

## Hasarlı betonarme elemanların çelik köşebent ve lamalar ile güçlendirilmesi

Alper İLKI\*, Cem DEMİR, Aziz KARADENİZ, Nahit KUMBASAR

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

### Özet

*Bu çalışmada daha önce sabit eksenel yük ile yön değiştiren tekrarlı eğilme etkileri altında denenmiş betonarme numuneler epoksi enjeksiyonu ve tamir harcı ile onarıldıktan sonra boyuna doğrultuda çelik korniyer ve lamalar ile, enine doğrultuda ise çelik lamalar ile güçlendirilmiştir. Onarılmış ve güçlendirilmiş numuneler aynı yükleme şartlarında tekrar denenmiş, uygulanan onarım ve güçlendirme tekniğinin numune davranışına katkısı dayanım, süneklik, eğilme rijitliği ve enerji yutma kapasitesi açılarından değerlendirilmiştir. Güçlendirilmiş betonarme kesitler için analitik moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiş ve bunların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel ve analitik çalışmaların sonucunda, incelenen bu ekonomik onarım ve güçlendirme tekniğinin hasarlı betonarme kesitlerin performanslarını önemli ölçüde geliştirdiği görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme, dayanım, enerji, güçlendirme, onarım, süneklik.

## Retrofit of damaged reinforced concrete members by using steel corners and plates

### Abstract

*There are large numbers of damaged buildings that need repair/strengthening in Turkey. Consequently, experimental and analytical work on the behaviour of damaged reinforced concrete members, which are repaired/strengthened by different techniques, is vitally important. In this study, specimens tested before under the combined effects of axial and reversed cyclic flexural loads, are repaired and strengthened by steel corners and plates. The repaired and strengthened specimens are then tested in the same conditions as original specimens and the contribution of the repair and strengthening technique on strength, ductility, stiffness and energy dissipation are investigated. Then analytical moment-curvature relationships are obtained by using fiber element approach and it is seen that the analytical results are in good agreement with the experimental data. In the analytical study, confinement effect for concrete, strain hardening and Bauschinger effects for reinforcing steel can be taken into account. At the end of experimental and analytical studies, it is seen that the investigated economical repair and strengthening technique is highly effective on improving the behaviour of reinforced concrete sections, which were damaged previously.*

**Keywords:** Ductility, energy, reinforced concrete, repair, retrofit, strength.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Alper İlki. ailki@srv.ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 38 38.

Makale metni 05.02.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 16.07.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Ülkemizde depremler sonucu hasar görmüş ve onarılması/güçlendirilmesi gereken çok sayıda betonarme yapı bulunmaktadır. Önemli şehirlerin büyük bölümünün deprem açısından riskli bölgelerde bulunduğu ve mevcut yapı stoğunun kalitesi gözönüne alındığında, mevcut hasarlı ve hasarsız yapıların onarım ve güçlendirilmesi konularının Türkiye için son derece büyük önem taşıdığı açıktır. Bu nedenle, farklı durumlar için uygun olabilecek, mümkün olabildiğince ekonomik, farklı onarım ve güçlendirme tekniklerini incelemek üzere gerçekleştirilecek deneysel ve kuramsal çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Farklı güçlendirme tekniklerinin yapı ve/veya eleman davranışına etkisi çok sayıda farklı araştırmacı tarafından incelenmiştir. UNDP/UNIDO (1983) projesi kapsamında mevcut yapıların onarım ve güçlendirilmesi konusunda oldukça detaylı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Badoux (1998); Fukuyama ve Sugano (2000), son yıllarda yaşanan gelişmeleri de dikkate alarak uygulanan güçlendirme yöntemleri konusunda birer derleme yapmışlardır. Tankut (1998) çalışmasında, hem genel olarak betonarme yapılarda uygulanan onarım ve güçlendirme yöntemlerini özetlemiş, hem de Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde bu konuda yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgi vermiştir. Fukuta ve diğerleri (1998), 1995 Kobe depremi sonrası yapılarda uygulanmış olan onarım ve güçlendirme yöntemlerini özetlemişlerdir. Gavrilovic ve diğerleri (1998) Üsküp'te mevcut mahkeme binasında bazı kolonların çelik elemanlar kullanılarak güçlendirildiği proje hakkında bilgi vermişlerdir. Can (1997), çelik korniyer ve lamalar ile güçlendirilmiş ve onarılmış kolonların salt aksenal yükler altında davranışını incelemiştir. Aboutaha ve diğerleri (1996), farklı detaylarda çelik plakalar ile mantolanmış betonarme kolonların salt yatay yükler altında davranışını deneysel olarak incelemiştir. Harries ve diğerleri (1996), çelik plakalar ile güçlendirilmiş betonarme bağ kirişlerinin davranışlarını araştırmışlardır.

Bu çalışmada, daha önce İlki (2000) tarafından, sabit aksenal yük ile birlikte yön değiştiren tekrarlı eğilme etkileri altında deneysel tabi

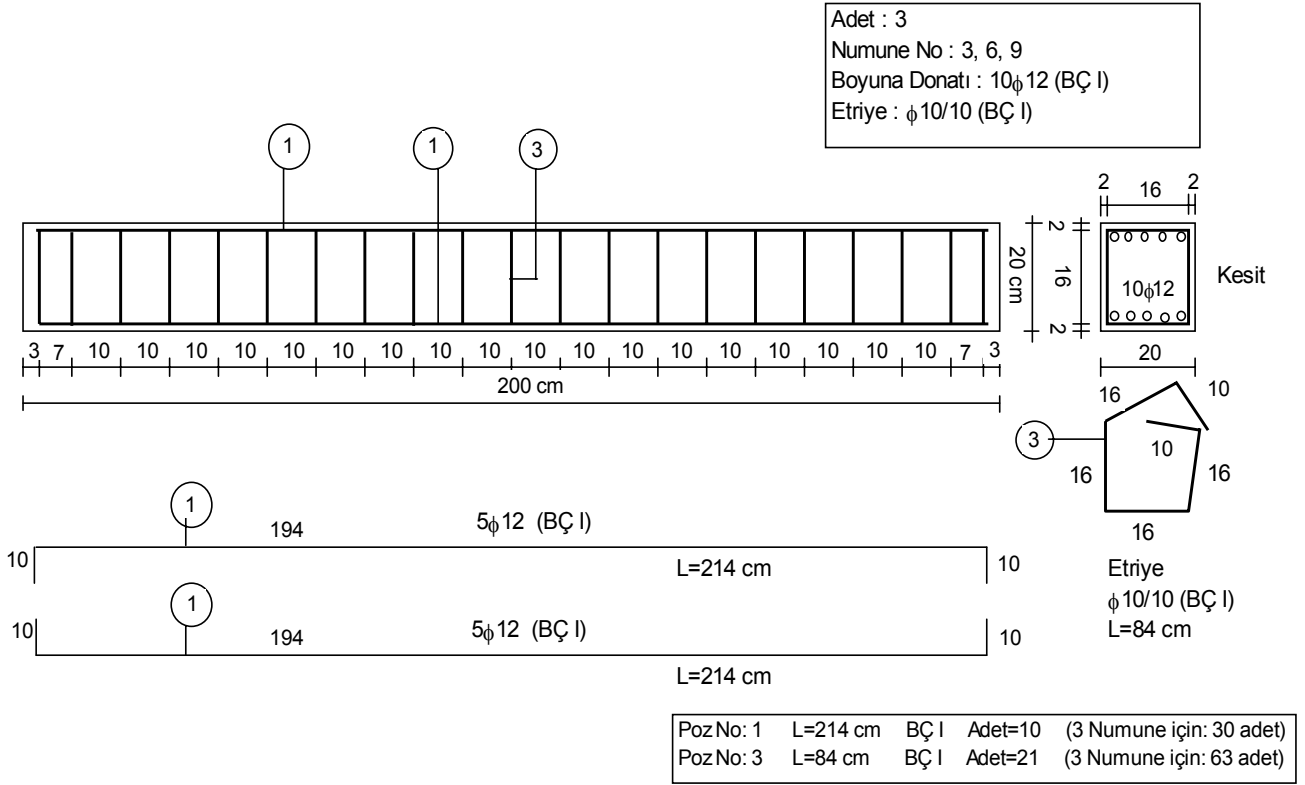
tutulmuş olan 200 mm × 200 mm × 2000 mm boyutlarında 28 numuneden biri sadece onarılmış, 6 adedi ise onarıldıktan sonra çelik korniyer ve lamalar kullanılarak güçlendirilmiştir. Onarılan ve güçlendirilen toplam 7 numune tekrar benzer yükleme şartlarında deneysel tabi tutulmuştur. Deneysel olarak gözlemlenen davranış, orijinal numunelerin davranışı ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada dayanım, süneklik, enerji yutma kapasitesi ve rijitlik gibi özellikler ön planda tutulmuştur. Numunelerin onarım ve güçlendirilmesi ile ilgili detaylar ve deneysel çalışmanın ayrıntıları da aşağıda verilmiştir. Ulaşılan deneysel veriler uygulanan güçlendirme tekniğinin başarılı olduğunu, beklenmeyen herhangi bir erken veya ani dayanım kaybı ile karşılaşmadığını göstermiştir.

