

Yapı Güçlendirme Yöntemlerinin Fayda-Maliyet Analizi

Özlem Yanmaz*
Hilmi Luş**

ÖZ

Yakın geçmişteki depremlerin konutlarda ve sanayi yapılarında oluşturduğu kayıplar, Türkiye'nin genelinde deprem risk analizlerine dayanan kapsamlı bir deprem öncesi çalışmaya olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Varolan bina stoğunu güçlendirmek, olası bir depremde karşılaşılabilecek zararları azaltmak için etkili bir seçenek olarak görülebilir. Bu çalışmanın amacı, yapılarda çeşitli güçlendirme işlemleri sonucunda ortaya çıkabilecek fayda ve maliyetleri sistematik olarak tayin eden bir altyapıyı tartışmak ve önerilen yaklaşımın İstanbul'da bulunan gerçek bir binanın analizinde kullanılmasıyla elde edilen deneyimleri paylaşmaktır. Elde edilen sonuçlar güçlendirme işlemlerinin deprem zararlarını azaltmak için ekonomik olarak etkili çözümler sunabileceklerini ve Fayda-Maliyet analizinin en önemli parametrelerinin insani kayıplar, yapıda barınan insan sayısı ve faiz oranı olduğunu göstermektedir. Bu çalışma için oluşturulan yöntem, yapı türleri ve güçlendirme seçenekleri artırılarak ve daha detaylı bir maliyet hesabı uygulanarak geliştirilebilir.

ABSTRACT

Benefit-Cost Analysis of Retrofitting Measures

The losses in residential and industrial structures due to recent earthquakes have increased the need to develop detailed studies of earthquake risk analyses. Retrofitting the existing building stock seems to be a valid option to substantially reduce the risks. The purpose of this study is to provide a rational basis for evaluating the benefits and costs of such retrofitting measures, and to implement the methodology on a real building located in İstanbul. The results of this study imply that retrofitting may be an economically effective solution to reduce the earthquake damages, and that the most important parameters in the relevant Benefit-Cost analysis are value of life, number of people residing in the building and discount rate. The methodology developed in this study can further be extended by applying more detailed cost analysis and including more mitigation measures and building types.

Not:

-
-

* İnşaat ve Endüstri Mühendisi. o_yanmaz@yahoo.com.

** Yrd.Doç.Dr., Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. hilmilus@boun.edu.tr

1 GİRİŞ

Doğal afetlere karşı kullanılacak yapısal güçlendirme çalışmalarının ekonomik analizler ile değerlendirilmeleri, oluşabilecek fayda ve maliyetlerin belirlenmelerinde ve önerilmesi muhtemel değişik güçlendirme alternatiflerinin rasyonel bir çerçevede karşılaştırılmalarında temel oluştururlar. Bir güçlendirme önerisini değerlendirmede temel; ilgili kesimlere sağlanan faydaların, güçlendirmenin maliyetinin ve güçlendirme çalışmasıyla oluşması beklenen maliyet etkinliğinin hesaplanması olmalıdır. Bu çerçevede bir Fayda-Maliyet¹ analizi, önerilen güçlendirme projelerinin can ve mal kaybında sağlayacakları varsayılan kazançların, bu projelerin hayata geçirilmeleri için gerekli yatırımlarla ilintili olarak değerlendirilmelerinde ve bu değerlendirilmelerin ışığında önerilenler arasında en uygun güçlendirme projesinin belirlenmesinde kullanılabilir. Fayda-Maliyet analizinde tüm maliyetler ve faydalar parasal değerlerle ifade edilir ve faydaların net parasal değerlerine bağlı olarak güçlendirme yapılıp yapılmamasına ve/veya güçlendirme çeşidine karar verilir. Başka bir deyişle, eğer net faydalar net maliyetlerden fazlaysa, söz konusu bir güçlendirme projesi uygulanmaya değer bulunmalıdır. Bu konuda önemli bir not olarak, böylesi bir analizde yer alacak değişkenlerin doğasından dolayı, kullanılan metodolojinin olasılık kuramı üzerine inşa edilmesinin gerekli olduğu belirtilmelidir.

Dünyada deprem riskleri ile ilgili ekonomik analizlerde kullanılan yaklaşımlardan en sık başvurulanları HAZUS [1] ve RAMP [2] olarak sıralanabilir. Federal Acil Yönetim Teşkilatı² (FEMA) tarafından geliştirilen HAZUS' da deprem kayıplarının belirlenmesinde ve Fayda-Maliyet analizinin uygulanmasında kullanılan metodoloji; (1) Afet tanımı, (2) Envanter tanımı, (3) Envanter hasarının tahmini ve (4) Fayda-Maliyet hesabı olmak üzere dört ana adımdan oluşmaktadır. Metodolojide kullanılan parametrelerin bazıları; bölgedeki faylarda deprem olaylarının sıklığı, yapıların hasar görülebilirliği ve güçlendirme aktivitelerinin fayda ve maliyetleri olarak sıralanabilir. RAMP metodolojisinin temeli ise, bölgesel afet tedbirleri stratejilerinin maliyet geçerliliğinin sistematik olarak belirlenmesidir. Söz konusu metodoloji; (1) Sismik Afet Tanımı, (2) Yapı tanımı, (3) Hasar Tahmini, (4) Güçlendirme ve tamirat maliyet tahmini, (5) Fayda-Maliyet analizi ve (6) Önceliklerin belirlenmesi olmak üzere 6 ana bölümden meydana gelmektedir. Her iki yaklaşım için ayrıntılı bilgiler [1] ve [2] de bulunabilir.

Yukarıda bahsedilen açıklamalar doğrultusunda bu çalışmanın amacı, deprem riski altındaki yapılarda çeşitli güçlendirme çalışmaları sonucunda ortaya çıkabilecek fayda ve maliyetleri sistematik olarak tayin eden bir altyapıyı tartışmak ve önerilen yaklaşımın İstanbul'da bulunan gerçek bir binanın analizinde kullanılmasıyla elde edilen sonuçları paylaşmaktır. Önerilen yaklaşım esas olarak daha önce Smyth ve diğerleri [3] tarafından sunulan yaklaşımın genişletilmiş bir hali olarak düşünülebilir. Bu çerçeveye ek olarak dinamik analiz yöntemleri ve ekonomik analiz kapsamı ile ilgili tartışmalar da ileriki bölümlerde sunulacaktır.

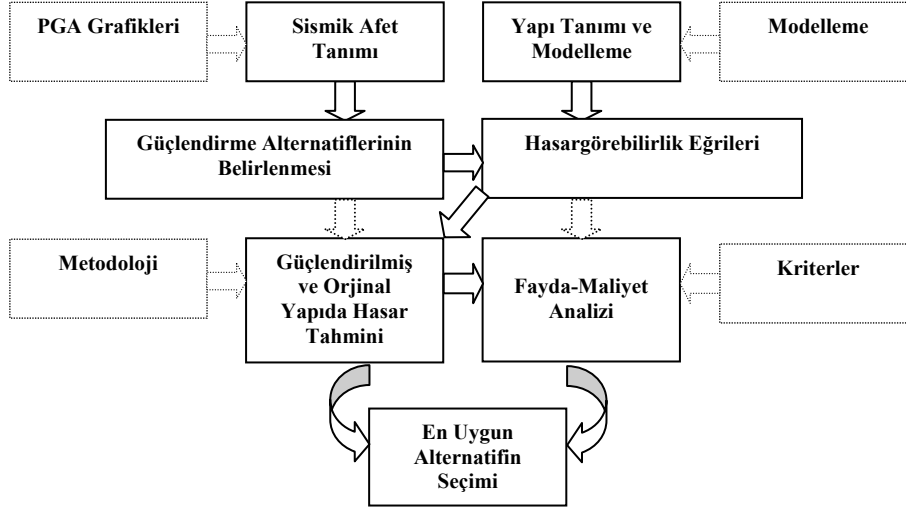
2 YÖNTEM

Bir yapı için teklif edilebilecek güçlendirme önerilerinin Fayda-Maliyet analizi için kullanılan yöntemin ana hatları Çizelge 1' de sunulmuştur.

¹ Benefit-Cost

² Federal Emergency Management Agency –FEMA (A.B.D.)

Çizelge 1. Fayda-Maliyet Analizi Metodolojisi



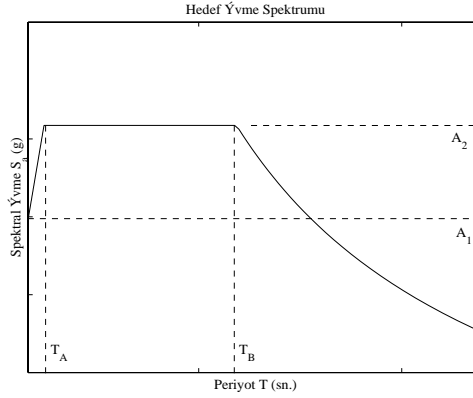
3 SİSMİK AFET TANIMI

Sismik afet tanımı, sismik yer hareketinin tanımlanması ve tanımlanan hareketin gerçekleşmesinin yıllık olasılığının belirlenmesi olmak üzere iki alt bölümden oluşmaktadır.

3.1 Yer Sarsıntısı Tanımı

Deprem mühendisliğinde, yapının değişik periyotlardaki yer sarsıntılarına tepkisi genelde ivme spektrumu ile ifade edilir. 1997 Deprem Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere ivme spektrumunu belirleyen parametreler zeminin özelliğine göre değişmektedir ve bu parametreler her bir zemin sınıfı için yönetmelikte sunulmuştur ([4]). Şekil 1'de Z3 zemin için önerilen elastik ivme spektrumu şematik olarak gösterilmektedir.

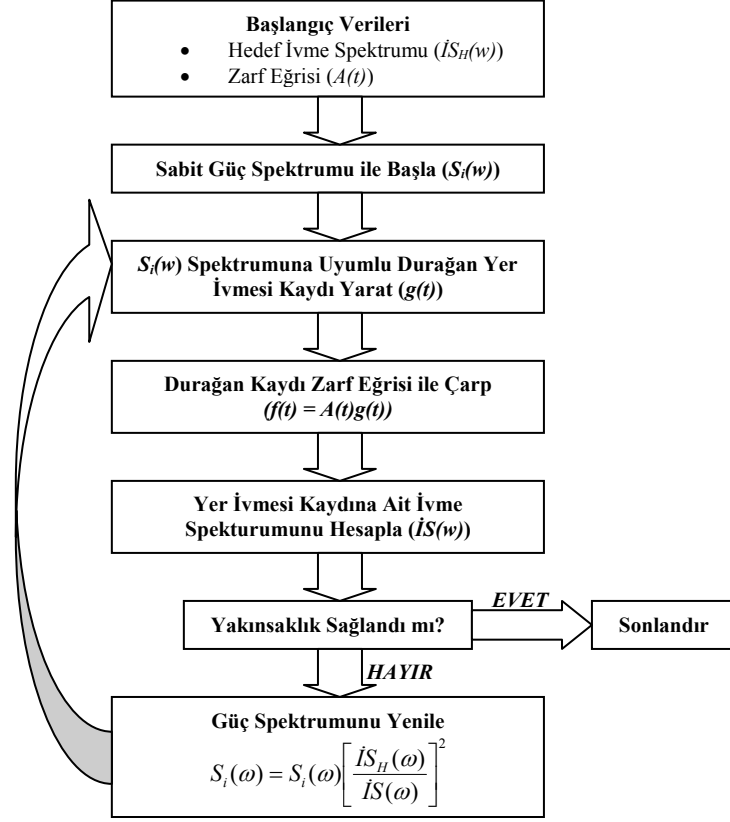
Zemin özelliklerine bağlı olarak yönetmelikte belirtilen ivme spektrumlarıyla uyumlu sentetik yer ivmesi kayıtlarının yaratılmasında Deodatis [5] tarafından önerilen yöntem esas alınmıştır ve bahsi geçen yöntem ana hatları ile Çizelge 2' de açıklanmıştır.



