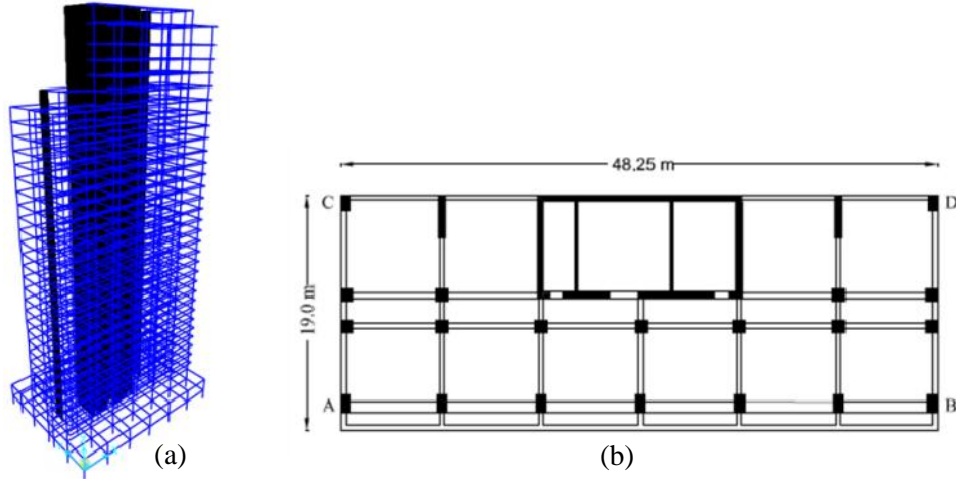
Ekil 9'da görüldüğü gibi hemen kullanım ve göçme öncesi performans düzeyleri için öngörülen ortalama yatay ötelenme oranları ( $< \% 0.5$  hemen kullanım, ortalama  $< \% 3$  her bir kayıt  $< 4.5 \%$  göçme öncesi için) sağlanmamıştır ama ekil 6 ve 10'de görüldüğü gibi perde ve bazı kolonlarda 2475 yıllık deprem etkileri altında öngörülen  $P/f_{ex} \cdot A_{ck}$  0.30 ve 0.40 oranları sağlanmamıştır. Ayrıca perde duvarlar öngörülen kesme kuvvetlerinin üzerinde kesme kuvvetine maruz kalmıştır. Bunun sonucunda



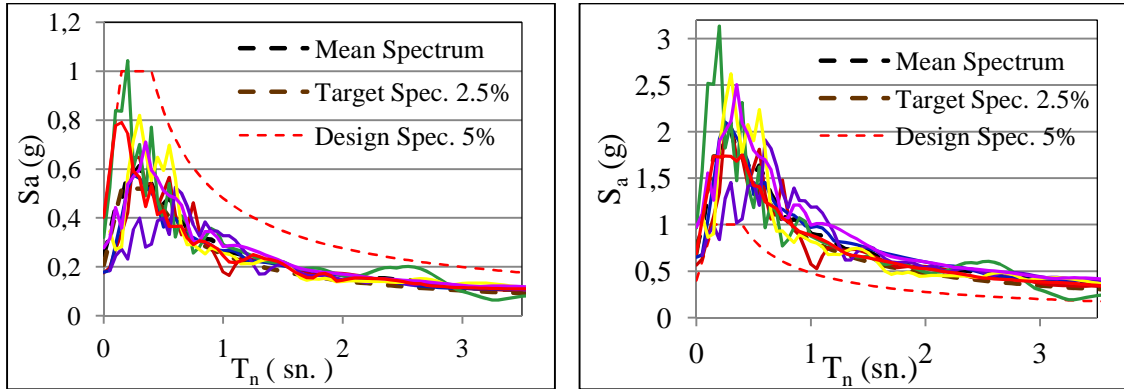
ekil 6: 2475 Yıllık yer hareketi altında ortalama kolon eksenel yük seviyeleri



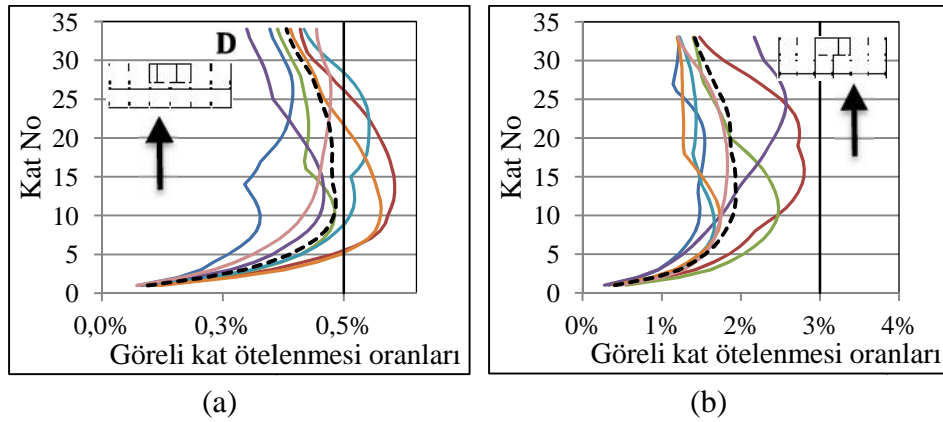
tasarım revize edilmiş ve gerekli kesit ve donatı arttırmaları yapılmıştır. Tekrar analiz yapılmış ve öngörülen bütün performans kriterleri sağlanmıştır. Tasarım sonlandırılmıştır.