Bu çalışmada ana amaç aksenal yük ve yön değiştiren tekrarlı eğilme etkilerine maruz simetrik donatılı orijinal ve onarılmış/güçlendirilmiş hasarlı betonarme kesitlerin davranışlarının deneysel ve analitik olarak incelenmesidir. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen sonuçların pratikteki kolon onarım/güçlendirme çalışmalarına doğrudan uygulanması uygun değildir. Bu çalışmada, hasarlı olan yapı elemanlarının orijinal durumlarındaki özelliklerine ulaşacak şekilde işlem görmesi için onarım, orijinal davranış özelliklerinin üzerinde performans gösterecek şekilde işlem görmeleri durumu için ise onarım ve güçlendirme ifadeleri kullanılmıştır.

## Deneysel çalışma

Bu çalışmada onarılan/güçlendirilen numuneler daha önce orijinal durumları ile deneysel tabi tutulmuş ve önemli oranda hasar verilmiştir. Yaklaşık 4~5 yerdeğiştirme süneklik düzeyine kadar yüklenen numuneler ile ilgili detaylı bilgi İlki (2000) tarafından yapılan çalışmada verilmiştir. Tümü simetrik donatılı ve 200 mm × 200 mm × 2000 mm boyutlarında olan orijinal numunelerin genel görünüşleri Şekil 1'de, genel özellikleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1'de  $f_{ck}$  28 günlük ortalama silindirik beton basınç dayanımını,  $A_s$  ve  $\rho$  toplam boyuna donatı enkesit alanı ve geometrik oranını,  $v$  ise etkiyen aksenal kuvvetin, numunenin aksenal



Şekil 1. Orijinal numunelere ait tipik bir donatı detayı

yük taşıma kapasitesine oranını ( $N / (b h f_{ck})$ ) göstermektedir. Numuneler, boyuna donatıları, denedikleri gündeki ortalama silindirik beton basınç dayanımları ve etkilenen aksel yükün seviyesi esas alınarak isimlendirilmiştir. Örneğin 6R12-C25.3-N5, boyuna donatı olarak 6 adet 12 mm çapında düz yüzeyli donatıya sahip olan, denendiği güne ait ortalama silindirik beton basınç dayanımı 25.3 MPa olan ve deney sırasında etkilenen aksel yükün, numunenin aksel yük taşıma kapasitesine oranı %5 olan numunedir.

Tablo 1. Orijinal numunelerin özellikleri

No	Numune	$f_{ck}$ (MPa)	Donatı	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$\rho$	$\nu$
1	4R12-C25.3-N5	21.9	4φ12	452	0.0113	0.05
2	6R12-C25.3-N5	21.9	6φ12	679	0.0170	0.05
3	10R12-C25.3-N5	21.9	10φ12	1131	0.0283	0.05
4	4R12-C20.2-N10	17.1	4φ12	452	0.0113	0.10
5	6R12-C20.6-N10	17.1	6φ12	679	0.0170	0.10
7	4R12-C21.3-N20	17.1	4φ12	452	0.0113	0.20
8	6R12-C21.6-N20	17.1	6φ12	679	0.0170	0.20

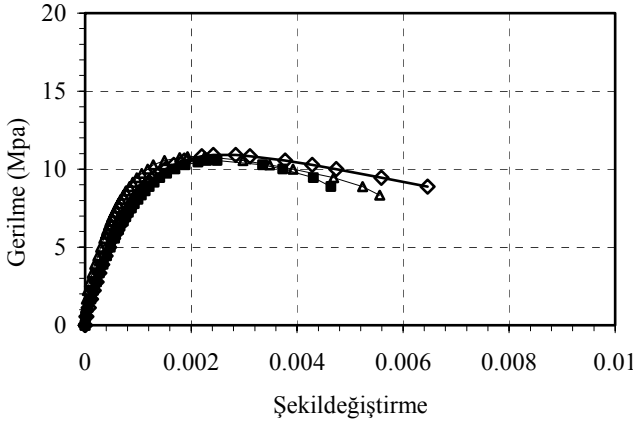
Tüm numunelerde boyuna doğrultuda 12 mm çaplı düz yüzeyli donatı (BÇ I), enine doğrultuda 100 mm aralıklar ile 10 mm çaplı düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda, bu donatılar için elde edilen mekanik özellikler Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de  $f_{yk}$  ve  $f_{su}$  donatı akma ve maksimum dayanımlarını,  $\epsilon_{su}$  ise kopma uzamasını göstermektedir.

Tablo 2. Orijinal numunelerde donatı mekanik özellikleri

Donatı	Çap (mm)	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$f_{su} / f_{yk}$	$\epsilon_{su}$
φ10	9.9	478	712	1.49	0.203
φ12	12.6	365	543	1.49	0.261

Orijinal numuneler 4~5 yerdeğiştirme süneklik düzeylerine kadar yükleme çevrimlerine maruz kalmış olduğu için, bir hayli hasar görmüş ve 30~40 mm civarında kalıcı yerdeğiştirmeler oluşmuştur. Bu nedenle onarım öncesi, tüm numunelere ters yük uygulanmış, kalıcı yerdeğiştirmelerin giderilmesine ve numunelerin

orijinal şekillerine getirilmesine çalışılmıştır. Onarım çalışmasının ilk aşamasında çatlaklara epoksi enjeksiyonu yapılmıştır. Daha sonra hasarlı beton örtüsü kaldırılmış ve tamir harcı ile numuneler orijinal formlarına getirilmiştir. Epoksi reçenesi ve sertleştirici bileşenlerinden oluşan epoksi sisteminin basınç ve çekme dayanımları sırası ile 80 ve 60 MPa, elastisite modülü 3200 MPa'dır. Tamir harcı çimento, kum, su ve aderans arttırıcı katkıdan oluşturulmuştur. Çimento PÇ32.5 cinsi olup, kum Adapazarı yöresindedir. Yapılan malzeme deneyleri sonucunda tamir harcının dayanımının hayli düşük olduğu görülmüştür. Tamir harcı için 90 günlük numunelerin basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 2'de sunulmuştur, bu numunelere ait ortalama basınç dayanımı 10.8 MPa'dır.