Şekil 1. Kadıköy için elastik ivme spektrumu, yerel zemin çeşidi Z3

Kayıtlar yaratılırken zarf eğrisi $(A(t))$ için, kaynaklarda sıkça atıfta bulunulan "Jennings Modeli" kullanılmıştır. Öte yandan benzetim işleminin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle yer sarsıntısının şiddetini tanımlamakta

Çizelge 2. Sentetik Yer İvmelerinin Yaratılmasında Kullanılan Yöntem ([5])



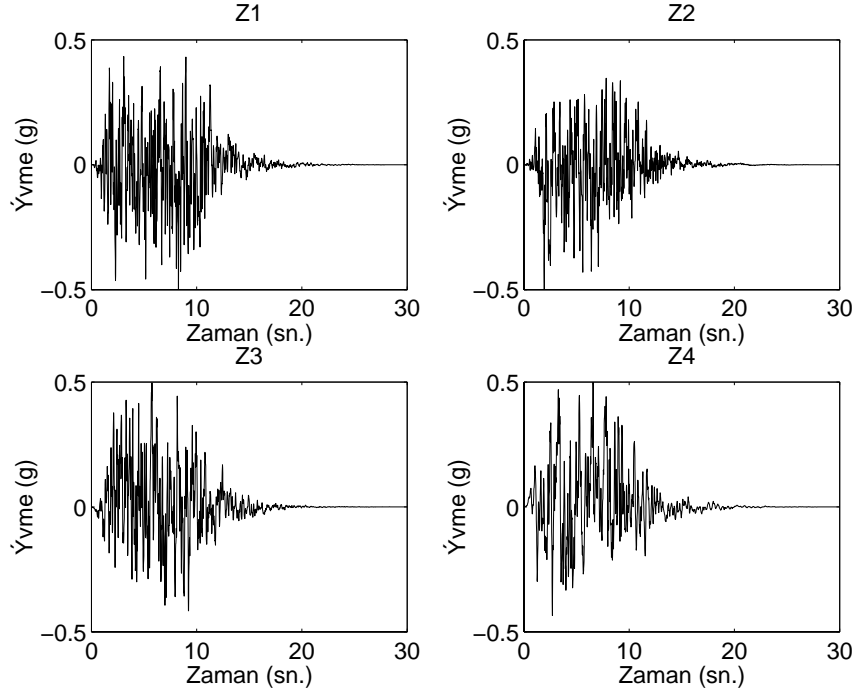
kullanılacak bir gösterge kararlaştırılmalıdır. Deprem yer hareketinin şiddeti; spektral ivme, tepe yer hızı, tepe yer ivmesi, spektral şiddet, ivmenin standart sapması, Arias şiddeti vb. olmak üzere değişik ölçümlerle ifade edilebilir [6]. Yapı üzerindeki sismik kuvvet yer ivmesiyle orantılı olduğu için, tüm bu seçenekler arasında tepe yer ivmesi, yer sarsıntısının tanımlanmasında en çok kullanılan yöntemdir; dolayısıyla bu çalışmada deprem şiddetini tanımlamak için tepe yer ivmesi (PGA³) seçilmiştir. PGA değeri

$$PGA = \max_{t \in [0, T]} |a(t)| \quad (2)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada, T yer sarsıntısının süresini, $|a(t)|$ ise herhangi bir t zamanındaki ivmenin mutlak değerini göstermektedir.

Şiddet göstergesi seçildikten sonra verilen bir ivme spektrumu ile uyumlu sentetik yer ivmesi kayıtları yaratılabilir. Bu çalışmada benzetim işlemi her bir yerel zemin kategorisi için, PGA değerleri 0.01g-1g arasında değişen 200'er kayıt yaratmak üzere tekrarlanmıştır. Şekil 2 değişik yerel zemin kategorileri için yaratılan sentetik ivme kayıtlarından bazı örnekleri göstermektedir.

³ Peak Ground Acceleration



Şekil 2. Yerel zemin kategorileri Z1, Z2, Z3 ve Z4 için örnek ivme-zaman grafikleri

3.2 Yer Hareketinin Yıllık Gerçekleşme Olasılığı

Dolayısıyla sismik afet tanımında sentetik yer ivmesi kayıtları tanımlandıktan sonraki adım, söz konusu yer sarsıntısının yıllık gerçekleşme olasılığının belirlenmesi olmalıdır. Bu amaçla, Kandilli Araştırma Merkezi ve A.B.D. Jeolojik Araştırma Merkezi'nin⁴ [7] birlikte geliştirdiği ve İstanbul'da belirli PGA değerlerinin aşılma olasılığını gösteren eğri kullanılmıştır⁵. Şekil 3'te gösterilen bu eğri⁶, İstanbul'un güneyindeki Kuzey Anadolu fayının 250 km uzunluğundaki kısmının 10 bölüme kullanılarak oluşturulan kaynak modelinden çıkarılmıştır. Olasılık eğrisinin çıkarımında kullanılan varsayımlar ve yöntemler, Atakan ve diğerleri [8] tarafından afet eğrilerinin (model 2 ve 3) oluşturulmasında kullanılanlara benzerdir. Bu zamana bağlı model, son kırılmadan sonraki süre ve belirtilen her bölüme tektonik yüklem oranını hesaba katar ve 2000 yılı için geçerlidir.

Zamana bağlı yırtılma-yenileme modelinde, tehlike bir veya daha fazla bölüme kırılana kadar artmaya devam etmektedir. Bu çalışmada ise kullanılan aşılma eğrisinin zaman içinde durağan olduğu varsayılmıştır; öyle ki, yıllık aşılma olasılığı eğrisi ($R(a)$), yıkıcı bir deprem olmadığı sürece göz önünde bulundurulmuş zaman diliminde (T_N) tüm yıllarda değişmez kabul edilmiştir. Bu basitleştirici varsayım, fayda enerji boşalması olmadığı takdirde olası

⁴ US Geological Survey

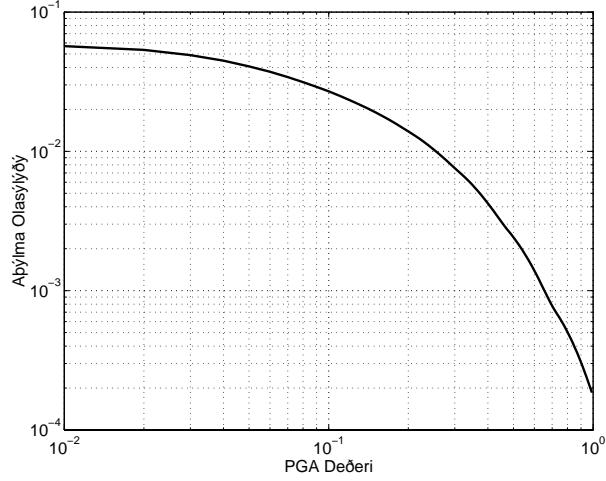
⁵ Bu eğri Smyth ve diğerlerinin [3] çalışmasında da temel alınmıştır.

⁶ Eğride aşılma değerleri, yer çekimi ivmesinin (g) fonksiyonu olarak verilmiştir.

tehlike için bir alt sınır belirler ve dolayısıyla güçlendirme aktivitelerinden beklenen faydaların daha düşük hesaplanmasına yol açar. Zamana bağlı bir model, deprem riskinin artmasına ve dolayısıyla güçlendirmeden kaynaklanan faydanın daha fazla olmasına sebep olacaktır.

4 YAPI KULLANIM TANIMI VE MODELLEME

Bölüm 3'te açıklandığı gibi, bir yapının deprem hareketine gösterdiği tepki, yapı çevresindeki yerel zemin özellikleri ve incelenen binanın kendine has yapısına bağlıdır. Bu amaçla, hasar görülebilirlik incelemesi için temsili bir bina belirlenmelidir. Bu çalışma için İstanbul Caddebostan'da bulunan gerçek bir bina seçilmiştir. 1968 yılında inşa edilen bu bina, güncel Afet Yönetmeliği'nin tanımına göre Z3 yerel zemin kategorisinde bulunan beş katlı tipik bir betonarme yapıdır. Projede, yapının

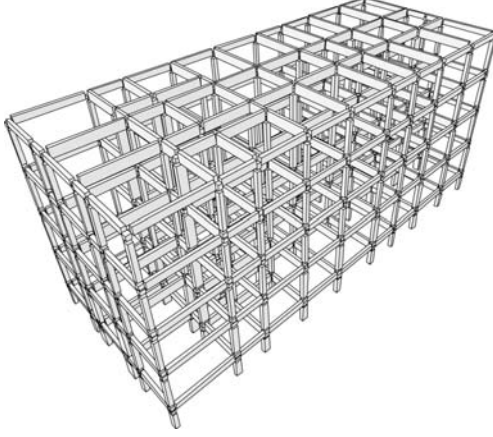


Şekil 3. İstanbul için PGA açılma olasılığı eğrisi

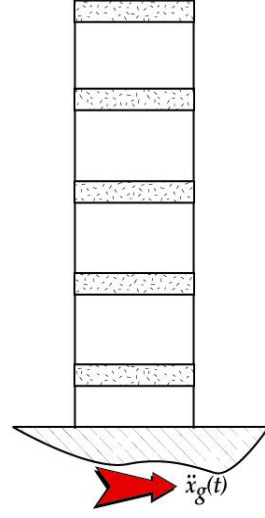
alanı 28.14m x 11.3m, yüksekliği ise 13.5 metre olarak gösterilmektedir. Orjinal yapı perde duvar içermeyen moment mukavemetli betonarme çerçevesidir ve kullanılan betonun akma sınırı 16 MPa olarak belirlenmiştir. Betonun bu görece düşük mukavemeti ve projede 1967 deprem yönetmeliğinin kullanılması, yapının güncel yönetmeliğe göre gerekenden daha düşük sismik yüklere göre tasarlandığını işaret etmektedir. Söz konusu bina birçok yönden İstanbul ve çevresindeki konut tipi yapıları temsil ettiği için seçilmiştir.

Seçilen yapı, 3-Boyutlu veya 2-Boyutlu modellenerek, doğrusal veya doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemleriyle incelenebilir. Bu çalışmada, 2-Boyutlu modelleme kullanılarak doğrusal analiz yapılmış ve sonuçlar Smyth ve diğerleri [3] tarafından yapılan 3-Boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizle karşılaştırılmıştır. Yapının orjinal halinin 3-Boyutlu modeli şematik olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 5 ise bu çalışmada kullanılan eşdeğer 2-Boyutlu modeli göstermektedir. 2-Boyutlu modelde kullanılan kat ağırlıkları her kattaki tüm elemanların ağırlıkları toplanarak, kat rijitlikleri ise her kattaki tüm taşıyıcı elemanların yatay deplasman rijitlikleri toplanarak elde edilmiştir. Smyth ve diğerlerinin sunduğu analizde bina zayıf eksenini doğrultusunda yer ivmelerine tabi tutulmuş ve dinamik analizi yapılmıştır; dolayısıyla 2-Boyutlu model için burada kullanılan denklik kriteri, 2-Boyutlu modelin periyodlarının 3-Boyutlu modelin zayıf eksenini doğrultusundaki hareket periyodları ile örtüşmesi olarak tanımlanmıştır. Gerek orjinal yapıda gerekse güçlendirme modellerinde kullanılan periyodlar Çizelge 3'de verilmiştir. Bu çizelgede bulunan güçlendirme alternatifleri Bölüm 5'de açıklanacaktır. Temsili binanın gerçekte bulunduğu Z3 zemin sınıfındaki analizi tamamlandıktan sonra, diğer yerel zemin sınıflarında deprem hareketine göstereceği tepkiyi anlayabilmek için yapı deprem yönetmeliğinde belirtilen diğer zemin sınıfları Z1, Z2 ve Z4 için de incelenmiştir. Bu inceleme için her yerel zemin

sınıfına özgü yer sarsıntısı tanımları ve sentetik ivme kayıtları Bölüm 3’te anlatılan yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, yapının kullanım amacı değiştirilerek hastahane ve okullar için de analiz yapılmıştır. Bu çeşit bir inceleme için aynı yapısal model kullanılmış, sadece hasar hesabı ve tamir maliyetlerine gerekli eklemeler yapılmıştır.



