

## BETONARME ELEMANLARDA ARD-GERMELİ SARGILAMA

### CONFINEMENT BY EXTERNAL POST-TENSIONING IN RC STRUCTURAL MEMBERS

Erkan AKPINAR<sup>1</sup>, Şevket ÖZDEN<sup>2</sup>, Murat SAATCIOGLU<sup>3</sup>

#### ÖZET

*Depreme dayanıklı yapı tasarımının en önemli unsuru olan süneklik, günümüzde betonarme tasarım yöntemlerinin temel taşıını oluşturmaktadır. Temelde kesme yükünün karşılanması amacıyla kullanılan enine donatı, oluşturduğu sargılama etkisiyle betonarme elemanların, sünek davranış sergileyebilmesini sağlayan birincil faktörlerdendir. Mevcut yapı stoğundaki betonarme elemanların önemli bir kısmının, yeterli miktarda ve doğru uygulanmış sargılama donatısından yoksun olduğu bilinen bir gerçektir. Bu tür yapılarda betonarme elemanlar, çeşitli malzeme ve yöntemlerle dışarıdan sargılama yoluyla güçlendirilmekte, bu sayede süneklik düzeyleri, kesme kapasiteleri ve aynı zamanda da eksenel basınç dayanımları artırılabilir.*

*Betonarme mantolama yapılması, çelik lama veya lifli polimer kullanılarak kesitin sarılması, betonarme elemanların sargılama ile güçlendirilmesi için kullanılan yöntemlerdir. Pasif sargılama olarak adlandırılan bu tip uygulamalarda sargılama etkisi, kesitin belirli bir miktar deforme olup genişlemesinin ardından ortaya çıkmaktadır. Çelik, akıllı metaller ve lifli polimerlerin kullanılabilirdiği ard-germeli sargılama, kullanılan malzeme üzerinde, uygulama sırasında veya sonrasında çekme gerilmesi oluşturularak yapılmaktadır. Bu yöntem sonucunda, uygulamanın yapıldığı betonarme elemanda herhangi bir deformasyon oluşumuna gerek olmaksızın, kesit üzerinde sargılama gerilmeleri oluşturulabilmektedir. Aktif sargılama olarak da tanımlanan bu yöntemle, pasif sargılama ile sağlanan tüm olumlu gelişmeler elde edilebilmekte, ayrıca nihai hasar seviyesi nispeten azalmakta ve daha az malzeme ile daha etkin ve ekonomik bir sonuç elde edilebilmektedir. Ard-germeli sargılama, özellikle deprem sonrası oluşan betonarme eleman hasarlarında, geçici veya kalıcı acil müdahale yöntemi olarak önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışmada, çelik profil veya lama, ard-germe tendonları, lifli polimerler, çelik şeritler ve akıllı metaller kullanılarak uygulanan, aktif sargılama örnekleri derlenmiş olup, ard-germeli sargılama konusunun güncel değerlendirmesi yapılmış ve bu konudaki teknik ve teorik son durum ortaya konulmuştur.*

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Deprem Hasarı, Güçlendirme, Aktif Sargılama

#### ABSTRACT

*Ductility is known as one of the most significant factors in the design of earthquake resisting structures. The lateral reinforcement that is fundamentally used to resist against shear forces, is also beneficial to obtain ductile behavior for reinforced concrete structures through confinement. It is a well known fact that most of the existing structures are lack of properly designed confinement reinforcement. In these types of structures, externally applied confinement schemes with various materials are used for strengthening purposes in terms of ductility level, shear capacity and axial compressive strength.*

*Reinforced concrete column jacketing and wrapping with steel plates or fiber polymers are most commonly preferred methods for confinement. In these types of applications which are also known as passive confinement, the contribution of confinement takes place after certain*

<sup>1</sup> Dr. Muh. Araş. Gör., Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli- TÜRKİYE, akpinarerkan@yahoo.com

<sup>2</sup> Doç. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli-TÜRKİYE, sevketozen@yahoo.com