Şekil 2. Tamir harcı gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Tablo 1'de verilen numunelerden Numune 1'e (4R12-C25.3-N5) sadece yukarıdaki paragrafta anlatılan onarım uygulanmış, herhangi bir güçlendirme yapılmamıştır. Diğer numuneler ise çelik korniyer ve lamalar kullanılarak güçlendirilmiştir. Uygulanan güçlendirme yöntemi ile ilgili detaylar aşağıda verilmiştir. Onarılan numuneler R harfi ile onarılan ve güçlendirilen numuneler ise R-S harfleri ile gösterilmiştir. Örneğin 1-R, Numune 1'in onarılması ile elde edilen numune, 2-R-S ise Numune 2'nin onarılması ve güçlendirilmesi ile elde edilen numunedir.

Güçlendirme amacı ile kullanılan çelik köşebent ve lamalardan papyon şeklinde kupon numuneler

oluşturulmuş, bu numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur. Bu güçlendirme elemanları için belirlenmiş mekanik özelliklerin ortalama değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Güçlendirmede kullanılan çelik elemanların mekanik özellikleri

Donatı	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$f_{su} / f_{yk}$	$\epsilon_{su}$
L50.50.5	310	482	1.56	.251
L60.60.6	329	480	1.46	.261
Lama 30.3	262	368	1.4	.348

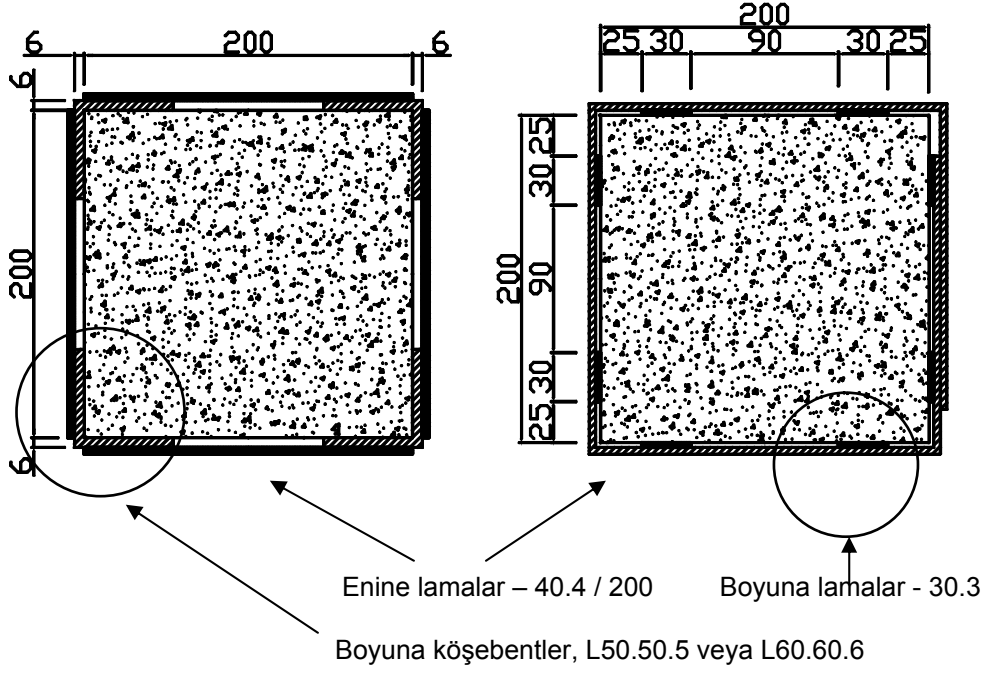
Güçlendirme sırasında boyuna doğrultuda kullanılan köşebent ve lamalara enine doğrultuda kaynaklanmış olan lamaların oluşturabileceği olumsuz etkinin de belirlenebilmesi için benzer kaynaklama işlemi kupon numuneler üzerinde de gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler 200 kN kapasiteli Amsler yükleme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Numunelere uygulanan güçlendirmenin detayları Şekil 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. Güçlendirme için öncelikle çelik elemanların yüzeyleri pas, kir ve tozdan arındırılmıştır. Daha sonra onarımı tamamlanmış olan numuneler üzerine boyuna doğrultuda epoksi harcı kullanılarak çelik elemanlar yapıştırılmıştır. Boyuna donatıların numune üzerine tam olarak yapışması sağlandıktan sonra, enine doğrultuda 40.4 boyutlarında lamalar 200 mm aralıklar ile boyuna donatılara kaynaklanmış, enine lamalar ile beton yüzeyi arasındaki boşluklar epoksi harcı ile doldurulmuştur. Güçlendirme uygulamasını gösteren bir fotoğraf Şekil 4'te sunulmuştur.

Onarılmış ve güçlendirilmiş numuneler, orijinal numuneler ile aynı yükleme düzeneği ve benzer ölçüm sistemi kullanılarak denenmiştir.

Numuneler, deprem yüklerini yaklaşık olarak temsil etmek üzere, sabit aksenal kuvvet ile yön değiştiren tekrarlı eğilme momenti etkileri altında deneye tabi tutulmuştur. Yükleme düzeneği Şekil 5'te şematik olarak sunulmuştur.

Şekil 5'te de görüldüğü gibi aksenal yük 600 kN kapasiteli Enerpac krika ile uygulanmış, eğilme



Şekil 3. Güçlendirilen kesitlerin şematik görünümü

momenti ise 250 kN kapasiteli MTS yükleme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. MTS yükleme sistemi kullanılarak yapılan yükleme yerdeğiştirme kontrollü olup, bilgisayar aracılığı ile uygulanmıştır. Deneysel veriler yükölçer, yerdeğiştirme ölçer, ve şekildeğiştirmeölçer kullanılarak elektronik yolla toplanmıştır. Deneyler sırasında onarılmış ve güçlendirilmiş numuneler, orijinal numuneler ile aynı yükleme patronuna maruz bırakılmıştır. Orijinal numunelere elastik bölgede itme ve çekme yönlerinde simetrik olmak üzere dört farklı seviyede yerdeğiştirme uygulanmıştır. Daha sonra itme yönünde, çekme gerilmesine maruz boyuna donatılarda akma şekildeğiştirme oranına kadar yerdeğiştirme artırılmıştır.

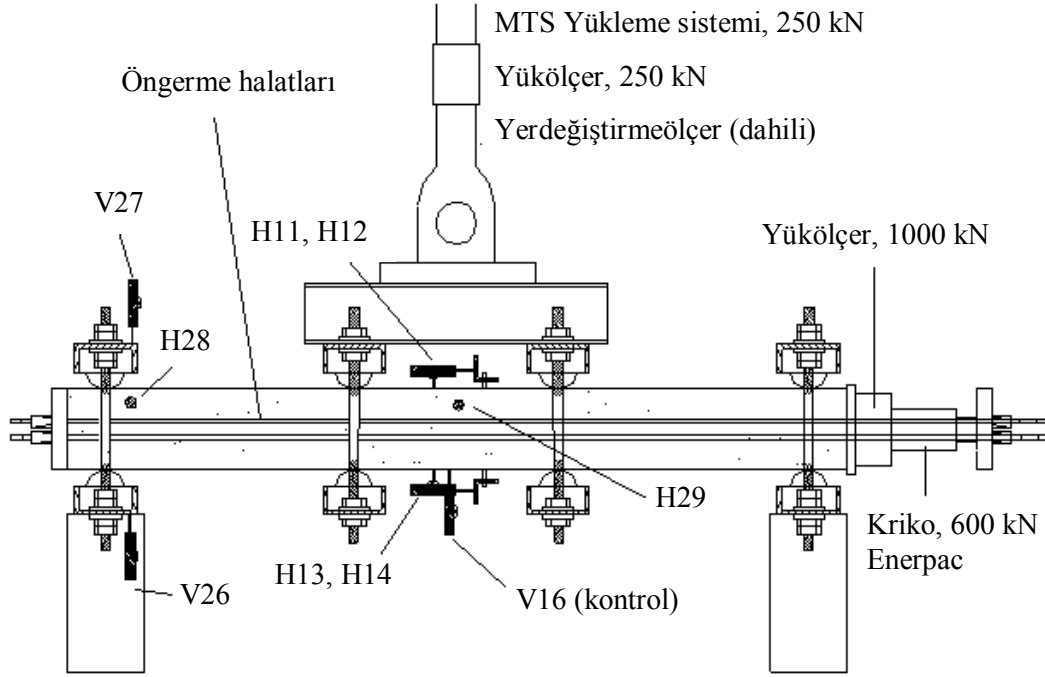
Donatılarda akmaya neden olan yerdeğiştirme seviyesi (akma yerdeğiştirme,  $\delta_y$ ) belirlendikten sonra bu yerdeğiştirme çeşitli oranlarda artırılması ile belirlenen yerdeğiştirme seviyelerinde itme ve çekme yönlerinde simetrik olmak üzere yükleme çevrimleri yapılmıştır. Genel yükleme patronu şematik olarak Şekil 6'da sunulmuştur. Bu çalışmada yerdeğiştirme süneklik oranı,  $\mu_d$ , herhangi bir yükleme çevriminde ulaşılan en büyük yerdeğiştirme,  $\delta_{max}$ , akma yerdeğiştirme oranı olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4. Onarılmış/güçlendirilmiş numunelerin özellikleri