Şekil 4. Moment mukavemetli betonarme çerçeve yapının orjinal halinin 3-Boyutlu modeli [3]



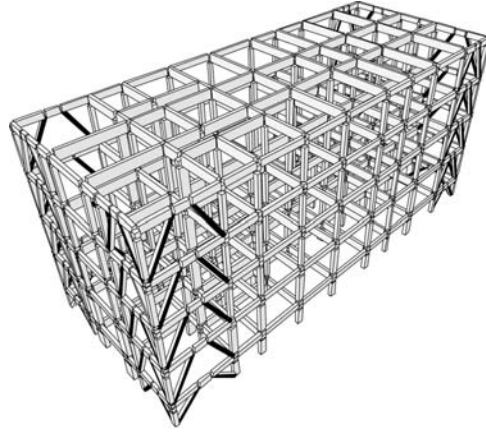
Şekil 5. Eşdeğer 2-Boyutlu model

Çizelge 3. 2-Boyutlu ve 3-Boyutlu Modellerin Periyodları

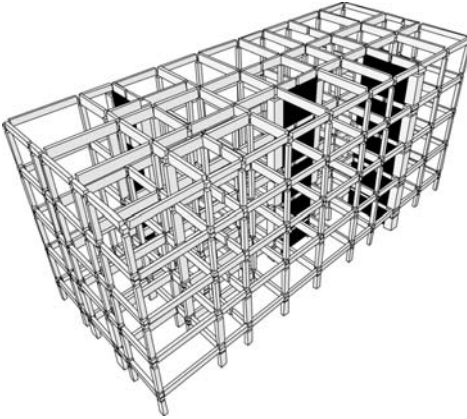
Mod Sayısı	Doğal Titreşim Periyodları (sn.)							
	Orjinal		Çapraz Bağlı		Kısmi Perdeli		Tüm Perdeli	
	2-B.	3-B.	2-B.	3-B.	2-B.	3-B.	2-B.	3-B.
1. Mod	0.83	0.82	0.54	0.54	0.35	0.35	0.27	0.27
2. Mod	0.29	0.25	0.19	0.19	0.12	0.12	0.09	0.09
3. Mod	0.19	0.16	0.13	0.12	0.08	0.09	0.06	0.07
4. Mod	0.16	0.13	0.11	0.10	0.06	0.05	0.04	0.05
5. Mod	0.08	0.07	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02

5 GÜÇLENDİRME ALTERNATİFLERİNİN BELİRLENMESİ

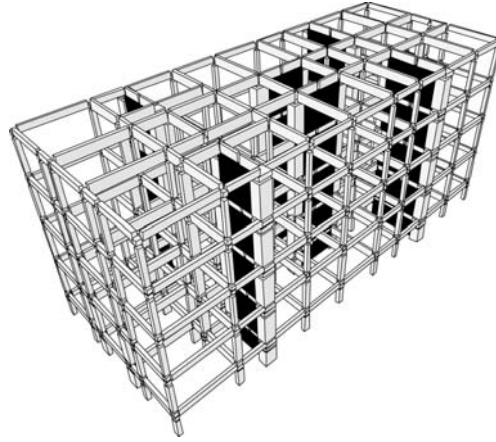
Bu çalışmada orjinal yapıya çapraz bağlantı, kısmi perde duvar ve tüm perde duvar olarak adlandırılan üç çeşit güçlendirme alternatifi uygulanmıştır. Çapraz bağlantı alternatifi için, yapının zayıf ve güçlü eksenleri doğrultusundaki dış açıklıklar (köşeler) çapraz bağlantılarla güçlendirilmiştir. Bu işlem her kat için tekrar edilmiş ve her kat için toplam sekiz çapraz bağlantılı açıklık elde edilmiştir. Kısmi perde duvar alternatifi için, zayıf eksen doğrultusundaki iki açıklık, güçlü eksen doğrultusundaki bir açıklık binanın tüm yüksekliği boyunca perde duvarlarla güçlendirilmiş ve sonuç olarak her kat için üç perde duvar elde edilmiştir. Son olarak tüm perde duvar alternatifi için ise, zayıf eksen doğrultusundaki dört açıklık ve güçlü eksen doğrultusundaki iki açıklık duvarlarla güçlendirilmiş ve her kat için altı perde duvar elde edilmiştir. Şekil 6, 7 ve 8 sırasıyla, çapraz bağlantı, kısmi perde duvar ve tüm perde duvar güçlendirme alternatiflerinin 3-Boyutlu modelini göstermektedir.



Şekil 6. Çapraz bağlantılarla güçlendirilmiş yapının 3-Boyutlu modeli [3]



Şekil 7. Kısmi perde duvarla güçlendirilmiş yapının 3-Boyutlu modeli [3]



Şekil 8. Tüm perde duvarla güçlendirilmiş yapının 3-Boyutlu modeli [3]

6 HASARGÖREBİLİRLİK EĞRİLERİ

Herhangi bir yapısal sistemin değişik seviyelerdeki sismik yer sarsıntılarında kaynaklanan hasargörebilirliğini hesaplamak, Fayda-Maliyet analizi için oldukça önemli bir safhadır. Hasargörebilirlik, bir tehlikenin oluşması sonucunda, bir risk elemanında veya risk

grubunda meydana gelecek kayıp derecesi olarak tanımlanır. Risk altındaki bir elemanın hasargörebilirlik eğrileri, yükleme esnasında o elemanın fiziksel ve sosyo-ekonomik verilere bağlı değişik performans sınırlarını aşan davranışının olasılık olarak ifadesidir. İnsan hayatının, yapıların, sistemlerin ve sosyo-ekonomik yapının hasargörebilirliği kent alanlarında deprem riskini ve kayıplarını etkileyen en önemli faktörlerdir [9].

Bu çalışmada hasar verisi analitik yaklaşımla elde edilmiştir. Yeni analiz teknikleri büyük ve karmaşık yapılar için çok hızlı bir şekilde hasar verisinin elde edilmesini sağlamaktadır; ancak tüm bu gelişmelere rağmen yapılar büyük sismik taleplere maruz kaldıklarında var olan yöntemler sonuca ulaşmakta zorluklar yaşamaktadır [10].

6.1 Hasargörebilirlik Eğrilerinin Hesabı

Yapısal kapasite ve sismik yükleme, normal veya logaritmik-normal rasgele değişkenler olarak tanımlanabilecekleri için, merkezi limit teoremine dayanarak, bileşik performans değerlerinin logaritmik-normal dağılacığı gösterilebilir ve bu yüzden de hasargörebilirlik eğrileri logaritmik-normal birikimli olasılık fonksiyonları ile ifade edilebilirler [11,12]. Böyle bir eğriyi tanımlamak için ortanca değer ve logaritmik standart sapma olmak üzere iki parametre gerekmektedir ve söz konusu bu iki parametre en büyük olabilirlik yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilir [12]. Bu yaklaşımda kullanılan olabilirlik fonksiyonu

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1-x_i} \quad (3)$$

denklemleriyle ifade edilebilir. Bu denklemde $F(a_i)$ belirli bir hasar seviyesinde a_i değerli PGA için hasargörebilirlik eğrisinin değerini, x_i yapıdaki hasarın belli bir seviyeyi aşmadığını temsil eden değişkeni (öyle ki eğer tanımlanan hasar seviyesi aşıldıysa $x_i=1$, eğer aşılmadıysa $x_i=0$ alınır), N ise analizde kullanılan toplam PGA sayısını göstermektedir. Logaritmik-normal tanımına dayanarak, sürekli hasargörebilirlik eğrisi

$$F(a) = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{a}{c} \right)}{\zeta} \right) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, a PGA değerini, $\Phi()$ standart normal dağılım fonksiyonunu, c ortanca PGA değerini, ζ ise kapasite ve yüklemdeki belirsizlik ve rastlantısallığın analize dahil edilebilmesine olanak tanıyan logaritmik-normal standart sapmayı göstermektedir. Bu parametlerin c_e ve ζ_e ile gösterilen aranan değerleri, olabilirlik fonksiyonu L 'nin (Denklemler (3)) ya da eşdeğer olarak bu fonksiyonun doğal logaritması $\ln(L)$ 'nin enbüyütülmesi sonucu bulunur; dolayısıyla çözülmesi gereken denklemler

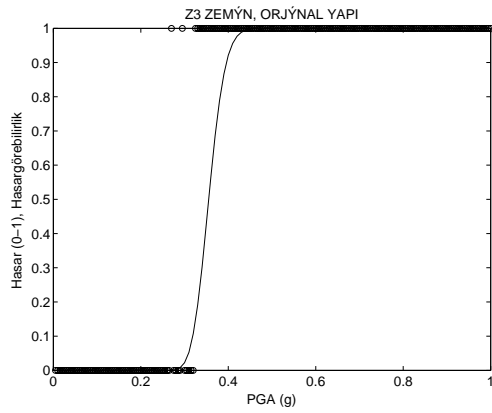
$$\left. \frac{d \ln L}{dc} \right|_{c=c_e} = \left. \frac{d \ln L}{d\zeta} \right|_{\zeta=\zeta_e} = 0 \quad (5)$$

olarak verilebilir. Söz konusu işlem basit bir eniyileme algoritmasıyla gerçekleştirilmiştir [12].

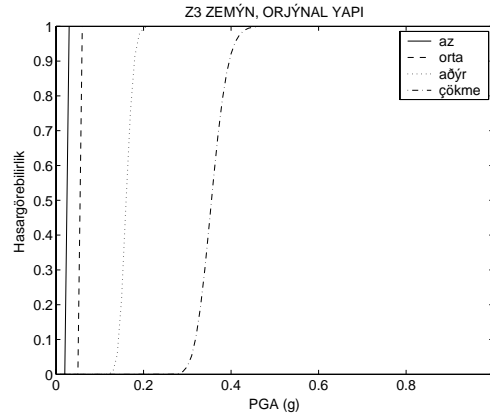
Bu analizdeki temel noktalardan biri, hasarın tanımlanması ve tanımlanan hasar seviyeleri için eşik değerlerinin seçilmesidir. Taşıyıcı elemanlar ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar için tepki parametresi olarak *en büyük göreceli kat ötelemesi*, ivmeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar için ise *en büyük mutlak ivme* kullanılmıştır. En büyük göreceli kat ötelemesi, bir katın, hemen altındaki kata göre gerçekleşen yerdeğişimlerinin mutlak değerlerinin en büyüğü (δ) olarak tanımlanmaktadır. Bulunan δ değeri kat yüksekliği h ile oranlanarak taşıyıcı ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar için tepki parametresi olarak kullanılmıştır. Yapılan analizlerde az hasar, orta hasar, ağır hasar ve çökme olmak üzere dört değişik hasar seviyesi tanımlanmış ve bu seviyeler için kullanılan eşik değerleri Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Tanımlanan hasar seviyeleri için HAZUS [13] tarafından önerilen eşik değerleri

Hasar Seviyeleri	Eşik Değerleri		
	Ötelemeye duyarlı Elemanlar		İvmeye Duyarlı Elemanlar
	Taşıyıcı	Taşıyıcı olmayan	Taşıyıcı olmayan
H_1 : az hasar	$\delta/h > 0.0013$	$\delta/h > 0.004$	$a > 0.2g$
H_2 : orta hasar	$\delta/h > 0.0033$	$\delta/h > 0.008$	$a > 0.4g$
H_3 : ağır hasar	$\delta/h > 0.0080$	$\delta/h > 0.025$	$a > 0.8g$
H_4 : çökme	$\delta/h > 0.0187$	$\delta/h > 0.050$	$a > 1.6g$