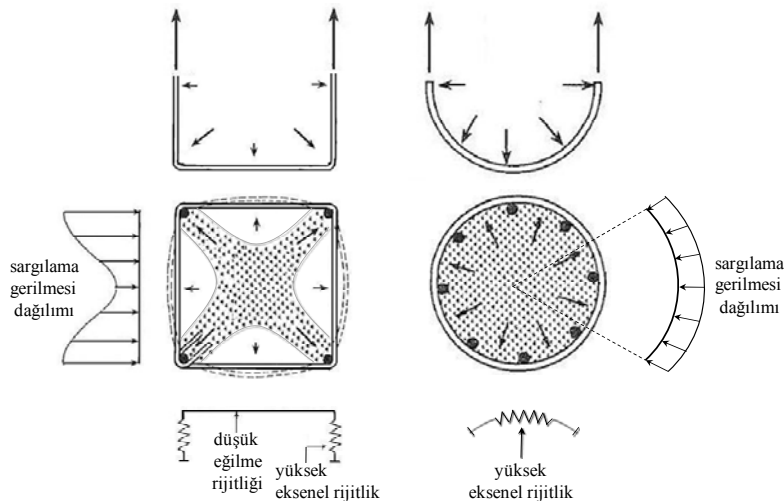
<sup>3</sup> Prof. Dr., University of Ottawa, Ottawa-CANADA, murat@uOttawa.ca

amount of deformation and expansion of the cross section. Alternatively, post-tensioning of steel, shape memory alloys and fiber polymers surrounding the cross section are also used for confinement. In this method, confinement becomes active after application, regardless of any deformation in contrary to the passive confinement. This active confinement method offers many favorable developments over the ones provided by passive confinement. Furthermore, through active confinement permanent damage level reduces comparatively and it becomes possible to obtain more effective and economical results with lesser amount of material. Post tensioned confinement proposes temporary or permanent solutions especially for earthquake induced damages. This study reports the former applications and state of the art of steel plate/angles, strips, post tensioning tendons, fiber polymers and shape memory alloys as active confinement.

Keywords: Reinforced concrete, Earthquake damages, Strengthening, Active Confinement

## GİRİŞ

Modern betonarme tasarım felsefesi, belirli bir dayanımın sağlanmasının yanında, yapı ve yapı elemanlarının sünek davranış gösterebilmesi temeline oturmaktadır. Sünek davranışın elde edilebilmesi adına yapı elemanında, öncelikle kesme göçmesinin olmayacağı garantilenmeli, sonrasında ise yükleme altında dayanımda önemli bir kayıp yaşanmaksızın, belirli bir değere kadar deforme olabilme kabiliyeti sağlanmalıdır. Bilindiği üzere belirtilen her iki koşul için de sargılama donatısının gerekli miktarda ve uygun yerleşimde bulunması, büyük önem taşımaktadır (Park ve Paulay, 1975, Sakai ve Sheikh, 1989, Ersoy ve Özcebe, 2001). Bununla birlikte sargılamanın, betonun basınç dayanımı ve eksenel yük altındaki davranışı üzerindeki olumlu etkisi, birçok araştırmacı tarafından doğrulanmış ve modellenmiştir (Mander vd., 1988, Saatcioglu ve Razvi, 1992). Yüzyılı aşkın süredir çalışılan, betonda sargılama olgusunda yaklaşık ilk 50 yıllık süreç, sargılama donatısının, betonun basınç dayanımına ve eksenel yük altındaki davranışına etkilerinin incelenmesi üzerine gerçekleşmiştir. Ardından gelen süreçte bu çalışmaların yanında, sünek tasarım felsefesinin yerleşmeye başlamasının da bir sonucu olarak, sargılamanın, betonarme elemanların elastik ötesi davranışına etkileri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Betonda sargılama adına yapılan ilk çalışmalar, helezonik ve sarmal yapıdaki donatılar kullanılarak gerçekleştirilmiş, kapalı formda kare ve dikdörtgen sargı donatılarının etkileri üzerine incelemeler ilerleyen süreçte başlamıştır (Sakai ve Sheikh, 1989). Temel olarak betonarmede sargılama olgusu, kesitin genişlemesi ile ilişkilidir. Basınç dayanım testleri göz önüne alındığında yüke maruz kalan betonun, poisson oranına bağlı olarak genişlediği bilinmektedir. Bu hareket ile birlikte, kesit çevresine yerleştirilen sargılama malzemesi üzerinde, genişlemeye engellemeye yönelik çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Kesit çevresince kapalı formda yerleştirilmiş sargılama malzemesinde oluşan çekme gerilmeleri, kesit merkezine doğru ve betonun genişleme eğilimine ters yönlü sargılama gerilmelerinin oluşumunu sağlamaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Kare ve dairesel kesitlerde sargılama donatısı etkinliği (Saatcioglu ve Razvi, 1992'den uyarlanmıştır)