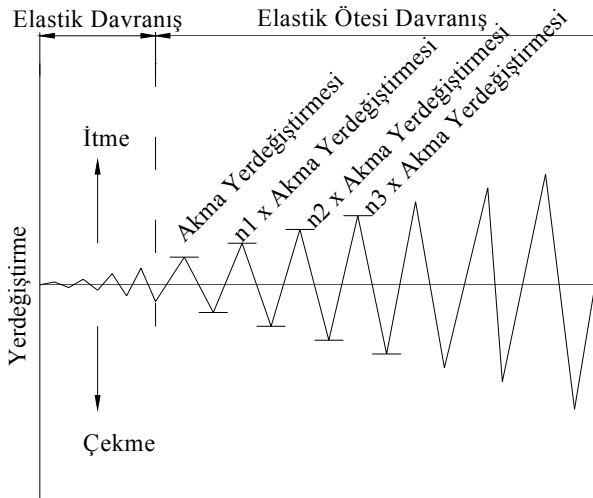
No	Boyuna güçlendirme	Enine güçlendirme
1-R	Sadece onarım	Sadece onarım
2-R-S	8 Lama 2000.30.3	Lama 1030.40.4 / 200 (sürekli)
3-R-S	4 L50.50.5	4 Lama 185.40.4 / 200
4-R-S	8 Lama 2000.30.3	Lama 1030.40.4 / 200 (sürekli)
5-R-S	4 L50.50.5	4 Lama 185.40.4 / 200
7-R-S	4 L50.50.5	4 Lama 185.40.4 / 200
8-R-S	4 L60.60.6	4 Lama 185.40.4 / 200



Şekil 4. Güçlendirme uygulaması



Şekil 5. Yükleme ve ölçüm sistemleri



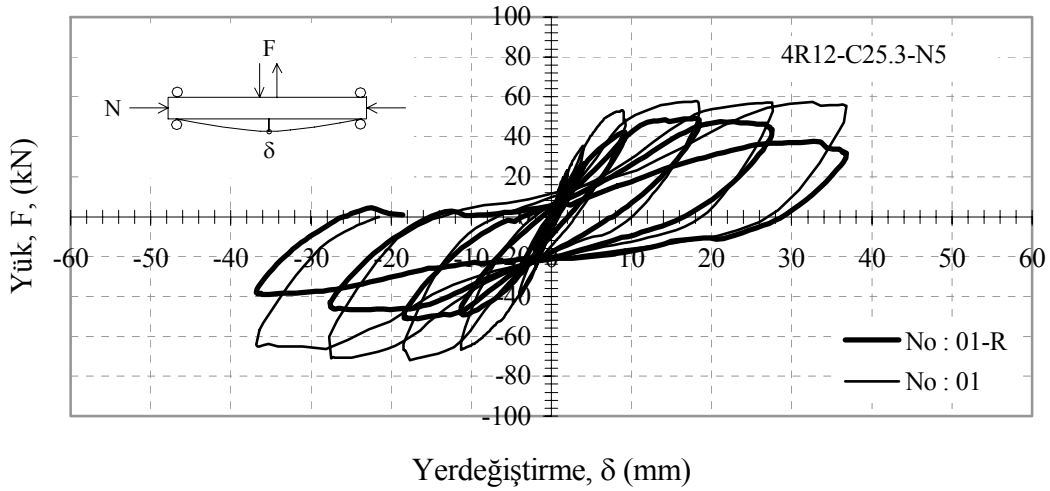
Şekil 6. Yükleme patronu

## Deney sonuçları

Deney sonuçları yük-yerdeğiştirme, moment-eğrilik ilişkileri ve enerji yutma özellikleri ile verilmiştir. Yük-yerdeğiştirme ilişkilerinde yük, yön değiştiren eğilme momentlerini etkilemek amacıyla MTS yükleme sistemi tarafından uygulanan yük, yerdeğiştirme ise numunenin orta noktasında V16 yerdeğiştirmeölçeri ile belirlenen yerdeğiştirme (Şekil 5). Numunelerin orta kesitleri için oluşturulan moment-eğrilik

ilişkilerinde eğrilik, numunenin orta bölgesinde 200 mm uzunluklu bölgede yapılan yerdeğiştirme ölçümleri ile belirlenmiştir.

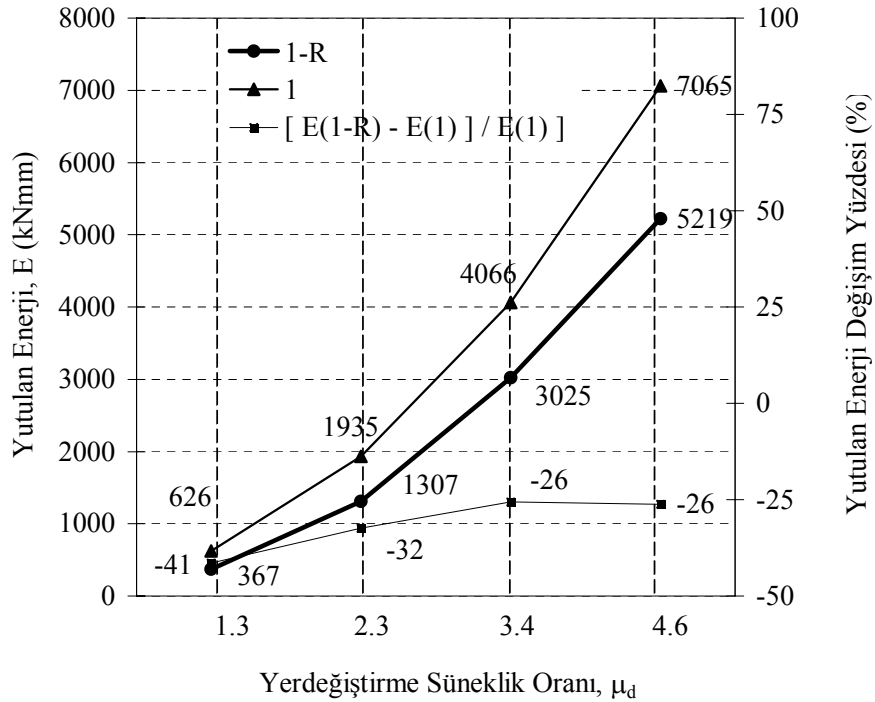
Bu çalışmada numuneler için uygulanmış olan onarımın amacı, numunenin orijinal dayanım ve davranış özelliklerinin geri kazandırılmasıdır. Numune 1-R, diğer numunelerden farklı olarak, sadece onarım görmüş, herhangi bir güçlendirme uygulaması söz konusu olmamıştır. Bunun amacı onarılan ve güçlendirilen numunelerde, davranışta sağlanan iyileşmede onarım ve güçlendirmenin etkilerinin daha açık belirlenmesidir. Numune 1 (orijinal) ve 1-R (onarılmış) için deneysel olarak elde edilmiş olan yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 7'de, onarılmış ve orijinal numunelerin enerji yutma özellikleri Şekil 8'de sunulmuştur. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde, yapılan onarımın başarılı olmadığı gözlenmiştir. Onarılan numunede dayanım, enerji yutma özellikleri ve elastik davranış özellikleri orijinal numuneden oldukça kötüdür. Hem itme, hem çekme yönlerinde,  $\mu_d = 4.6$  yerdeğiştirme süneklik düzeyinde onarılmış numunenin dayanımı, orijinal numunenin dayanımının sadece %57'si kadardır. Elastik ötesi davranış bölgesinde onarılmış numune tarafından yutulan enerji, orijinal