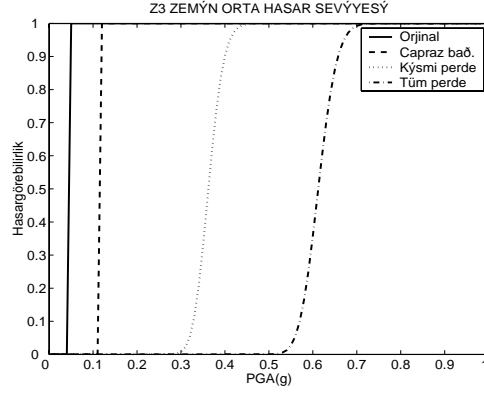


Şekil 9. Taşıyıcı elemanlar için çökme hasar seviyesinin 0 – 1 değişkenlerine göre çizilen hasargörebilirlik eğrisi

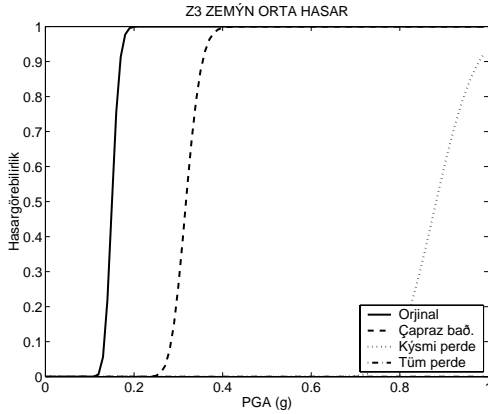


Şekil 10. Orjinal yapıda taşıyıcı elemanların her hasar seviyesi için çizilen hasargörebilirlik eğrileri

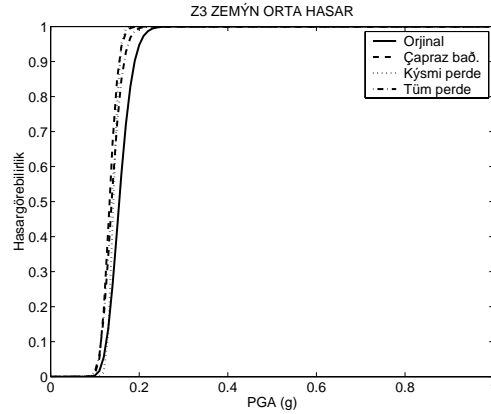
Özetlemek gerekirse, taşıyıcı elmanların hasargörebilirlik eğrilerini elde etmek için; (a) verilen ivme spektrumuyla uyumlu ve PGA değerleri yaklaşık olarak $0g-1g$ arasında değişen 200 adet sentetik yer ivmesi kaydı yaratılmış, (b) bu kayıtların her biri için 2-Boyutlu model kullanılarak doğrusal dinamik analiz gerçekleştirilmiş, (c) bu analizlerin her birinde hesaplanan en büyük göreceli kat yer değiştirmeleri oranları yukarıda belirtilen eşik değerleri ile karşılaştırılarak yapıda belirlenen hasar seviyesinin oluşup oluşmadığına karar verilmiş ve her PGA değeri için hasar 0-1 şeklinde temsil edilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere bu bilgiler daha sonra Denklem 3'de yerine konarak, hasargörebilirlik eğrilerinde kullanılacak parametreler Denklem 5'in yardımıyla hesaplanmıştır. Benzer işlemler, taşıyıcı olmayan yer değiştirmeye duyarlı elemanlar ve ivmeye duyarlı elemanlar için de hassasiyetlerine uygun yapılmıştır.



Şekil 11. Orta hasar seviyesi için hasargörebilirlik eğrileri: Taşıyıcı elemanlar, Z3 zemin.

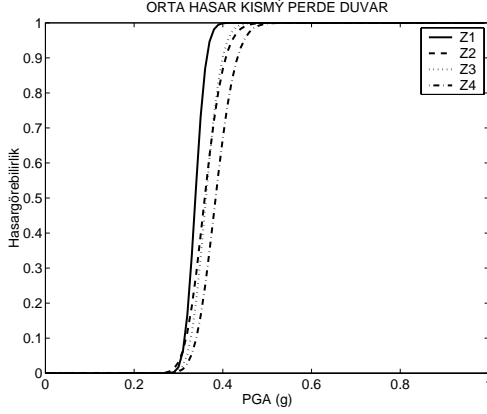


Şekil 12. Orta hasar seviyesi için hasargörebilirlik eğrileri: Ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar, Z3 zemin.



Şekil 13. Orta hasar seviyesi için hasargörebilirlik eğrileri: İvmeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar, Z3 zemin.

Elde edilen sonuçlardan bazı örnekler Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Şekil 9, çökme hasar seviyesi için elde edilen ve değişik PGA değerlerine tekabül eden 0-1 gösterimini ve ayrıca bu değişkenlere logaritmik-normal kabul altında uygun bulunan hasargörebilirlik eğrisini, Şekil 10 ise orjinal yapının her hasar seviyesi (az, orta, çok ve çökme) için çizilen hasargörebilirlik eğrilerini göstermektedir.



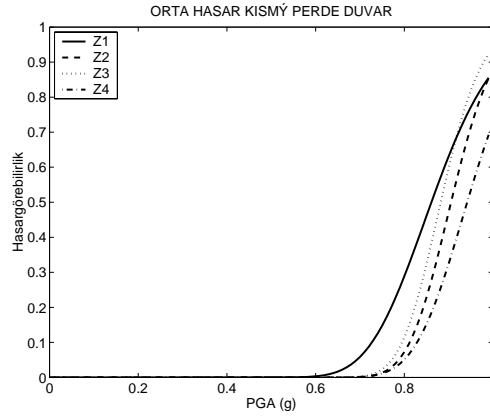
Şekil 14. Kısmi perde duvarlı yapıda taşıyıcı elemanların değişik zeminlerdeki performansları.

altında yapının durumu ve önerilen güçlendirmelerin sağlayacağı iyileştirmeler hakkında kolay yorumlanabilecek grafik ve sayısal bilgi verirler. Örneğin Şekil 11'de, Z3 zemininde konumlanan yapıdaki taşıyıcı elemanlar için orta hasar seviyesinin aşılma riski, orjinal bina ve burada incelenen tüm güçlendirme alternatifleri için sunulmuştur. Bu şekil, güçlendirme alternatiflerinin sağlayacakları faydaları açıkça göstermektedir: Yapının orjinal halinde 0.05g büyüklüğünde bir PGA değeri bile neredeyse 1 olasılıkla taşıyıcı elemanlarda orta hasar seviyesinin aşılmasına sebebiyet verebilecekken, tüm perde alternatifinde ancak 0.75g değerlerindeki bir PGA için bu büyüklükte bir olasılıktan bahsedilebilir. İyileştirmelerin sağlayacağı faydalar, hasargörebilirlilik eğrilerinin ortanca değerlerinden de anlaşılabilir; görüldüğü üzere tüm güçlendirme önerilerinin ortanca değerleri orjinal yapının ortanca değerinden fazladır. Bir başka saptama da ortanca değerlerdeki artışların, güçlendirmelerin yapının rijitliğine olan katkılarıyla doğru orantılı olarak gelişmeleridir; öyle ki çapraz bağ alternatifi en az, tüm perde alternatifi de en çok faydayı sağlar gözükmektedir. Fakat unutulmamalıdır ki hasargörebilirlilik eğrileri burada önerilen yöntemin sadece bir kısmıdır; daha ileriki bölümlerde göreceğimiz üzere,

tüm perde alternatifinin bu aşamada görüldüğü kadarı ile en fazla iyileştirmeyi sağlaması bu alternatifin ekonomik olarak en uygun olması manasına gelmemektedir.

Beklendiği üzere, hasar seviyesi arttıkça, hasargörebilirlilik eğrilerinin ortanca değerleri de yüksek PGA değerlerine doğru kaymaktadır. Aynı yöntem kullanılarak: (a) Z3 zemin sınıfı üzerine konumlanmış yapının, (a.1) çapraz bağlantı, (a.2) kısmi perde duvar ve (a.3) tüm perde duvar alternatifleri ile güçlendirilmiş hallerinde; taşıyıcı, ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan ve ivmeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar için hasargörebilirlilik eğrileri, (b) Z1, Z2, Z4 yerel zemin sınıfları için önerilen ivme spektrumlarıyla uyumlu olarak yaratılan sentetik ivme kayıtları kullanılarak yapının bu zemin sınıflarında olduğu varsayıldığında (a)'da belirtilen alternatifler için geçerli olacak hasargörebilirlilik eğrileri çizilmiştir.

Hasargörebilirlilik eğrileri, deprem riski



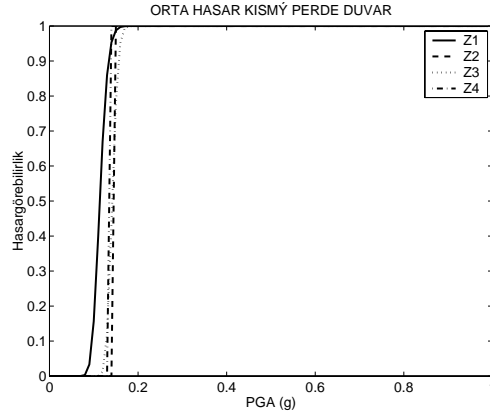
Şekil 15. Kısmi perde duvarlı yapıda ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanların değişik zeminlerdeki performansları.

Fayda-Maliyet analizi gerçekleştirilirken kullanılacak maliyetlerin bir kısmı da taşıyıcı olmayan elemanlarda meydana gelmesi muhtemel kayıplardır. Z3 zemin türünde konumlanan yapıdaki ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar için geliştirilen hasargörebilirlik eğrileri Şekil 12’de, ivmeye duyarlı elemanlar için geliştirilen hasargörebilirlik eğrileri de Şekil 13’de verilmiştir. Şekil 12’de görüldüğü üzere ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanların hasargörebilirlik eğrileri, taşıyıcı elemanlarınkı ile hayli benzerlik göstermektedir; aradaki farklar her iki eleman tipi için seçilen eşik seviyelerindeki farklardan (bkz. Çizelge 4) ileri gelmektedir. Önemli farklardan bir tanesi olarak, tüm perde alternatifi için ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanların hasargörebilirlik eğrisinin incelenen PGA aralığında ihmal edilebilir değerlerde olması belirtilebilir; bu eğrinin Şekil 12’de açıkça seçilememesi de bu sebeptendir. Öte yandan, önerilen güçlendirmelerin ivmeye duyarlı elemanlar için ümit edilen faydayı sağlayamadıkları Şekil 13’de gösterilen eğrilerden kolayca anlaşılabilir. Daha da önemlisi, güçlendirmelerin yapının rijitliğine etkisiyle sonucu katlarda görülen ivmelerin artmasıyla birlikte, ötelemeye duyarlı elemanlar için en faydalı seçenek olarak gözüken tüm perde alternatifi ivmeye duyarlı elemanlar açısından en olumsuz seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum kapsamlı bir Fayda-Maliyet analizinin doğru karar verebilmek açısından gerekliliğini bir kez daha ortaya koyar; önerilen alternatifler arasından doğru seçimi yapabilmek için elemanların hasar risklerini ve olası hasarların parasal değerlerini birlikte değerlendirmek şart gözükmektedir.