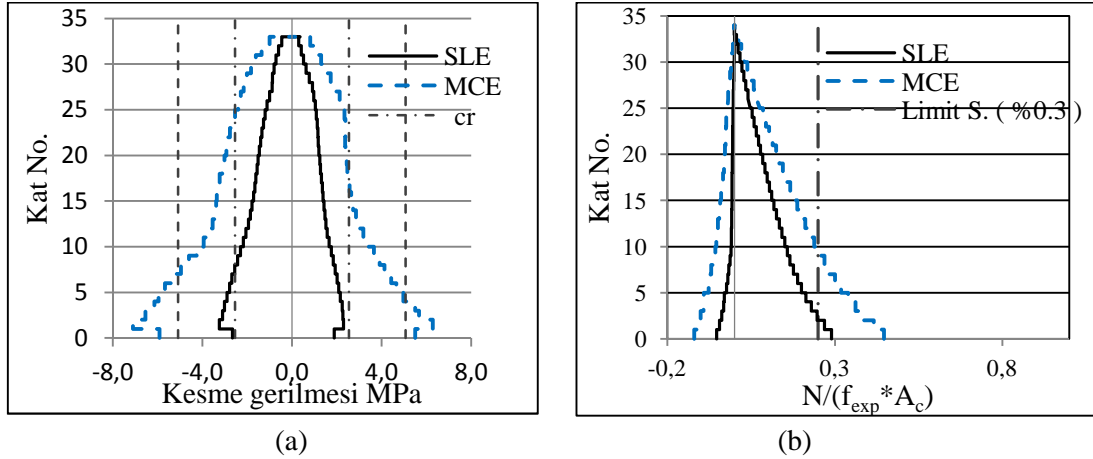
ekil 7. 115 metre yüksekliindeki betonarme (a) binanın görünümü ve (b) tipik kat planı



ekil 8. 43 (a) ve 2475 (b) yıllık %2.5 sönümlü spektrum uyumlu yer hareketleri



ekil 9. 43 (a) ve 2475 (b) yıllık yer hareketi altında görel kat ötelenme oranları



ekil 10. 43 (SLE) ve 2475 (MCE) yıllık yer hareketi altında perde duvarda oluşan (a) kesme gerilmeleri ve (b) aksenal yük seviyesi karşılaştırılması. ( $\sigma_{cr}$ : kesme çatlama gerilmesi ve  $\sigma_u$ : kesme kapasitesi gerilmesi)

## 7. SONUÇLAR

Geleneksel yapı sistemlerinden farklı olarak, yüksek yapılar mimari özellikleri, yatay yükler altında davranışları, yüksek kalitede yapı malzemelerinin kullanılması ve yenilikçi yapı sistemlerinin kullanılmasından dolayı özel yapılardır. Mevcut deprem arnameleri yüksek yapıların tasarımında hem yetersiz hem de çok kısıtlayıcı kurallara sahiptir. Bu yüzden yüksek yapılar tasarlanırken alternatif analiz yöntemleri kullanılması gereklidir. Zaman tanım aralığında doğrusal olmayan dinamik analiz ve performans esaslı yaklaşımlar kullanılarak yüksek yapıların belirlenen farklı deprem etkileri altında davranışları en gerçekçi şekilde tahmin edilebilir. Yapılan çalışmada da görüldüğü gibi, TDY 2007'ye göre tasarlanan 34 katlı konut uygulaması performans esaslı yaklaşımlarla kontrol edildiğinde öngörülen deprem etkileri altında yeterli güvenilirliği sağlamaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Ali, M.M. ve Moon K.K (2007). Structural Developments in Tall Buildings. *Architectural Science Review* Volume **50.3**, pp 205-223.
2. Moehle, J.P. (2005). Nonlinear Analysis for performance-based earthquake engineering. *The Structural Design of Tall and Special Buildings Journal* **14**, 385-400.
3. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council (2006). *An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region*. Los Angeles Tall Buildings Council: Los Angeles, CA.
4. Applied Technology Council (2010). *ATC-72-1: Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings*, Redwood City, California.
5. American Society of Civil Engineers (2006), *ASCE/SEI Standard 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, Reston, VA.
6. Alıcı, F.S. (2013). Genelleştirilmiş Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
7. Budak, E. (2015). Yüksek Yapıların Performans Esaslı Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
8. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Erişim: 11 Ağustos 2015 <http://skyscrapercenter.com>
9. Sucuoğlu, H. Performans esaslı deprem mühendisliğinin temel kavramları. *Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı* 11 Mayıs – 14 Mayıs 2015.