Şekil 7. Onarılmış numune için (I-R) davranışın orijinal numune ile karşılaştırması

numune tarafından aynı yerdeğiştirme düzeylerinde yutulan enerji miktarından yaklaşık %30 daha azdır. Elastik bölgede ise onarılmış numunenin rijitliği orijinal numunenin rijitliğinin bir hayli altındadır. Bu olumsuzlukların en önemli nedeni hasarlı numunenin onarımı sırasında kullanılan tamir harcının dayanımının istenenin bir hayli altında olmasıdır (Şekil 2). Yapılan epoksi enjeksiyonu ile ilgili herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.

Epoksi enjeksiyonu ve tamir harcı ile onarılan numunelerin, boyuna doğrultuda çelik köşebent veya lamalar, enine doğrultuda ise lamalar kullanılarak güçlendirilmesi, onarılan ve güçlendirilen elemanların davranışlarını önemli oranda iyileştirmiştir. Bu iyileşme numunelerin eğilme, kesme ve enerji yutma kapasiteleri ile rijitliklerinde önemli artış, betonda ezilmenin ve bunun sonucunda oluşan dayanım kaybınının büyük ölçüde geciktirilmesi olarak açıklanabilir.



Şekil 8. Numune 1 ve I-R tarafından yutulan enerjilerin karşılaştırılması

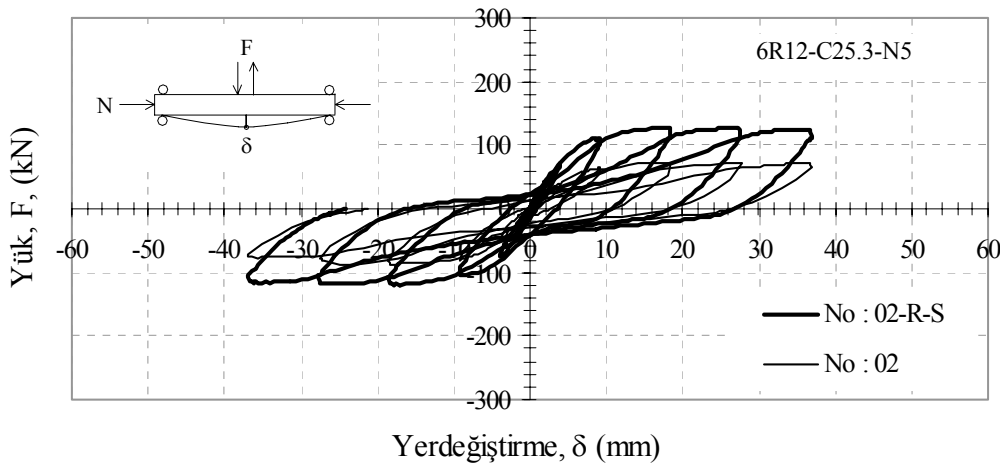
Numune 2-R-S, 4-R-S, 5-R-S ve 7-R-S için elde edilmiş olan yük-yerdeğiştirme ilişkileri orijinal numuneler ile karşılaştırmalı olarak Şekil 9-12'de, enerji yutma özellikleri ise Şekil 13'te sunulmuştur.

Uygulanan güçlendirme tekniği, gerek eğilme, gerekse kesme dayanımlarını önemli oranda arttırmakla birlikte, özellikle boyuna doğrultuda köşebentler kullanılarak güçlendirilen numunelerde, daha büyük dayanım artışı, eğilme için elde edilmiştir. Orijinal numunelerde hasar oluşumu eğilme çatlakları ile başlarken, bu numunelerde önce kayma çatlakları gözlenmiştir. Özellikle göreceli olarak yüksek eksenel kuvvete maruz olan orijinal numunelerde gözlenen dayanım kaybı, onarılmış ve güçlendirilmiş numunelerde görülmemiş, ya da çok daha az belirgin olarak ve çok daha ileri yerdeğiştirme düzeylerinde görülmüştür. Deneyler tüm onarılmış ve güçlendirilmiş numuneler için, deney düzeneğinin izin verdiği yerdeğiştirme düzeyine kadar sürdürülmüş ancak numunelerde önemli dayanım kaybı oluşması sağlanamamıştır. İstisna olarak, Numune 3-R-S'nin dayanımı, yükleme sisteminin kapasitesini aştığı için, bu numunenin deneyi erken sonlandırılmıştır (Şekil 14). 7-R-S ve 8-R-S numunelerinde, yüklemenin son anlarında enine güçlendirme lamalarında oluşan büyük kayma şekildeğiştirmeleri sonucu, yırtılmalar oluşmuş, Numune 7-R-S'de bu yırtılmaların ilerlemesi ile kopmalar ortaya çıkmış, ancak bunlar önemli dayanım kaybına neden olmamıştır. Bu kopmalar lamaların boyuna köşebentlere bağlandığı

noktalardan oluşmakla birlikte, kaynaklar hasar görmemiştir (Şekil 15a). Boyuna doğrultuda güçlendirme elemanı olarak köşebentlerin kullanıldığı numunelerde, köşebentlerde önemli bir hasar gözlenmemiş, köşebentler deneylerin sonuna kadar betondan ayrılmayarak, betonla birlikte çalışmıştır.

Boyuna doğrultuda lama kullanılan numunelerde ise, ileri yerdeğiştirme düzeylerinde, basınç bölgesinde numunenin orta kesitlerinde lamalar beton yüzeyden ayrılmış ve burkulmuştur (Şekil 15b). Ancak bu burkulmaya rağmen yükleme yönü değiştiğinde, daha önce burkulmuş olan lamalar çekmeye çalışmış ve numunelerin dayanımında önemli bir kayıp gözlenmemiştir. Boyuna doğrultuda lamalar ile güçlendirilen numunelerde, eğilme çatlakları, kayma çatlaklarına göre daha belirgindir.