Kısmi perdeli yapının Z1, Z2, Z3 ve Z4 zemin türlerinde konumlandığı varsayıldığında taşıyıcı elemanlar, ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar ve ivmeye duyarlı elemanlar için geliştirilen hasargörebilirlik eğrileri sırasıyla Şekil 14, 15 ve 16’da verilmiştir. Bu şekillere bakarak zemin türlerinin hasargörebilirlik eğrileri ile açık bir şekilde ilintilendirilmeleri pek mümkün gözükmemektedir; her ne kadar eğrilerin ortanca değerleri birbirlerine yakın gibi gözükseler de standard sapmalardaki farklar ve ortanca değerlerdeki kaymalar ile zemin sınıfları arasında doğrusal bir bağıntı kurulamaması, burada kullanılan yöntemin kolayca genelleştirilemeyeceğine işaret eder. Sonuç olarak hasargörebilirlik eğrileri geliştirilirken, seçilmiş bir yapının, bulunduğu zemin ile beraber analiz edilmesinin gerekliliğini ve diğer zemin türleri için genellemelere gitmenin sakıncalarını gözetmek gerekir.

7 FAYDA-MALİYET ANALİZİ

Ekonomik analizlerde sıkça kullanılan *net bugünkü değer* kavramı, gelecekteki bir afet (deprem) sonucunda orjinal yapıda oluşması beklenen hasarlarla güçlendirilmiş yapıda oluşması beklenen hasarlar arasındaki farkın şu anki parasal değerlerle ifade edilmesidir. Eğer *net bugünkü değer* sıfırdan büyük ise söz konusu proje uygulamaya değer demektir.



Şekil 16. Kısmi perde duvarlı yapıda ivmeye duyarlı elemanların değişik zeminlerdeki performansları.

Bu kavram temel alınarak güçlendirme aktiviteleri arasında bir sıralama yapmak ve ekonomik olarak en iyi tercihi belirlemek mümkün olabilir. Bu çalışmada Fayda-Maliyet analizi için: (1) Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlardaki olası hasarlar; (2) Bina içerik hasarları; (3) Acil barınma maliyeti; (4) Güçlendirme maliyeti; (5) İnsani kayıplar (ölümler ve yaralanmalar) olmak üzere 5 çeşit kayıp incelenmiştir.

7.1 Maliyet Hesabı

7.1.1 Yapısal Kayıplar

Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların yenilenme maliyetleri İstanbul'da bulunan ve deprem güçlendirmelerinde uzman firmalardan temin edilmiştir. Bu fiyatlar haricinde, tamir sürecinde yenileme dışında oluşması muhtemel ek kayıpları da analizlere katmak amacıyla, Fayda-Maliyet analizi için Feritto [14] tarafından kullanılan ve Çizelge 5'te verilen tamir oranları analizlere dahil edilmiştir.

Çizelge 5. Bina elemanları için tamir oranları [16]

Elemanlar	Tamir Oranı
Taşıyıcı Elemanlar	1.50
Mekanik ekipman	1.25
Elektrik ekipman	1.25
Mimari elemanlar	1.25
Asansörler	1.25
Bina İçeriği	1.05

Bu oranlara bağlı olarak, i'inci hasar seviyesinde zarar görmüş bir elemanın tamir maliyeti,

$$(Tamir Maliyeti) = TM_i = (Yenileme Maliyeti) \times (Tamir Oranı) \quad (7)$$

denklemini kullanılarak hesaplanabilir.

Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlar için oluşan yapısal kayıpları maliyet analizine katmanın en kolay yolu, HAZUS [13] tarafından da önerildiği üzere, bu kayıpların bina maliyetinin yüzdesi cinsinden hesaplanmasıdır. Örneğin, taşıyıcı elemanlarda az hasar seviyesi için kayıp oranı bina maliyetinin %1'i, ağır hasar seviyesi için ise %100'ü olarak kabul edilmiştir. Fayda-Maliyet analizinin çerçevesi ileride hastahane ve okulları da kapsayacak şekilde genişletileceğinden, her bina türü ve hasar seviyesi için önerilen kayıp oranları ve toplam 1600 m² kullanım alanı olan bina için m² başına alınan tamir maliyetleri Çizelge 6'da verilmiştir.

7.1.2 İnsani Kayıplar

İnsani kayıplar esas olarak yapıdaki hasarlardan kaynaklanır ve hasar seviyesiyle, yıkılan taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların ağırlıklarıyla ve deprem esnasında binada bulunan insan sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Deprem ve insan kaybı arasındaki ilişkinin belirlenmesi HAZUS [13] tarafından önerilen, yaralanma derecesine bağlı insani kayıp tanımlaması ile gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir bina türünde ve hasar seviyesinde oluşacak insani kayıplardan kaynaklanan maliyetler Denklem (8a) ve (8b) esas alınarak hesaplanabilir. Söz konusu denklemlerde *i*

hasar seviyesini (1→az, 2→orta, 3→ağır, 4→çökme), j yaralanma derecesini (Seviye 1, 2, 3 ve 4), $\dot{I}K_i$ ise i hasar seviyesi için insani kayıp maliyeti toplamını göstermektedir.

$$(Kayıp)_{ij} = (\text{Binadaki insan sayısı}) \times (\text{Yaralanma oranı})_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \quad (8a)$$

$$\dot{I}K_i = \sum_{j=1}^4 (Kayıp)_{ij} \times (\text{Yaralanma Maliyeti})_j \quad (8b)$$

İnsani kayıplardan kaynaklanan maliyetlerin hesaplanması sırasında tehdit altındaki insan sayısı, binanın kullanım alanına göre konut, hastahane ve okullar için sırasıyla 40, 250 ve 500 olarak kabul edilmiştir; ancak geçmiş depremlerle ilgili verilerin eksik olması yaralanma oranının tam olarak belirlenmesini engellemektedir.

Çizelge 6. Her bina türü ve hasar seviyesi için kayıp oranları(%) [13] ve tamir maliyetleri (\$/m²)

Yapı Türü	Elemanlar	Tamir maliyetleri (\$/m ²) ve Kayıp oranları (%)							
		Az Hasar		Orta Hasar		Ağır Hasar		Çökme	
Konut	Taşıyıcı	\$1,88	1	\$18,8	10	\$188	100	\$187	100
	İvmeye duyarlı T.O.	\$5,50	2	\$26,1	10	\$131	50	\$261	100
	Ötelemeye duyarlı T.O.	\$1,00	2	\$5,0	10	\$25	50	\$47	100
Hastahane	Taşıyıcı	\$1,88	1	\$18,8	10	\$188	100	\$188	100
	İvmeye duyarlı T.O.	\$9,00	2	\$48,0	10	\$238	50	\$475	100
	Ötelemeye duyarlı T.O.	\$2,00	2	\$6,0	10	\$30	50	\$62	100
Okul	Taşıyıcı	\$1,88	1	\$18,8	10	\$188	100	\$188	100
	İvmeye duyarlı T.O.	\$5,00	2	\$48,0	10	\$129	50	\$258	100
	Ötelemeye duyarlı T.O.	\$1,00	2	\$5,0	10	\$25	50	\$47	100

Çizelge 7. HAZUS [13] tarafından önerilen insani kayıp tanımlaması

Seviye 1:	Temel ilkyardım gerektiren yaralanmalar.
Seviye 2:	Hastahane tedavisi gerektiren fakat hayati tehlike içermeyen yaralanmalar.
Seviye 3:	Hemen tıbbi müdahale yapılmadığı takdirde hayati tehlike içeren yaralanmalar. Bu tür yaralanmaların çoğu yapısal çökmeler sonucu gerçekleşmektedir.
Seviye 4:	Hemen ölüm veya ömür boyu sakat kalma.

Yaralanma oranlarının belirlenmesi amacıyla, Ambraseys ve Jackson [15], Ohta [16], Coburn ve Spence [17] ve HAZUS [13] tarafından geliştirilen çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Öte yandan Türkiye'deki yapıların depremlerdeki performansları diğer

ülkelerdeki yapılara göre daha zayıf olduğundan, yukarıda bahsi geçen kaynaklarda kullanılan oranları aynen uygulamak uygun görülmemektedir. Bu sebeple hesaplamalarda Erdik ve Aydınoglu [9] tarafından geliştirilen ve Çizelge 8’de verilen yaralanma oranları kullanılmıştır.

Çizelge 8. Betonarme binalar için yaralanma oranları (%) [11]

Seviye	Az Hasar	Orta Hasar	Ağır Hasar	Çökme
1	0,050	0,20	1,00	50
2	0,005	0,02	0,50	15
3	0,000	0,00	0,01	10
4	0,000	0,00	0,01	10

İnsani kayıp maliyetinin hesabında gerekli son adım da kullanılacak parasal değerlerin belirlenmesidir; ilerideki bölümlerde daha detaylı açıklanacağı üzere, çeşitli yaralanma dereceleri için bir maliyet değeri belirlenmesi mümkünken, ölüm ve sakat kalma durumlarında maliyetin belirlenmesi oldukça zor ve tartışmaya açık bir konudur.

7.1.3 Acil Barınma Maliyeti

Acil barınma masrafları binanın tamamı veya bir bölümünün kullanılmaz duruma gelmesiyle oluşur ve bu tür masraflar geçici konutun kira maliyeti ve taşınma maliyeti olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Dolayısıyla, her hasar seviyesi i için acil barınma maliyeti ABM_i , bina tamir süresi, kira maliyeti ve taşınma maliyetine bağlı olarak

$$ABM_i = (Bina\ Tamir\ Süresi)_i \times (Kira\ Maliyeti) + (Taşınma\ Maliyeti) \quad (9)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Her hasar seviyesi ve bina türüne karşılık gelen tamir süresi ile kira ve taşınma maliyeti değerleri Çizelge 9’da verilmiştir. Bina tamir süresi için kullanılan veriler, HAZUS [13] tarafından önerilen değerlerdir.

7.1.4 Güçlendirme Maliyeti

Çizelge 10’da verilen güçlendirme maliyetleri İstanbul’da deprem güçlendirmeleri konusunda uzman kişi ve firmalardan temin edilmiştir. Tüm fiziksel ve sosyo-ekonomik kayıplar için maliyet değerleri belirlendikten sonra her güçlendirme önerisinin faydası, orjinal ve güçlendirilmiş yapıda beklenen toplam maliyetlerin farkı olarak hesaplanır.

Çizelge 9. Bina tamir süresi (gün), kira (\$/m² /gün) ve taşınma maliyeti (\$/m²) [13]

Bina Türü	Tamir Süresi (gün)				Kira Mali. (\$/m ² /gün)	Taşınma Mali. (\$/m ²)
	Az Hasar	Orta Hasar	Ağır Hasar	Çökme		
Konut	5	120	480	960	0,06	1,8
Hastahane	20	135	540	720	0,09	3,0
Okul	10	90	360	480	0,09	2,0

Çizelge 10. Güçlendirme Maliyetleri

Güçlendirme Alternatifi	Maliyet
Orjinal	\$0
Çapraz Bağ	\$65.000
Kısmi Perde	\$90.000
Tüm Perde	\$150.000

Seçilen bir T_N zaman aralığında oluşması beklenen net bugünkü kayıp (NBK),

$$NBK = \sum_{T=1}^{T_N} \sum_{i=1}^4 \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} [R(a+da, T) - R(a, T)] P(\text{sadece } E_i | a) \frac{HM_i}{(1+d)^{T-1}} da \quad (10)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Bu denklemlerde;

$R(a, T)$ = geçmiş yıllarda yıkıcı bir deprem olmadığı varsayımı altında tepe yer ivmesinin a değerini aşma olasılığı