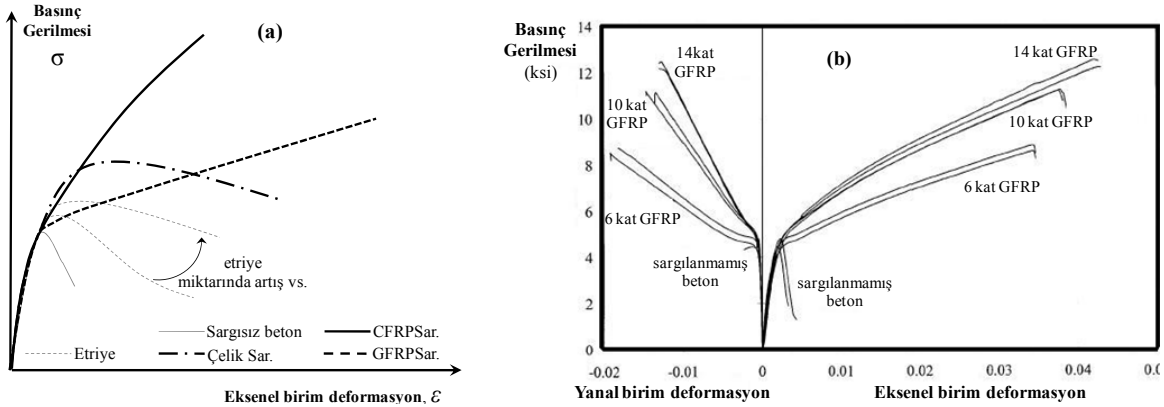
Bilindiği üzere klasik anlamda sargılama donatısı, imalat aşamasında betonarme elemanlarda kullanılan etriyelerdir. Etriyeler, oluşan kesme gerilmelerini karşılamakla birlikte, gevrek bir malzeme olan betonun hacimsel olarak çoğunluğu oluşturduğu betonarme elemanların, sünek davranış sergileyebilmesini sağlamaktadırlar (Park ve Paulay, 1975, Ersoy ve Özcebe, 2001). Dairesel formda düzenlenmiş etriyelerin beton/betonarme davranışı üzerindeki olumlu etkileri, prizmatik formda düzenlenmiş etriyelerin sağladığından daha fazladır. Bunun sebebi, etriyelerin her iki tür için farklı davranış sergilemesidir. Betonun yük altında genişlemesi sonucunda, dairesel etriyenin tümünde çekme kuvveti oluşurken, kare/dikdörtgen etriyede bu etki köşelerde ortaya çıkmakta ve orta bölgelerde etriye kolu, kesitin dışına doğru eğilmeye zorlanmaktadır (Şekil 1). Kullanılan donatının çekme rijitliğinin eğilme rijiliğine göre çok yüksek olması, dairesel formda oluşturulan etriyede sargılama etkisinin, daha yüksek değerlerde ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Sargılamanın etkinliği geometrinin dışında, sargılama donatısı miktarı, aralığı, düzeni, dayanımı ve uçlarının şekli gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir (Park ve Paulay, 1975, Sakai ve Sheikh, 1989, Saatcioglu ve Razvi, 1992).