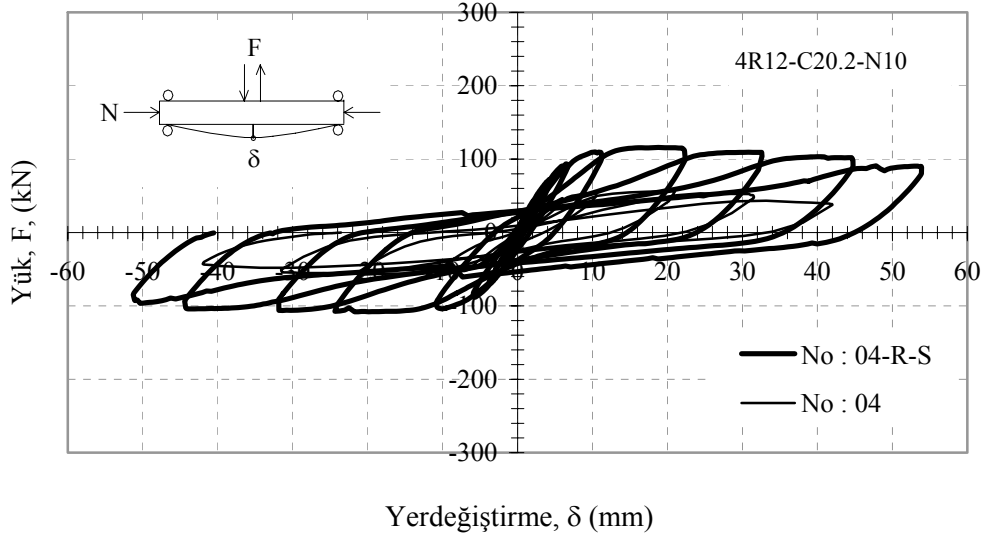
Onarılan ve güçlendirilen numunelerin başlangıç rijitlikleri önemli oranda artmıştır. Bu artış, elastik bölgede sözkonusu olabilecek yerdeğiştirmelerin kısıtlanması açısından son derece olumludur. Ancak yapıya etkimesi olası deprem yükleri hesaplanırken, elemanlarda oluşan bu rijitlik artışı kesinlikle gözönüne alınmalıdır. Numuneler için elde edilmiş olan deneysel yük-yerdeğiştirme ilişkilerinden yararlanarak belirlenen rijitlikler Tablo 5'te verilmiştir. Bu rijitlikler belirlenirken, yük-yerdeğiştirme ilişkisinin yükselen kolu üzerinde, numunelerin dayanımlarının %5'i ile %45'ine karşı gelen noktalar arasındaki doğrunun eğimi esas alınmıştır.



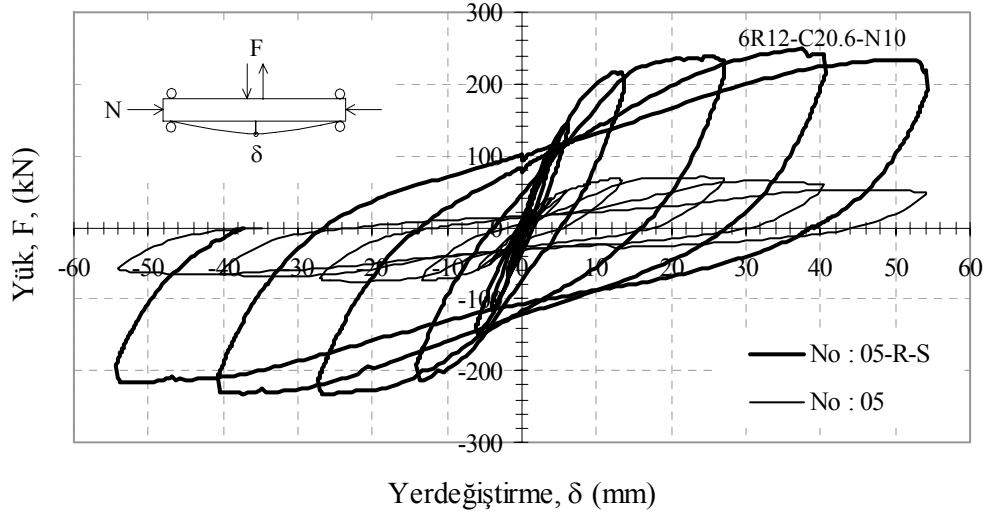
Şekil 9. 2-R-S numunesi için davranışın orijinal numune ile karşılaştırması



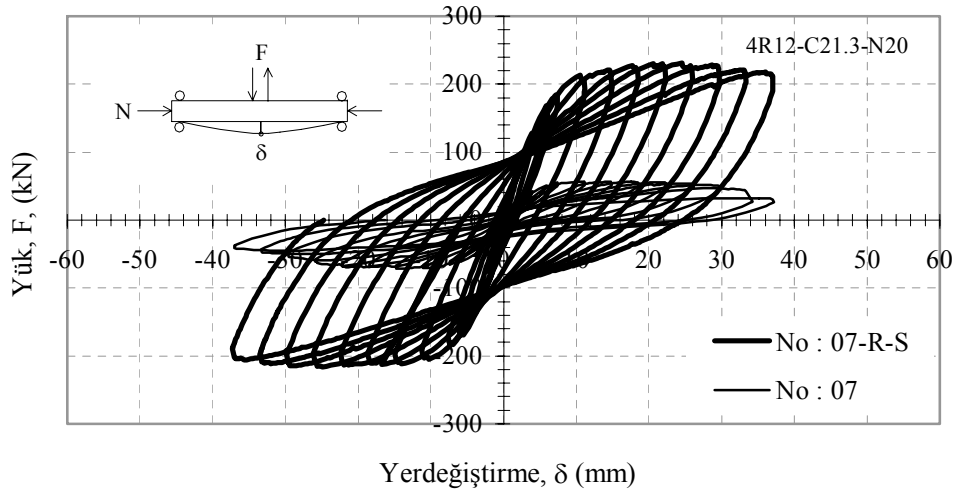
Hasarlı betonarme elemanların güçlendirilmesi



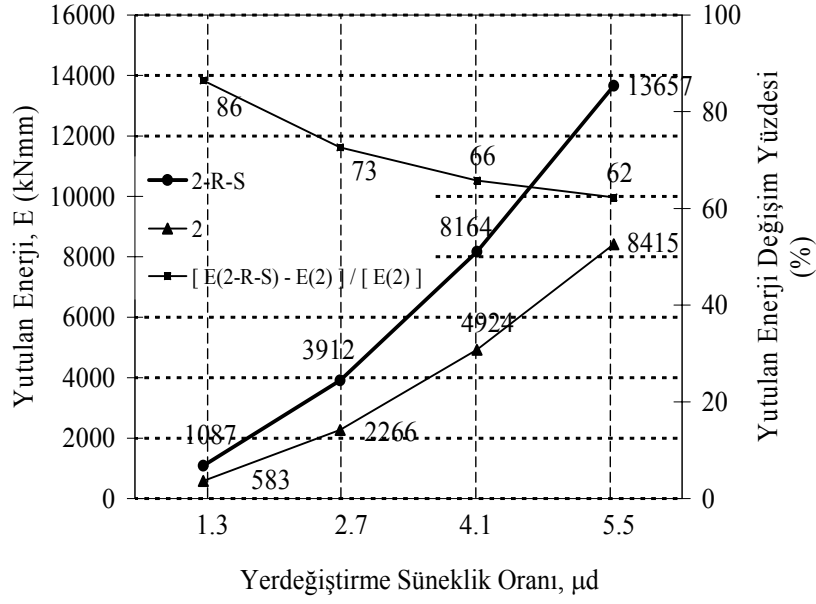
Şekil 10. 4-R-S numunesi için davranışın orijinal numune ile karşılaştırması



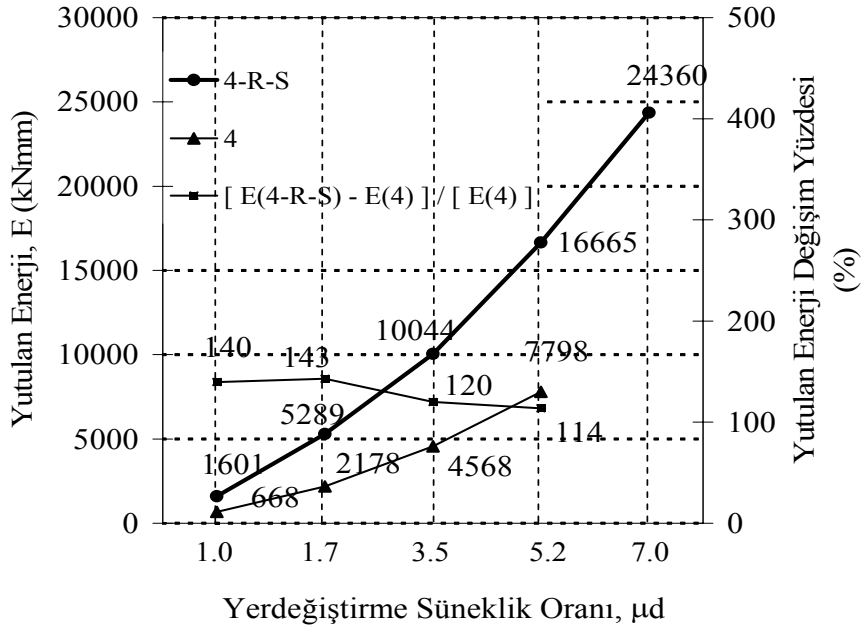
Şekil 11. 5-R-S numunesi için davranışın orijinal numune ile karşılaştırması