= (T yılında a değerinin aşılma olasılığı) x (geçmiş $(T-1)$ yıl içinde yıkıcı bir deprem gerçekleşmeme olasılığı)

$$= R(a) \times e^{-R(a_{\min})(T-1)}$$

Son eşitlikte kullanılan $R(a) \times e^{-R(a_{\min})(T-1)}$ terimi, depremin gerçekleşme olasılığının Poisson dağılıma uyduğu varsayımı altında geçmiş $(T-1)$ yıl içinde yıkıcı bir depremin gerçekleşmeme olasılığını göstermektedir. Kullanılan a_{\min} değeri analize dahil edilen tepe yer ivmesi değerlerinin alt sınırını belirtir ve bu değerin aşılmaması “yıkıcı” bir deprem olmadığı anlamına gelir; bu çalışmada a_{\min} değeri 0.01g olarak kabul edilmiştir. H_i yapının $i=1,2,3,4$ ile tanımlanan hasar seviyelerinden herhangi birisine tabi olması olayını, $P(\text{sadece } H_i | a)$ ise tepe yer ivmesinin a değerine eşit olması halinde sadece H_i olayının gerçekleşme olasılığını göstermektedir. Eğer i 'inci hasar seviyesi için hasargörebilirlik eğrisinin a tepe yer ivmesi için değerini $F_i(a)$ ile gösterirsek bu olasılıklar

$$P(\text{sadece } H_1 | a) = F_1(a) - F_2(a), \quad P(\text{sadece } H_2 | a) = F_2(a) - F_3(a),$$

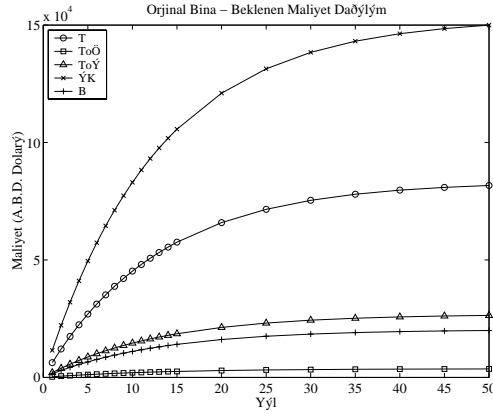
$$P(\text{sadece } H_3 | a) = F_3(a) - F_4(a), \quad P(\text{sadece } H_4 | a) = F_4(a)$$

ifadeleriyle tanımlanırlar. HM_i , H_i olayından kaynaklanan hasar maliyetini temsil eder ve $[HM_i = (TM_i + \dot{I}K_i + ABM_i) \times (\text{Kullanım alanı})]$ denklemleri kullanılarak hesaplanır. Son olarak T_N analizde incelenen zaman dilimini, d ise faiz oranını⁷ göstermektedir.

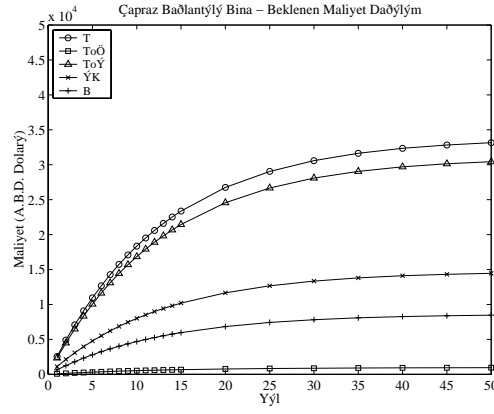
Şekil 17- 20, zemin sınıfı Z3, $d = 2\%$, $T_N = 50$ yıl ve (Yaralanma Maliyeti)₄ = 500.000 A.B.D. Doları kabul edildiğinde, sırasıyla orjinal bina, çapraz bağlantılı bina, kısmi perde

⁷ Fayda-Maliyet analizi boyunca kullanılan faiz oranı (d), enflasyon değeri ve paranın satın alma gücüne bağlı olarak ayarlanan reel faiz oranıdır.

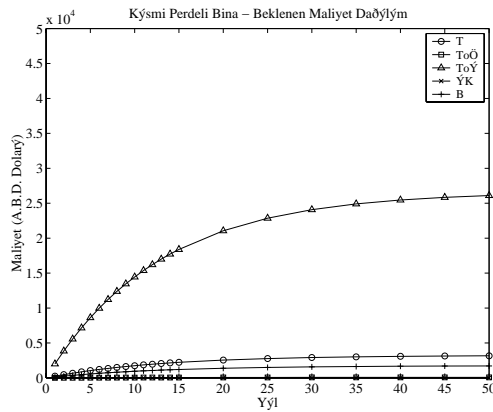
duvarlı bina ve tüm perde duvarlı bina seçeneklerindeki yapı elemanları, insani kayıplar ve acil barınma için beklenen maliyet dağılımını göstermektedir. Şekil 17’de görüldüğü üzere



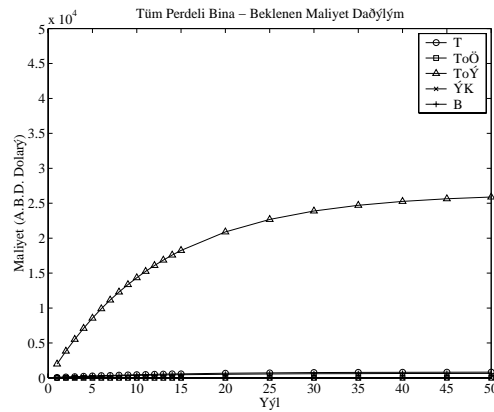
Şekil 17. $d=2\%$, $YSM_4 = \$500.000$ ve $T_N = 50$ için orjinal yapıda beklenen maliyetlerin dağılımı.



Şekil 18. $d=2\%$, $YSM_4 = \$500.000$ ve $T_N = 50$ için çapraz bağlantılı yapıda beklenen maliyetlerin dağılımı.



Şekil 19. $d=2\%$, $YSM_4 = \$500.000$ ve $T_N = 50$ için kısmi perdeli yapıda beklenen maliyetlerin dağılımı.



Şekil 20. $d=2\%$, $YSM_4 = \$500.000$ ve $T_N = 50$ için tüm perdeli yapıda beklenen maliyetlerin dağılımı.

yıkıcı bir deprem olduğunda orjinal bina için hasar maliyetinin en önemli kısmını insani kayıplar oluşturmaktadır. İnsani kayıpları (İK) sırasıyla taşıyıcı elemanlar (T), ivmeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar (Toİ), acil barınma masrafları (B) ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar (ToÖ) takip etmektedir. İnsani kayıpların en yüksek hasar maliyetli eleman olması, ölüm ve sakat kalma maliyeti ((Yaralanma Maliyeti)₄) 500.000 A.B.D. Doları olarak kabul edilirken, taşıyıcı elemanlar için tamir maliyetinin en fazla 300.000, ivmeye duyarlı elemanlar için ise 400.000 A.B.D. Doları olmasından

kaynaklanmaktadır. Kuşkusuz insani kayıplar için kabul edilen birim maliyet değeri arttıkça bu kayıplar toplam hasar maliyetinin hesabında daha da baskın bir parametre olacaktır. İvmeye duyarlı elemanlar için tamir maliyeti taşıyıcı elemanlara göre daha fazla olsa da, oluşturulan hasargörebilirlik eğrilerinde taşıyıcı elemanlar için hasar görme olasılığının en yüksek olması, bu elemanların hasar maliyetinin daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. Ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanların hasar maliyetinin toplam maliyetin en düşük kısmını oluşturması hem bu elemanlar için tamir maliyetinin düşük olmasından hem de bu elemanlarda hasar görme olasılığının diğer elemanlara göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Çapraz bağlantılı bina için beklenen maliyet dağılımı incelendiğinde, taşıyıcı elemanların hasar maliyetinin en önemli kısmını oluşturduğu ve bunu sırasıyla ivmeye duyarlı elemanlar, insani kayıplar, acil barınma masrafları ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanların takip ettiği Şekil 18'den anlaşılabilir. Orjinal binanın hasar maliyet dağılımıyla karşılaştırıldığında çapraz bağlı binada ivmeye duyarlı elemanlar hariç her eleman için hasar maliyetinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, güçlendirme aktivitesinin yapıya kazandırdığı rijitlikten kaynaklanmaktadır (bkz. Şekil 11-13). Güçlendirme işlemiyle taşıyıcı elemanlar ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar için hasar görme olasılığı azalmakta ve dolayısıyla bu elemanlar için tamir maliyeti düşmektedir; öte yandan binanın rijitliğindeki artış ivmeye duyarlı elemanlar için hasar görme olasılığının artmasına ve dolayısıyla bu tip elemanlarda tamir maliyetinin orjinal binaya göre daha fazla olmasına sebep olmaktadır. İnsani kayıpların orjinal binadaki kayıplara göre neredeyse onda birine kadar düşmesi, ölüm ve sakat kalma oranının en fazla olduğu çökme hasar seviyesinin (bkz. Çizelge 8) görülme olasılığının çapraz bağlı binada orjinal binaya göre oldukça az olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 19'da görüldüğü üzere kısmi perde duvarlı yapı için hasar maliyeti daha önce incelenen her iki yapı türüne göre oldukça düşüktür. Hasar/Maliyet dağılımı incelendiğinde baskın parametrenin ivmeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar olduğu, diğer elemanların hasar maliyetlerinin birbirine eşit ağırlıkta dağıldığı kolayca görülebilir. Perde duvar güçlendirmesiyle ötelemeye duyarlı taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar görme olasılığı daha da azalırken ivmeye duyarlı elemanlarda hasar olasılığı artmakta ve bu durum söz konusu elemanların hasar maliyetlerine de yansımaktadır. İnsani kayıplar orjinal yapının hasar maliyeti için baskın bir parametre olduğu halde, incelenen PGA aralığında kısmi perde alternatifini için çökme hasar seviyesinin görülmemesi bu tip kayıpların hasar maliyetine katkısını oldukça azaltmakta ve en düşük maliyetli parametre olmalarına sebep olmaktadır.

İncelenen alternatifler arasında en düşük hasar maliyeti, Şekil 20'den de anlaşılabilir. Üzere, tüm perde duvar güçlendirmesiyle sağlanmaktadır. Temsili bina tüm perde duvar alternatifleriyle güçlendirildiğinde, beklenen hasar maliyetinde kısmi perdeli yapıda olduğu gibi ivmeye duyarlı elemanların baskın parametre olduğu; daha da önemlisi diğer parametrelerin hasar maliyetine olan katkısının ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülebilir. Bu durum kuşkusuz incelenen PGA aralığında tüm perde duvar alternatifini için, taşıyıcı ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanların ağır hasar ve çökme hasargörebilirlik eğrilerinin ihmal edilebilir değerlerde olmasından kaynaklanmaktadır. Güçlendirme sonucu ivmeye duyarlı elemanlarda, ötelemeye duyarlı elemanların aksine hasar seviyelerinin aşılma riskinin azalmaması, bu elemanları hasar maliyeti hesabında baskın parametre yapmaktadır.

Sadece yapısal ve insani kayıplar göz önüne alındığında, tüm perde güçlendirmesinin hasar maliyetini en fazla düşürdüğü gözlemlense de, güçlendirme projesinin kendi maliyetinin henüz hesaba katılmadığı unutulmamalıdır. İncelenen parametrelerle birlikte güçlendirme maliyetinin tüm alternatifler için hasar maliyetine olan etkisi Çizelge 11’de, söz konusu alternatiflerin net bugünkü değerleri ise Çizelge 12’de verilmiştir. Çizelge 11 ve 12’nin I. kısmında sadece yapısal kayıplar ve barınma maliyeti, II. kısmında yapısal kayıplar, barınma maliyeti ve güçlendirme maliyeti, III. kısmında ise tüm parametreler analize dahil edilmiştir. Fayda-Maliyet analizine sadece yapısal kayıplar dahil edildiğinde tüm perde duvar alternatifi beklenildiği gibi en fazla iyileştirmeyi sağlarken, güçlendirme maliyeti de analize dahil edildiğinde tüm perde duvar güçlendirmesinin kısmi perde duvar ve çapraz bağlantı güçlendirmelerinin yanında ekonomik olarak en olumsuz seçenek olduğu söylenebilir (bkz. Çizelge 12.II). Daha da önemlisi, insani kayıplar analize dahil edilmediğinde çapraz bağlantı ve tüm perde duvar alternatifleri 50 yıllık zaman diliminde ekonomik olarak zarara sebep olmakta, kısmi perde duvar alternatifi ise $T_N \geq 30$ yıl için ekonomik fayda sağlamaya başlamaktadır. Tüm parametreler kullanılarak Fayda-Maliyet analizi yapıldığında $T_N \leq 5$ yıl için tüm alternatifler ekonomik olarak zarara sebep olurken, $5 \leq T_N \leq 10$ yıl için çapraz bağlantılı bina, $T_N \geq 10$ yıl için ise kısmi perde duvarlı bina ekonomik olarak en uygun seçenek olmaktadır.