Türkiye’de ve diğer ülkelerde son yıllarda yaşanan depremler, yapı stoğunun durumunu ve mevcut betonarme yapıların deprem performansını ortaya koymuştur. Betonarme yapı stoğunun, deprem sonucu hasar görebilirliği adına değişik birçok neden bulunmakla birlikte, sargılama donatısı yetersizliği listenin ilk sıralarında yer almaktadır. Gerekli miktarda ve uygun aralıkla etriye bulundurmeyen imalatı tamamlanmış betonarme elemanların, kesmeye karşı güçlendirilmesi ve süneklik düzeylerinin artırılması adına çeşitli sargılama teknikleri uygulanmaktadır. Betonarme mantolama, çelik profil, lama, levha kullanımıyla veya lifli polimer yardımıyla kesitin sarılması, betonarme elemanların sargılama ile güçlendirilmesi için uygulanan yöntemlerdir (Priestley vd., 1996, CEB-fib, 2001, CEB-fib, 2003). Bu tekniklerin tümünde sargılama adına temel çalışma prensibi, betonarme elemanın içerisinde bulunan etriyenin çalışma prensibi ile aynıdır ve pasif sargılama olarak bilinmektedir. Kesit, artan yükler altında belirli bir miktar deforme olup genişlemeye başladığında, sargılama etkisi ortaya çıkmaktadır. Etriye kullanımında olduğu gibi güçlendirme için kullanılan sargılama tekniklerinin tümünde, kesitin geometrik yapısının dairesel formda olması, sargılama etkinliğinin daha yüksek değerlerde oluşumunu sağlamaktadır (Priestley vd., 1996, CEB-fib, 2001, Bakis vd., 2002).

Bu güne dek yapılmış olan betonarme yapı güçlendirme uygulamalarında sayısal olarak üstünlüğün, betonarme mantolama yönteminde olduğu tartışılmaz bir gerçektir. Her ne kadar yeni donatının ve betonun, yapı temelinde ve katlar arasında sürekliliğin sağlanması ile eğilme dayanımına da etkisi olmakla birlikte, betonarme mantolama basit olarak bir sargılama uygulamasıdır. Diğer sargılama tekniklerinin kullanımına göre oldukça eski ve bilindik olması, sektör tarafından en çok benimsenmiş ürün olan betonarmenin kullanılıyor olması ve nispeten ucuz olması, betonarme mantolamanın halen gündemde kalmasını sağlayan sebeplerdir (CEB-fib, 2003). Öte yandan betonarme mantolama ile yapıya kayda değer miktarda kütle ilavesi yapılmakta, genellikle yapı temelinde değişiklik zorunlu hale gelmekte ve eleman/yapı rijitliğinde istenmeyen artışlara neden olunmaktadır. Özellikle dikdörtgen kesitlerde yapılan betonarme mantolama uygulamalarında, etkili bir sargılanmış beton davranışının elde edilmesinin oldukça zor olduğu bildirilmektedir (Priestley vd., 1996). Ayrıca yapının, betonarme mantolama uygulaması süresince uzun sayılabilecek bir zaman kullanım dışı kalması, belirtilen diğer gereksinimler ve olumsuzluklarla birleşince, toplam maliyeti arttırmakta ve fiyat-fayda ilişkisinin sorgulanmasına sebep olmaktadır.

Güçlendirme adına, çelik malzeme kullanılarak yapılan sargılama uygulaması, özellikle dairesel kesitli köprü kolonlarında çok sık görülen bir uygulamadır (Priestley vd., 1996). Çelik levha ile sargılanmış betonun basınç altındaki davranışı, çeşitli kaynaklar kullanılarak oluşturulan Şekil 2 (a)’da görülmektedir (Priestley vd., 1996, Ersoy ve Özcebe, 2001, CEB-fib, 2003). Şekildeki grafikten çelik malzeme ile güçlendirme amacı ile sargılamada elde edilen davranış, diğer sargılama tekniklerinin sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak izlenebilmektedir. Bu tip uygulamada, sargılanmamış beton basınç dayanım değerine karşılık gelen aksel deformasyona ulaşıldıktan sonra sargılamanın etkinliği başlamaktadır. Çeliğin, akma değerinin ardından gelen sabit basınç-deformasyon davranışı, sargılama uygulamasında, artan kesit genişlemesine kararsız olarak cevap vermesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Mevcut kolon boyutları doğrultusunda, önceden şekil verilmiş göreceli ince çelik levhalar, sahada kolon üzerine her iki yüzden birleştirilerek