Şekil 12. 7-R-S numunesi için davranışın orijinal numune ile karşılaştırması



(a)



(b)

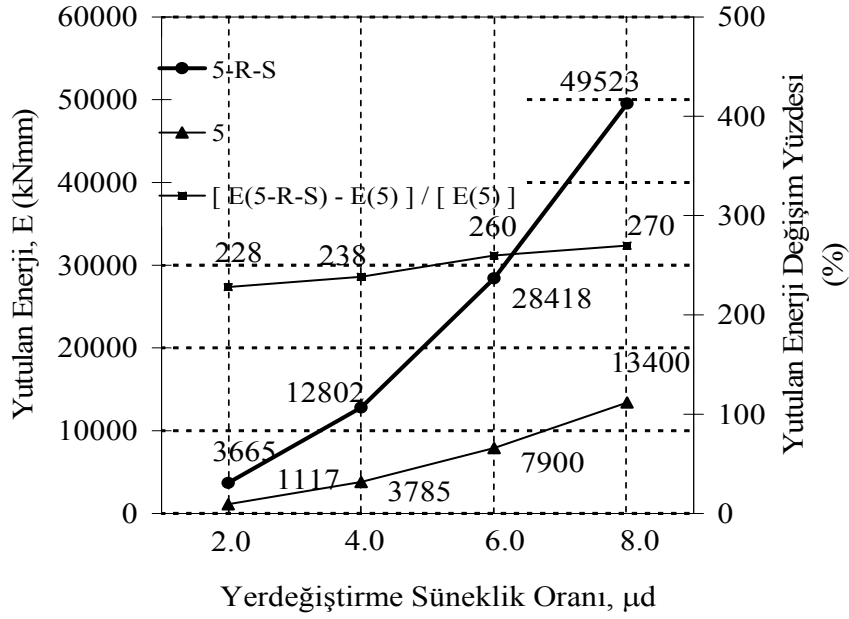
Şekil 13a-b. Orijinal ve güçlendirilmiş numuneler tarafından yutulan enerjilerin karşılaştırılması

Tablo 5'ten de görülebileceği gibi, sadece onarılan Numune 1-R'de rijitlik orijinal numunenin rijitlik değerine ulaşamazken, onarılan ve güçlendirilen numunelerde, orijinal numunelere göre, %150'lere varan rijitlik artışları gözlenmiştir.

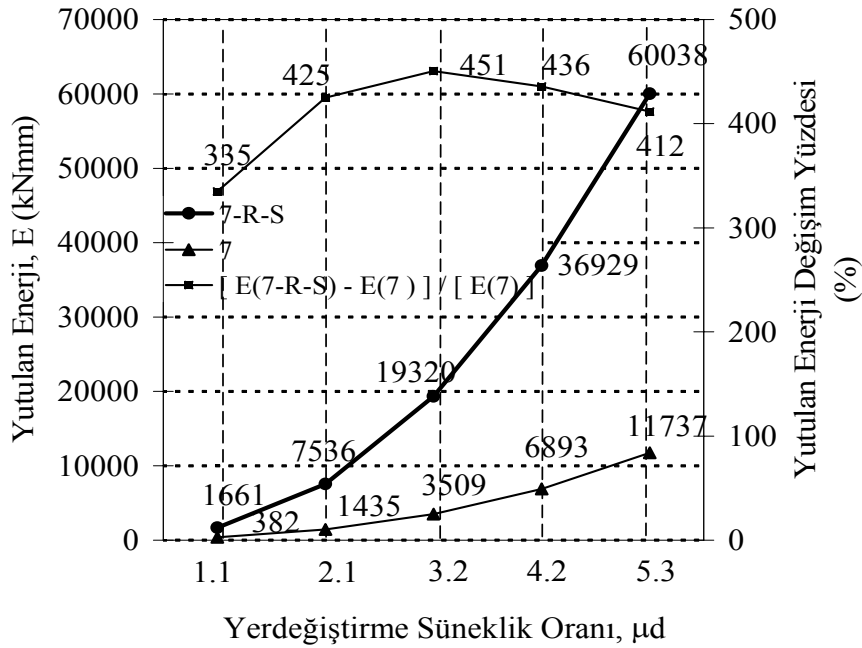
### Analitık değerlendirme

Şekil 16'da Numune 2-R-S için elde edilen deneysel moment-eğrilik ilişkisi ile, lif yaklaşımı

kullanılarak analitik olarak elde edilen moment-eğrilik ilişkisi karşılaştırılmıştır. Bu şekilden de anlaşılabilir olduğu gibi, kullanılan analitik yöntem, deneysel veriler ile oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir. Analitik moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesinde, İlki (2000) tarafından geliştirilmiş olan BAKE2002 bilgisayar programı kullanılmıştır. Analitik moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesinde kullanılan yöntemin detayları



(c)

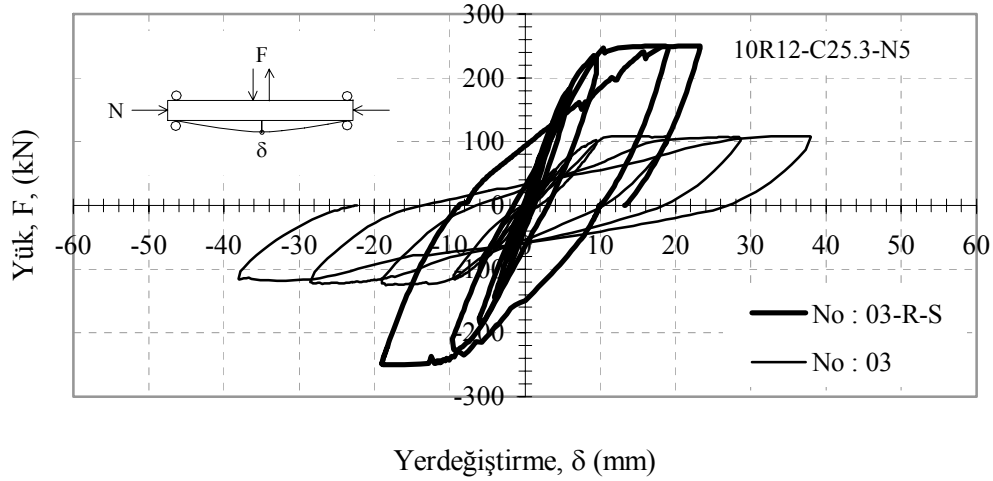


(d)

Şekil 13c-d. Orijinal ve güçlendirilmiş numuneler tarafından yutulan enerjilerin karşılaştırılması

İlki (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bulunabilir. Şekil 16'da verilen deneysel moment-eğrilik ilişkisinden de anlaşılacağı gibi, özellikle ileri şekildeğiştirme düzeylerinde hasar moment-eğrilik ilişkisine esas olan ölçüm bölgesinin dışında yoğunlaşmış, bunun sonucunda ilerleyen yükleme çevrimlerinde elastik ötesi

bölgede eğrilik fazla artmamıştır. Deneysel moment-eğrilik ilişkisi belirlenirken, Şekil 5'te gösterilen H11, H12, H13 ve H14 yerdeğiştirmeölçerleri ile yapılan ölçümler esas alınmış olup, bu yerdeğiştirmeölçerler için ölçüm boyu yaklaşık 200 mm dir.