Çizelge 11. İncelenen parametrelere göre her alternatif için Net Bugünkü Kayıp
(10^3 A.B.D. Doları)

Yıl	I				II				III			
	orjinal	çapraz	kısmi	tüm	orjinal	Çapraz	kısmi	Tüm	orjinal	çapraz	kısmi	Tüm
1	\$10,1	\$5,6	\$2,4	\$2,1	\$10,1	\$70,6	\$92,4	\$152,1	\$21,6	\$71,7	\$92,4	\$152,1
2	\$19,5	\$10,8	\$4,6	\$4,0	\$19,5	\$75,8	\$94,6	\$154,0	\$41,6	\$77,9	\$94,6	\$154,0
3	\$28,1	\$15,6	\$6,6	\$5,8	\$28,1	\$80,6	\$96,6	\$155,8	\$60,1	\$83,6	\$96,6	\$155,8
4	\$36,1	\$20,0	\$8,5	\$7,5	\$36,1	\$85,0	\$98,5	\$157,5	\$77,2	\$88,9	\$98,5	\$157,5
5	\$43,5	\$24,0	\$10,3	\$9,0	\$43,5	\$89,0	\$100,3	\$159,0	\$93,0	\$93,8	\$100,3	\$159,0
10	\$72,9	\$40,1	\$17,2	\$15,2	\$72,9	\$105,1	\$107,2	\$165,2	\$155,9	\$113,1	\$107,2	\$165,2
20	\$106,3	\$58,1	\$25,1	\$22,1	\$106,3	\$123,1	\$115,1	\$172,1	\$227,3	\$134,8	\$115,1	\$172,1
30	\$121,5	\$66,2	\$28,6	\$25,3	\$121,5	\$131,2	\$118,6	\$175,3	\$259,9	\$144,5	\$118,7	\$175,3
40	\$128,5	\$69,8	\$30,3	\$26,7	\$128,5	\$134,8	\$120,3	\$176,7	\$274,8	\$148,9	\$120,3	\$176,7
50	\$131,7	\$71,4	\$31,0	\$27,4	\$131,7	\$136,4	\$121,0	\$177,4	\$281,7	\$150,9	\$121,0	\$177,4

Bu çalışmada; (a) faiz oranı, (b) insan hayatının değeri, (c) yerel zemin sınıfı parametrelerinin etkileri yapılan duyarlılık analiziyle incelenmiştir. Bu analiz sonucunda tüm zemin sınıflarında çapraz bağlantı güçlendirmesinin daha önce ekonomik fayda sağladığı, fakat uzun vadede kısmi perde duvar alternatifinin en uygun seçenek olduğu, tüm perde duvar güçlendirmesinin ise incelenen alternatifler arasında en olumsuz seçenek olduğu görülmüştür. Faiz oranı ve (Yaralanma Seviyesi)₄ için yapılan duyarlılık analizi sonucunda ekonomik olarak en uygun seçenek olan kısmi perde güçlendirmesinin Z3 zemin türünde beklenen $T_N = 30$ yıl için fayda değerleri Çizelge 13’de, söz konusu güçlendirmenin $T_N \leq 50$ yıl için ekonomik fayda sağlamaya başladığı yıl ise Çizelge 14’de verilmiştir. Çizelge 13 ve 14’den görüldüğü üzere kısmi perde duvar güçlendirmesi insan hayatına verilen değerler fazla, faiz oranının ise düşük olduğu durumlarda ekonomik olarak en fazla faydayı sağlamaktadır.

Çizelge 12. Her altrenatif için Net Bugünkü Değer
(10³ A.B.D. Doları)

Yıl	I			II			III		
	çapraz	kısmi	tüm	çapraz	kısmi	tüm	çapraz	Kısmi	tüm
1	\$4,5	\$7,7	\$8,0	-\$60,5	-\$82,3	-\$142,0	-\$50,1	-\$70,8	-\$130,5
2	\$8,7	\$14,9	\$15,4	-\$56,3	-\$75,1	-\$134,6	-\$36,3	-\$53,0	-\$112,4
3	\$12,6	\$21,5	\$22,3	-\$52,4	-\$68,5	-\$127,7	-\$23,5	-\$36,5	-\$95,7
4	\$16,1	\$27,6	\$28,6	-\$48,9	-\$62,4	-\$121,4	-\$11,7	-\$21,3	-\$80,3
5	\$19,5	\$33,2	\$34,5	-\$45,5	-\$56,8	-\$115,5	-\$0,8	-\$7,2	-\$66,0
10	\$32,8	\$55,7	\$57,8	-\$32,2	-\$34,3	-\$92,2	\$42,8	\$48,7	-\$9,2
20	\$48,2	\$81,2	\$84,2	-\$16,8	-\$8,8	-\$65,8	\$92,5	\$112,2	\$55,2
30	\$55,4	\$92,9	\$96,3	-\$9,6	\$2,9	-\$53,7	\$115,4	\$141,2	\$84,6
40	\$58,7	\$98,2	\$101,8	-\$6,3	\$8,2	-\$48,2	\$125,9	\$154,5	\$98,1
50	\$60,3	\$100,6	\$104,3	-\$4,7	\$10,6	-\$45,7	\$130,8	\$160,6	\$104,3

Faiz oranının %4' den az olduğu durumlarda, can kayıpları analize dahil edilmediğinde dahi söz konusu güçlendirme yaklaşık 25 yıldan sonra ekonomik fayda sağlamakta, fakat daha yüksek faiz oranları için yapısal faydalar 50 yıllık zaman dilimi içinde güçlendirme maliyetini karşılayamamaktadır. Kullanılan (Yaralanma Seviyesi)₄ ≤ \$500.000 için bu güçlendirmenin ekonomik olarak fayda sağlamaya başladığı yıl faiz oranına bağlı olarak farklılıklar gösterirken, \$500.000'den büyük değerler için ortalama beşinci yıldan itibaren ekonomik olarak uygun bir seçenek olmaktadır. Faiz oranının % 20' den daha fazla olduğu durumlarda insan hayatına verilen değer en belirleyici parametre olup \$600.000'den düşük değerler için güçlendirme ekonomik zarara sebep olmaktadır.

Çizelge 13. Kısmi perde duvar güçlendirmesinin (Yaralanma Seviyesi)₄ ve Faiz Oranına bağlı olarak T_N = 30 yıl için beklenen fayda değerleri (10³ A.B.D. Doları)

d (%)	(Yaralanma Seviyesi) ₄										
	\$0	\$100	\$200	\$300	\$400	\$500	\$600	\$700	\$800	\$900	\$1.000
0	\$20,7	\$56,9	\$89,8	\$122,7	\$155,6	\$188,4	\$221,3	\$254,2	\$287,1	\$319,9	\$352,8
2	\$2,9	\$32,8	\$59,9	\$87,0	\$114,1	\$141,2	\$168,4	\$195,5	\$222,6	\$249,7	\$276,9
4	-\$11,4	\$13,9	\$36,9	\$59,8	\$82,8	\$105,8	\$128,7	\$151,7	\$174,7	\$197,6	\$220,6
6	-\$22,0	-\$0,1	\$19,8	\$39,7	\$59,5	\$79,4	\$99,3	\$119,2	\$139,0	\$158,9	\$178,8
8	-\$30,0	-\$10,7	\$6,8	\$24,3	\$41,8	\$59,3	\$76,8	\$94,4	\$111,9	\$129,4	\$146,9
10	-\$36,3	-\$19,0	-\$3,4	\$12,3	\$28,0	\$43,7	\$59,4	\$75,0	\$90,7	\$106,4	\$122,1
20	-\$53,9	-\$42,3	-\$31,8	-\$21,2	-\$10,7	-\$0,1	\$10,4	\$20,9	\$31,5	\$42,0	\$52,6
30	-\$61,8	-\$52,8	-\$44,6	-\$36,3	-\$28,1	-\$19,9	-\$11,7	-\$3,5	\$4,8	\$13,0	\$21,2

Bölüm 7.1'de kabul edilen birim hasar maliyeti değerleri ve aynı yapısal model kullanılarak okullar ve hastahaneler için Fayda-Maliyet analizi ve duyarlılık analizi tekrar edildiğinde, bu tip yapılarda da kısmi perde duvar güçlendirmesinin ekonomik olarak en uygun alternatif olduğu gözlenmiştir. Bu yapılar konut tipi yapılara göre daha önce ekonomik

Fayda sağlamaya başlamaktadır; örneğin \$500.000'den az can kaybı maliyeti için söz konusu güçlendirme neredeyse üç yıldan sonra fayda sağlamaya başlamakta, can kaybı maliyeti ve faiz oranı artırıldıkça bu değer iki yıldan az bir zamana kadar düşmektedir.

Çizelge 14. Kısmi perde duvar güçlendirmesinin ekonomik fayda sağlamaya başladığı yıl

d (%)	(Yaralanma Seviyesi) ₄ (\$)										
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
0	19	12	9	7	6	5	5	4	4	4	3
2	27	14	10	8	6	6	5	5	4	4	4
4	-	18	11	9	7	6	5	5	4	4	4
6	-	33	14	10	8	7	5	5	4	4	4
8	-	-	18	11	8	7	6	5	4	4	4
10	-	-	-	14	9	7	6	5	5	4	4
20	-	-	-	-	-	-	10	7	6	5	4
30	-	-	-	-	-	-	-	-	10	7	6

8 2-BOYUTLU DOĞRUSAL MODEL VE 3-BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN MODELİN KARŞILAŞTIRILMASI

Doğrusal ve doğrusal olmayan modeller için geliştirilen hasargörebilirlik eğrileri karşılaştırıldığında, yapının rijitliğinin az olduğu orjinal ve çapraz bağlantı seçenekleri için 2-Boyutlu doğrusal analizin, hasar seviyeleri açısından üst sınır olarak davranmaktadır görülmektedir. Öyle ki, orjinal yapı 2-Boyutlu doğrusal modelleme kullanılarak analiz edildiğinde incelenen hasar seviyelerinin aşılma riskinin 3-Boyutlu doğrusal olmayan analize göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yapı çapraz bağlantı alternatifleriyle güçlendirildiğinde ise 2-Boyutlu doğrusal model yine üst sınır olarak görülmekle birlikte hasar aşılma risklerinin iki modelde gösterdiği farklılık orjinal yapıya göre azalmıştır. Fakat perde duvar güçlendirmeleri için yapının rijitliği neredeyse orjinal yapıya göre yedi kat arttığı durumda, 2-Boyutlu doğrusal analiz diğer iki seçeneğin aksine alt sınır olarak davranmaktadır. 3-Boyutlu doğrusal olmayan analizden anlaşıldığı üzere, iki model arasındaki bu farklılığın ana nedenlerinden birinin burulma etkilerinden kaynaklanan ötelemelerin yapının rijitliği arttıkça yanıl yer değiştirme etkilerinden kaynaklanan hasarlar yanında daha hatırı sayılır hale gelmeleridir. 2-Boyutlu doğrusal analiz yapılırken taşıyıcı elemanlarda sadece yanıl yer değiştirmeye izin verilmesi ve burulma etkilerinin dikkate alınmaması, rijitliğin çok yüksek olduğu seçeneklerde yapının 3-Boyutlu modele göre daha az hasar görmesine sebep olmaktadır. Burulma etkilerini de analize dahil etmek için 3-Boyutlu bir modellemeye ihtiyaç vardır.