kaynakla kolon boyunca birleştirilmektedirler. Çelik ve betonarme kolon arasında kalan küçük dairesel boşluk, çimento şerbeti veya çok ince harç ile doldurulmakta ve kolon boyunca sürekli sargılama etkisi oluşturulmaktadır (Priestley vd., 1996). Kesitin kare veya dikdörtgen olması durumunda ise kalan boşluğun miktarı artmakta, oluşan boşluğun beton ile doldurulması gerekmektedir (CEB-fib, 2003). Bu durumda betonarme mantolamada olduğu gibi yapıya ilave edilen kütle miktarı, oluşturulan çelik tüpten gelen değer in ötesinde, kullanılan beton nedeni ile oldukça artmaktadır. Bu gibi durumlarda ise çelikle sargılama uygulamalarında, L şeklinde çelik profiller veya köşe korniyerleri ve bütünlüğü sağlayan lamalar kullanılmaktadır. Uygulamada çelik paçalar, kesit çevresince kapalı form oluşturacak biçimde birbirlerine kaynaklanarak beton ile parçalar arasında kalan boşluk çimento şerbeti veya ince harç ile doldurulmakta veya çelik parçalar epoksi gibi yapısal yapıştırma ürünleri ile betonarme elemana sabitlenmektedir (CEB-fib, 2003). Çeliğin izotropik bir malzeme olmasından dolayı, eleman boyunca süreklilik gösterecek biçimde kullanıldığı bu tip uygulamalarda, betonarme elemanın eğilme dayanımında da artış sağladığı, eleman/yapı rijitliğinde değişime neden olduğu ve bu gibi durumlarda yapı temellerinde de müdahaleye gereksinim duyulduğu bilinmektedir (Priestley vd., 1996). Bütün bunlara ek olarak, bu tür sargılamada aşırı miktarda kullanılmak durumunda olan çeliğin, korozyona açık bir malzeme olduğu da akıldan çıkartılmamalıdır.



Şekil 2. Sargılanmış betonun eksenel basınç altındaki davranışı, (a) değişik sargılama malzemelerin davranış etkisi (CEB-fib, 2001 ve Ersoy ve Özcebe, 2001'den uyarlanmıştır), (b) farklı kalınlıkta uygulanmış FRP sargılama (Mirmiran ve Shahawy, 1997)

Lifli polimerler ile sargılama, betonarme elemanların güçlendirilmesinde kullanılan diğer bir tekniktir. Deneysel anlamda çalışmalar daha önceki tarihlere gitmekle beraber, lifli polimerlerin, özellikle güçlendirme adına yapı sektöründe kullanımı, 90'lı yılların başlarına denk gelmektedir. Oldukça yeni ve göreceli olarak malzeme fiyatının yüksek olduğu bu uygulama, hızlı imalat, yüksek dayanım, olumsuz çevresel faktörlere karşı koyma gibi özellikleri ile oldukça popüler hale gelmiştir. Uygun lifli polimer sargılama ile betonarme elemanlarda eksenel yük kapasitesi, kesme dayanımı ve plastik mafsıl bölgesinin dönme kapasitesi, dolayısıyla eleman sünekliliği artırılabilir (CEB-fib, 2001, Bakis vd., 2002, CEB-fib, 2003). Lifli polimerler ile sargılama, yerinde epoksi ile ıslak sarım, eleman tipine göre önceden hazırlanmış dairesel veya eliptik kabukların yerinde birleştirilmesi veya sargılama robotu kullanılarak epoksiye daldırılan liflerin sarımı şeklinde gerçekleştirilebilmektedir (CEB-fib, 2001). Lifli polimerler ile sargılanmış betonarme elemanların eksenel basınç altındaki davranışında, diğer sargılama tiplerinde olduğu gibi, genel anlamda sargılanmamış betonunun basınç dayanımına ulaştığı yanıl birim deformasyon değerinden itibaren, sargılamanın etkin hale geldiği görülmektedir (Şekil 2 (a), Şekil 2 (b)). Literatürde, lifli polimer tüpler kullanılarak hazırlanan beton silindir numune testlerinden, davranışın üç bölgede değiştiği görülmektedir. Birinci bölge davranış, tüm sargılama uygulamalarına benzer biçimde, sargılama yapılmamış beton ile aynıdır ve betondaki yanıl birim deformasyonlar belirli bir değerin altında kalmaktadır. Geçiş bölgesi olan ikinci bölgede ise beton içerisinde oluşan mikro çatlakların ve poisson etkisi ile oluşan genişlemenin etkisi sonucunda, kesit çevresinde bulunan lifli polimer malzemenin sargılama etkinliği başlamaktadır. Bu bölge, rijitliğin değiştiği ve azalma eğiliminde olduğu bölgedir. Üçüncü bölge ise betonun, kullanılan malzemeye bağlı olarak genişlenmesinin sınırlandırıldığı ve rijitliğin genellikle sabitlendiği bölgedir (Şekil 2 (a), Şekil 2 (b)). Davranış genel olarak, Şekil 2 (a) ve Şekil 2 (b)'de görüldüğü gibi sargılama