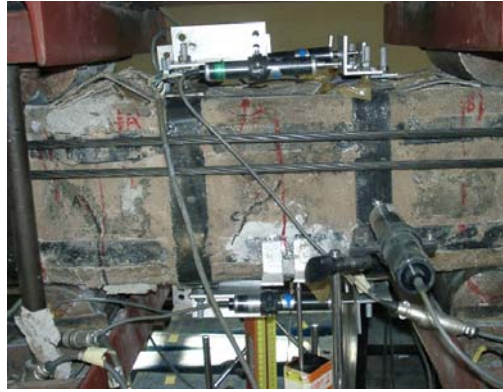
Şekil 14. 3-R-S numunesi için davranışın orijinal numune ile karşılaştırması

Tablo 5. Numunelerin öteleme rijitlikleri (kN/mm)

No : 1	No : 2	No : 3	No : 4	No : 5	No : 7	No : 8
11.6	11.3	14.9	12.7	12.1	18.1	16.8
No : 1-R	No : 2-R-S	No : 3-R-S	No : 4-R-S	No : 5-R-S	No : 7-R-S	No : 8-R-S
7.0	19.5	37.3	19.9	26.9	34.7	42.4



(a)



(b)

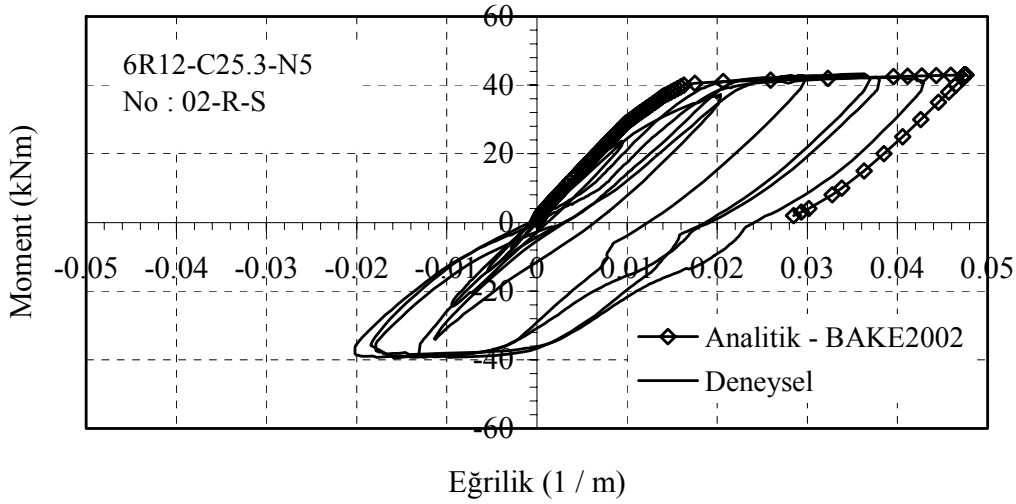
Şekil 15. a) Enine güçlendirme lamalarında gözlenen hasar, Numune 7-R-S,  $\mu_d \approx 5$   
b) Boyuna güçlendirme lamalarında burkulma

## Sonuçlar

Daha önce sabit aksenal kuvvet ile yön değiştiren tekrarlı yanal yükler altında önemli düzeyde hasar oluşuncaya kadar deneye tabi tutulmuş 7 numuneden 1'i sadece onararak, 6'sı onarılıp güçlendirilerek tekrar aynı yükleme şartlarında deneye tabi tutulmuştur. Onarım için

epoksi enjeksiyonu ve tamir harcı kullanılmış, güçlendirmede ise boyuna doğrultuda çelik köşebent veya lamalar, enine doğrultuda lamalar kullanılmıştır.

Sadece onarım gören numunede tamir harcının istenen dayanımda olmaması sonucu beklenen



Şekil 16. Analitik ve deneysel moment-eğrilik ilişkileri

davranış elde edilememiş, onarılan numunenin dayanım, süneklik, enerji yutma ve rijitlik özellikleri orijinal numune için belirlenmiş olanlardan daha zayıf kalmıştır.

Onarılmış ve güçlendirilmiş numunelerde ise davranış orijinal numunelere göre önemli oranda gelişmiştir. Bu numunelerin dayanımları %79 ile %305 arasında,  $\mu_d \approx 4$  yerdeğiştirme sünekliği düzeyinde enerji yutma kapasiteleri yaklaşık olarak %60 ile %440 arasında, başlangıç rijitlikleri ise %57 ile %152 arasında artmıştır. Güçlendirme amacı ile boyuna doğrultuda kullanılan köşebentler deney sonuna kadar numuneden ayrılmamış, lamalar ise oldukça ileri şekildeğiştirme düzeylerinde oluşan burkulma sonucu numuneden ayrılmıştır. Ancak bu ayrılma büyük ve ani bir dayanım kaybına neden olmamıştır.

Lif yaklaşımı kullanılarak, onarılmış ve güçlendirilmiş numuneler için elde edilen analitik moment-eğrilik ilişkileri, deneysel veriler ile karşılaştırılmış, ve analitik sonuçların deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Kesit ve numune davranışlarında elde edilen bu iyileşmenin yapı sistemlerinde de geçerli olabilmesi için, güçlendirilen elemanların kapasitelerindeki artışların gözönünde bulundurularak, birleşimlerin de güçlendirilmesinin gerekli olduğu açıktır.

## Teşekkür

Çalışma TÜBİTAK (İNTAG-568) ve İzomas AŞ tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Aboutaha, R. S., Engelhardt, M. D., Jirsa, J. O. ve Kreger, M. E., (1996). Seismic Retrofit of R/C Columns Using Steel Jackets, *Seismic Rehabilitation of Concrete Structures*, ACI, SP-160, 59-72.
- Badoux, M., (1998). Developments in Seismic Retrofitting Research in the USA, *Proc. of 11<sup>th</sup> European Conf. on Earthquake Eng.*, CD-ROM, Paris.
- Can, H., (1997). Çelik Korniyerler ile Güçlendirilmiş/ Onarılmış Betonarme Kolonların Eksenel Yük Altında Davranışı, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 100, 1363-1371.
- Fukuta, T., Hiraishi, H. ve Okada, T., (1998). Repair and Retrofit of Buildings After the 1995 Great Hanshin Awaji Earthquake Disaster, *Proc. of 2nd Japan-Turkey Workshop*, İstanbul.
- Fukuyama, H. ve Sugano, S., (2000). Japanese Seismic Rehabilitation of Concrete Buildings After the Hyogoken-Nanbu Earthquake, *Cement and Concrete Composites*, **22**, 59-79.
- Gavrilovic, P., Necevska-Cvetanovska, G. ve Gjorgjievaska, E., (1998). Seismic Strengthening of the Existing Structure of the Court Building in the Town of Skopje, *Proc. of 2nd Japan-Turkey Workshop*, İstanbul.
- Harries, K. A., Cook, W. D. ve Mitchell D., (1996). Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Coupling Beams Using Steel Plates, *Seismic Rehabilitation of Concrete Structures*, ACI, SP-160, 93-114.

- İlki, A., (2000). Betonarme Elemanların Yön Değiştiren Tekrarlı Yükler Altında Doğrusal Olmayan Davranışı, *Doktora Tezi*, İTÜ.
- Kumbasar, N. ve İlki, A., (2001). Yön Değiştiren Tekrarlı Eğilme Etkilerine Maruz Betonarme Kesitler İçin Kuramsal ve Deneysel Moment-Eğrilik İlişkileri, *İMO Teknik Dergi*, Yazı 159, 2291-2315.
- Tankut, T., (1998). Structural Rehabilitation of Reinforced Concrete Members, *Proc. of 2nd Japan-Turkey Workshop*, İstanbul.
- UNDP/UNIDO, (1983). Repair and Strengthening of Reinforced Concrete, Stone and Brick-Masonry Buildings, **5**, Project RER/79/015.