Smyth ve diğerleri [3] tarafından yapılan çalışmada Fayda-Maliyet analizine sadece taşıyıcı elemanlar, can kayıpları ((Yaralanma Maliyeti)₄) ve güçlendirme maliyeti dahil edilmiş, ivmeye ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanlar, barınma masrafları ve yaralanmalar ihmal edilmiştir. Sadece Z3 zemin türünde faiz oranı %10 için incelenen konut tipi yapının yenileme maliyeti \$250.000 olarak kabul edilmiş, tamir oranları hesaba

katılmamıştır. Söz konusu çalışmada kabul edilen parametreler ve maliyet değerleri kullanılarak iki farklı model için yapılan Fayda-Maliyet analizlerinin sonuçları Çizelge 15'te verilmiştir. Çizelge 15'te görüldüğü üzere, kısmi perde duvar güçlendirmesi her iki model için de ekonomik olarak en uygun alternatifken, güçlendirmelerin ekonomik fayda sağlamaya başladığı yıl ve fayda değerleri iki model arasında farklılık göstermektedir. Gözlemlenen bu farklılıkların bir nedeni, 2-Boyutlu modellenen orjinal yapı için hasar görme riskinin 3-Boyutlu modele göre daha yüksek, perde duvar alternatifleri için ise daha düşük olması ve dolayısıyla 2-Boyutlu modelde orjinal yapı için hasar maliyetinin artması, güçlendirme aktiviteleri için ise azalması, bir diğeri ise bu çalışmada maliyetlerin daha fazla detaylandırılması ve bu detaylandırmanın maliyetlere çoğunlukla güçlendirme alternatiflerinin lehine yansımadır.

Çizelge 15. 3-Boyutlu doğrusal olmayan ve 2-Boyutlu doğrusal modellerin Fayda-Maliyet Analiz Sonuçları

Yıl	3-Boyutlu Model			2-Boyutlu Model		
	Çapraz	kısmi	tüm	Çapraz	kısmi	tüm
1	-\$49,3	-\$58,8	-\$113,4	-\$31,5	-\$41,0	-\$96,8
2	-\$35,8	-\$40,7	-\$94,8	-\$7,8	-\$21,5	-\$74,2
3	-\$24,3	-\$25,1	-\$78,9	\$6,4	-\$5,9	-\$51,5
4	-\$14,3	-\$11,7	-\$65,2	\$23,8	\$14,3	-\$31,2
5	-\$5,8	-\$0,3	-\$53,5	\$38,7	\$41,6	-\$13,8
6	\$1,4	\$9,5	-\$43,5	\$51,4	\$56,5	-\$0,1
10	\$21,6	\$36,7	-\$15,8	\$86,7	\$97,5	\$42,3
25	\$42,9	\$65,4	\$13,6	\$124,1	\$141,0	\$86,1
50	\$45,2	\$68,5	\$16,8	\$128,2	\$145,8	\$90,8

9 SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, çalışmanın öne çıkardığı tartışmalar ve çalışmanın kapsamının genişletilmesi için çeşitli öneriler şöyle sıralanabilir:

1. Orjinal yapı ve incelenen güçlendirme alternatifleri için geliştirilen hasargörebilirlik eğrileri, güçlendirmelerin sağlayacağı iyileştirmeler hakkında kolayca anlaşılabilir ve istatistiki olarak manalı bilgiler vermektedir. Güçlendirmeler sayesinde yapının rijitliğinde elde edilen artış ötelemeye duyarlı elemanlarda hasar eşiklerinin aşılma olasılığını düşürürken, yapının rijitliğindeki artışla katlarda hissedilen ivme değerlerinin artması ivmeye duyarlı elemanların hasargörebilirlik eğrilerinde olumsuz etkilere sebep olmuştur.
2. Geliştirilen hasargörebilirlik eğrileri kullanılarak yapılan Fayda-Maliyet analizinde, orjinal bina için hasar olasılığına ve kabul edilen birim hasar maliyeti değerlerine bağlı olarak zararın en önemli kısmını insani kayıpların oluşturduğu, insani kayıpları sırasıyla taşıyıcı elemanların, ivmeye duyarlı elemanların, acil barınma masraflarının ve ötelemeye duyarlı taşıyıcı olmayan elemanların takip ettiği görülmüştür. Fayda-Maliyet analizine sadece yapısal kayıplar dahil edildiğinde tüm perde alternatifleri ekonomik olarak en uygun seçenek iken, güçlendirme maliyeti de analize dahil edildiğinde çapraz bağ ve tüm perde

alternatiflerinin 50 yıllık zaman diliminde ekonomik zarara sebep olduğu, kısmi perde duvar alternatifinin ise 30 yıldan sonra fayda sağladığı gözlemlenmiştir. İnsani kayıplar da dahil tüm parametrelerle analiz tekrar edildiğinde ise güçlendirme aktiviteleriyle ilgili kararlarda insani kayıpların yapısal kayıplara göre ne kadar baskın bir parametre olduğu görülmüştür. Düşük faiz oranlarında insan hayatına düşük değer verildiğinde dahi ekonomik fayda sağlanırken, faiz oranı arttıkça güçlenmeden ekonomik fayda sağlamak için insan hayatına daha yüksek değerler verilmesi gerekmektedir. Okullar ve hastahaneler için Fayda-Maliyet analizi ve duyarlılık analizi tekrar edildiğinde, bu tip yapılarda da kısmi perde duvar güçlendirmesinin ekonomik olarak en uygun alternatif olduğu görülmüştür. Bu yapıların konut tipi yapılara göre daha önce ekonomik fayda sağlamaya başlaması, güçlendirme kararı verilirken yapı tipine bağlı öncelik konusunu gündeme getirmektedir; öyle ki güçlendirme aktiviteleri uygulanırken fazla sayıda insanı barındıran binalara öncelik verilmelidir.

3. Eşdeğer 2-Boyutlu modelleme kullanılarak yapılan doğrusal analiz sonuçları Smyth ve diğerleri [3] tarafından yapılan 3-Boyutlu doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, orjinal ve çapraz bağlantı seçenekleri için 2-Boyutlu doğrusal analizin hasar seviyeleri açısından 3-Boyutlu doğrusal olmayan analize göre üst sınır olarak davrandığı, fakat yapının rijitliğinin arttığı tüm ve kısmi perde alternatifleri için 2-Boyutlu doğrusal analizin alt sınır olarak davrandığı görülmüştür. Fayda-Maliyet analizi sonuçları karşılaştırıldığında ise, kısmi perde güçlendirmesinin her iki model için de ekonomik olarak en uygun alternatif olduğu, fakat 2-Boyutlu modelde güçlendirmelerin daha önce ekonomik fayda sağlamaya başladığı ve fayda değerlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla çabuk sonuçlar almak için 2-Boyutlu bir analiz belki yeterli gözükülebilir, ancak böyle bir çalışma incelenen yapının özelliklerine bağlı olarak yanıltıcı olma riski taşımaktadır.
4. Bu çalışmada incelenen yöntem, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde uygulanabilecek güçlendirme stratejileri için temel oluşturmaktadır; ancak uygulanan Fayda-Maliyet analizini daha detaylandırmak ve daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için çeşitli çalışmalar yapılması gerekli gözükmektedir. Bu çalışmaların; deprem riskinin detaylandırılması, kullanılan inşa tekniklerinin ve alışkanlıklarının analizlere dahil edilmesi, ölü ve yaralı sayılarının ve yaralanma derecelerinin istatistiki olarak daha detaylı tanımlanması, sarmalama ve mantolama gibi kolay uygulanabilir güçlendirme önerilerinin geçerli matematiksel modellerinin kurulması gibi konularda yoğunlaşması beklenebilir.
5. Çalışma sırasında, konut tipi yapılara ek olarak sadece hastahaneler ve okullar incelenmiş ve Fayda-Maliyet analizinde aynı yapısal model kullanılarak, sadece hasar hesabı ve tamir maliyetine gerekli eklemeler yapılmıştır. Daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için bina türlerinin yapısal özelliklerini yansıtan hasargörebilirlik eğrileri oluşturulmalı ve bu çalışmada kullanılan metodoloji geliştirilerek olası bir deprem sonucunda konut, okul ve hastahanelerin yanında endüstriyel yapılarda, yol, kanalizasyon, köprü, elektrik-su hatları gibi alt ve üst yapı sistemlerinde oluşabilecek hasarlar ve her yapı tipine uygun güçlendirme seçenekleri analizlere dahil edilmelidir.
6. Güçlendirme aktiviteleri ve sigorta uygulamaları arasında oluşturulacak bir bağlantı şehir planlaması açısından Türkiye’de geliştirilecek afet yönetimi için bir

taban oluşturabilir; öyle ki var olan bina stoğunun güçlendirilmesi sigorta maliyetini düşürecek, depreme karşı yapılan sigortalar ise devlet ve depremden etkilenen insanlar üzerindeki mali yükü hafifletecektir.

Kaynaklar

- [1] FEMA-287, HAZUS: The FEMA Tool for Estimating Earthquake Losses, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1996.
- [2] FEMA 74, "Reducing the Risk of Non-structural Earthquake Damage: A Practical Guide" FEMA- 1994b, 1994.
- [3] Smyth, W.A., Altay, G., Deodatis, G., Erdik, M., Franco, G., Gülkan, P., Kunreuther, H., Luş, H., Mete, E., Seeber, N., Yüzüğüllü, O., Probabilistic Benefit-Cost Analysis for Earthquake Damage Mitigation: Evaluating Measures for Apartment Houses in Turkey, submitted to EERI Earthquake Spectra, 2002.
- [4] Turkish Earthquake Design code, Specification for Structures to be Built in Disaster Areas, Ministry and public Works and Settlement, Government of Republic of Turkey, 1998.
- [5] Deodatis, G., "Non-Stationary Stochastic Vector Processes: Seismic Ground motion Applications," Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 11, No. 3, 149-167, 1996.
- [6] Saxena, V., Spatial Variation of Earthquake Ground Motion and Development of Bridge Fragility Curves, Degree of Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University, 2000.
- [7] Mark Peterson, written communication, June 2002. Courtesy of A. Smyth.
- [8] Atakan, K., Ojeda, A., Meghraoui, M., Barka, A.A., Erdik, M., Bodare, A., Seismic Hazard in Istanbul following the 17 August 1999 Izmit and 12 November 1999 Duzce earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 92, 466-482, 2002.
- [9] Erdik, M., Aydinoglu, N., Earthquake Performance and Vulnerability of Buildings in Turkey, The World Bank Group, Disaster Management Facility, 2002.
- [10] Rossetto, T., Elnashai, T.A., Derivation of Vulnerability Functions for RC Buildings based on Observational Data, European Commission, 2001.
- [11] Mander, B.J., Fragility curve development for assessing the seismic vulnerability of highways, University at Buffalo, State University of New York, 1999.
- [12] Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H., Uzawa, T., and Ueda, T., Statistical Analysis of Fragility Curves, MCEER Report under FHWA contracts DTFH61-92-C00112 (Task 106-E-7.3.5). 2000.
- [13] FEMA, HAZUS99 Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1999.
- [14] Ferritto, J., M., Economic analysis procedure for earthquake hazard mitigation, Naval Facilities Engineering Service Center, 1997.
- [15] Ambraseys, N.N, and Jackson, J.A. (1981). Earthquake hazard and vulnerability in the northeastern Mediterranean: the Corinth earthquake sequence of February-March 1981. *Disasters*, Vol. 5, No. 4, 355-368, 1981.
- [16] Ohta, Y. (Editor), A Comprehensive Study on Earthquake Disaster in Turkey, Hokkaido University, Japan, 1983.
- [17] Coburn, A., and Spence, R., Earthquake Protection; John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 355, 1992.