malzemesinin eksenel rijitliği tarafından belirlenmektedir ve göçmeye lifli polimerin kopması ile ulaşılmaktadır (Mirmiran ve Shahawy, 1997). Buna göre elastisite modülünün en büyük olduğu karbon lifli polimer malzeme ile sargılamada, minimum kalınlık kullanımı ve en az malzeme tüketimi ile uygun sonuçlar alınabilmektedir. Az sayıda sargılama yapılması, uygulama sırasındaki insan faktörü kaynaklı sorunların en düşük seviyede kalmasını da sağlamaktadır. Bazı çalışmalar, rijitlik düşüşün yaşandığı ikinci bölgenin sonunda, sargılama sırasında malzemede oluşabilen gevşeklikten ve bu tip liflerin önce gerili duruma gelme ihtiyacından dolayı ortaya çıkan bir rijitlik yumuşaması gerçekleştiği belirtilmektedir (Mirmiran ve Shahawy, 1997). Diğer sargılama tekniklerinde olduğu gibi lifli polimer sargılamanın etkinliği de dairesel kesitlerde daha yüksek değerlerdedir (Priestley vd., 1996, CEB-fib, 2001, Bakis vd., 2002, CEB-fib, 2003). Lifli polimerler ile sargılamada da kesitin geometrisi büyük önem taşımaktadır ve dairesel kesitli elemanlarda yapılan lifli polimer sargılamanın daha etkin olduğu literatürde bildirilmektedir (CEB-fib, 2001, Bakis vd., 2002). Ayrıca köşelerin uygun bir çapta yuvarlatılması, kare ve dikdörtgen kolonlarda lifli polimer sargılamanın başarısını doğrudan etkilemektedir (CEB-fib, 2001).

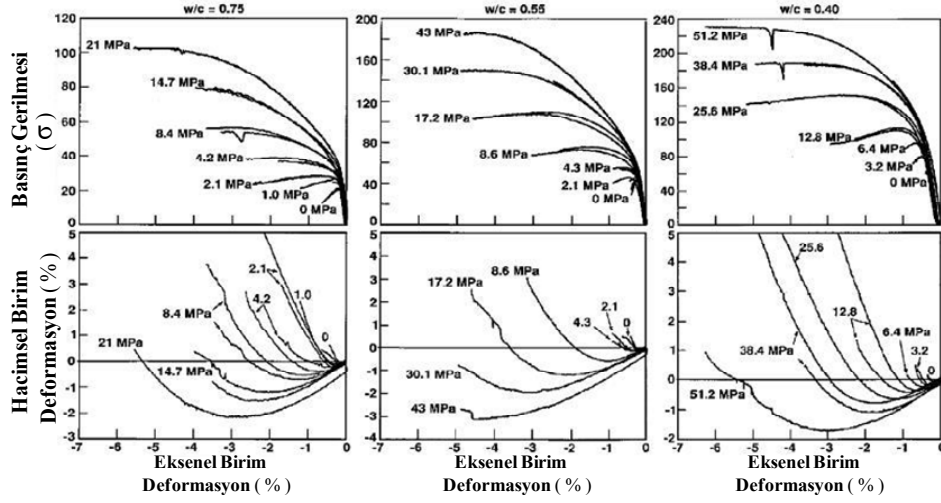
### AKTİF SARGILAMA OLGUSU

Beton malzeme üzerinde üç eksenli gerilme durumunun incelenmesi, geride kalan yüzyılın başarılarındaki ilk çalışmalara kadar gitmektedir. Sargılama ile elde edilen, beton dayanım artışının ve davranıştaki gelişmenin, sargılama gerilmesinin bir fonksiyonu olduğu ilk çalışmalardan beri bilinmektedir. Richart vd. (1928) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, silindirik şeklindeki beton numuneler üzerinde, yağ basıncından faydalanılarak yanal gerilmeler uygulanmış ve eksenel basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, başlangıçta kesit üzerine, sargılama gerilmesinin uygulandığı diğer bir değişle aktif sargılamanın kullanıldığı ilk çalışmadır. Kontrol edilebilir çevre içerisinde oluşturulan sargılama gerilmeleri altında, eksenel basınç davranışı incelenmiştir. Hidrolik basınç yardımı ile aktif sargılama oluşturulan bu deneylerin sonucunda beton basınç dayanım değerlerinde, sargılama gerilmesinin miktarına bağlı olarak önemli artışların elde edildiği ortaya konulmuş ve modellenmiştir. Denklem 1'de bu eşitliğin en genel hali yer almaktadır.

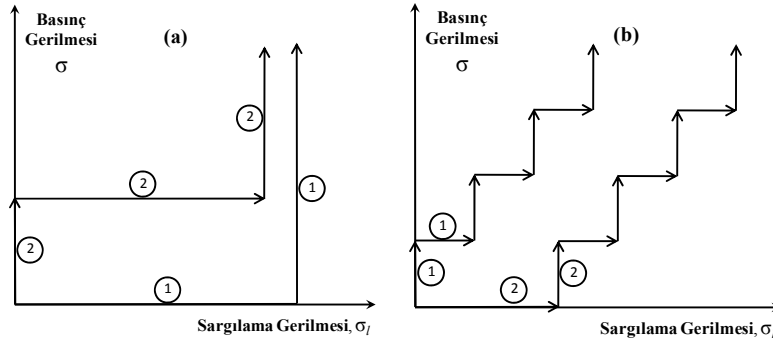
$$f_c' = f_{c0} + kf_1 \quad (1)$$

Amerikan birim sisteminin kullanıldığı çalışmada, k sargılama etkinlik katsayısı 4.1 olarak tanımlanmıştır. Denklem 1'de  $f_c$  ve  $f_{c0}$  sırasıyla sargılanmış ve sargılanmamış betonun basınç dayanımını,  $f_1$  ise kesit üzerinde oluşturulan sargılama gerilmesini göstermektedir. Çalışmada, yine sargılama gerilme değerine bağlı olarak, eksenel birim deformasyon değerinin % 7 mertebesine kadar ulaşabildiği ortaya konulmuştur. Richart vd. (1929), bir yıl sonra yapmış oldukları çalışmada, spiral sargılama donatısı kullandıkları silindirik numunelerin davranışını incelemiş ve sıvı basıncı kullanılarak sargılama gerilmesi oluşturdukları çalışmadan elde ettikleri modellemenin, sargılama donatısı kullanımında da geçerli olduğu sonucuna varmışlardır. Bugüne dek ortaya konan sargılama modelleri incelendiğinde (Sheikh ve Uzumeri, 1980, Mander vd., 1988, Saatcioglu ve Razvi, 1992), sargılama ile elde edilen basınç dayanım artışının ve beton davranışının doğru biçimde ortaya konulabilmesi adına, temel ifade olan denklem 1'in, değişik sargılama parametreleri altında uyarlandığı ve kalibre edildiği görülmektedir. Üzerinde konuşulan bu sargılama modelleri, en büyük dayanım değerine ulaşıldığında, kesit genişlemesinden dolayı yanal donatının aktığı ve kesit üzerinde sabit sargılama gerilmelerinin oluştuğu varsayımı yapılmaktadır. Burada dikkat çekilmesi gereken bir başka nokta, betonun eksenel yük altındaki deformasyon ve genişleme davranışının, farklı beton dayanım değerleri için değiştiği gerçeğidir. Bilindiği üzere kullanılan beton dayanımının artması sonucunda kesit genişleme oranı azalmakta, yani aynı eksenel basınç gerilmesi yüzdesinde (N/No), yüksek dayanımlı betonda daha düşük yanal genişleme meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak, aynı miktarda etriye veya diğer pasif sargılama uygulamalarının kullanıldığı yüksek dayanımlı betonarme elemanlardaki sargılama etkinliği, normal dayanımlı betonarme elemanlara göre daha düşük olacaktır. Başlangıçta aynı yanal gerilme değerinin uygulandığı üç eksenli basınç deneylerinden görülmektedir ki test edilen

betonun dayanım değerindeki artış, sargılama etkinliğinde azalmaya neden olmaktadır (Şekil 3). Buna rağmen başlangıçta çevresel gerilme verilmiş tüm numunelerde, tek eksenli basınç deneyi yapılmış numunelere göre, fark edilir dayanım ve süneklik artışı olduğu görülmektedir (Şekil 3) (Imran ve Pantazopoulou, 1996). Şekil 3'te yer alan sonuçlar, şekil 4 a-1 yüklemeye yöntemi kullanılarak yapılmış testlerden elde edilmiştir.



Şekil 3. Üç eksenli gerilme/hacimsel birim deformasyon – eksenel birim deformasyon deney sonuçları (Imran ve Pantazopoulou, 1996)



Şekil 4. Üç eksenli basınç deneylerinde sargılama gerilmesinin verilmesi, (a) tek adımda sargılama gerilmesinin oluşturulması, (b) çok adımda sargılama gerilmesinin oluşturulması (Imran ve Pantazopoulou, 1996 ve Laine, 2004'den uyarlanmıştır)

Betonarme bir kesit üzerinde oluşan monotonik yüklemeye durumunda, belirli bir yük seviyesinin ardından yanıl deformasyonlarda artışın hızlanmakta ve kesit genişlemesinin artmaktadır, buna bağlı olarak etriyelerin karşı koymasına ile ortaya çıkan sargılama gerilmelerinin de bu eğilime bağlı biçimde kademeli olarak gelişmektedir. Richart vd. (1928) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sargılama gerilmesi aktif olarak yani kesit genişlemesi başlamadan önce verilmiş ve deney boyunca sabit tutulmuştur (Şekil 4 a-1). Gerçek durumda ise sargılama gerilmesi değişimi, en genel halde Şekil 4 b-1'deki gibidir. Üç eksenli basınç deneylerinde, sargılama gerilmelerinin kesit üzerine kademeli olarak uygulanması durumu (Şekil 4 b-2) Imran ve Pantazopoulou (1996) tarafından yapılan çalışmada denenmiş ve sargılama gerilmelerinin, eksenel yük verilmeye başlamadan önce oluşturulduğu deneylere göre farklılığı ortaya konulmuştur. Laine (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki üç eksenli basınç deneylerinde, gerçek durumdaki yüklemeye tipine uygun olarak, zati yüklerin etkisi ön-basınç yüklemesi olarak dahil edilmiştir (Şekil 4 a-2, Şekil 4 b-1). Bu çalışmalar sonucunda, kesit üzerine kademeli sargılama gerilmesi verilmesiyle veya ön-basınç yükü verilmesiyle elde edilen basınç dayanım değerlerinin, tek adımda aktif sargılama oluşturulan durumda elde edilen basınç dayanım değerlerinden farklı olmadığı görülmüştür. Elde edilen farklılığın davranış üzerinde olduğu ve kademeli sargılama gerilmesi verilen durumda, ilerleyen gerilme değerlerinde hacimsel birim deformasyonların daha yüksek değerlerde elde edildiği sonucuna varılmıştır. Imran ve Pantazopoulou (1996) kademeli yanıl basınç uygulanan numunelerde (Şekil 4 b-2) belirli bir sargılama basıncına ulaşılan kadar betonda çatlakların

geliştiğini ve betonun, sargılama gerilmelerinin tek adımda verildiği numunelere göre (Şekil 4 a) daha zayıf durumda olduğunu belirtmiştir. Sargılama gerilmelerinin kesit üzerinde oluşturulma durumuna göre, ikinci uygulamanın aktif sargılamayı, birinci yani kademeli uygulamanın pasif sargılamayı temsil etmektedir. Belirli bir sınır değere kadar aktif sargılanmış numunelerde, eksenel basınç altında oluşacak yanal deformasyonların ve hacimsel değişimin ve iç yapıdaki bozulmanın, pasif sargılanmış numuneler göre daha az olacağı, bunun yanı sıra aynı dayanım değerinin elde edileceği söylenebilir.

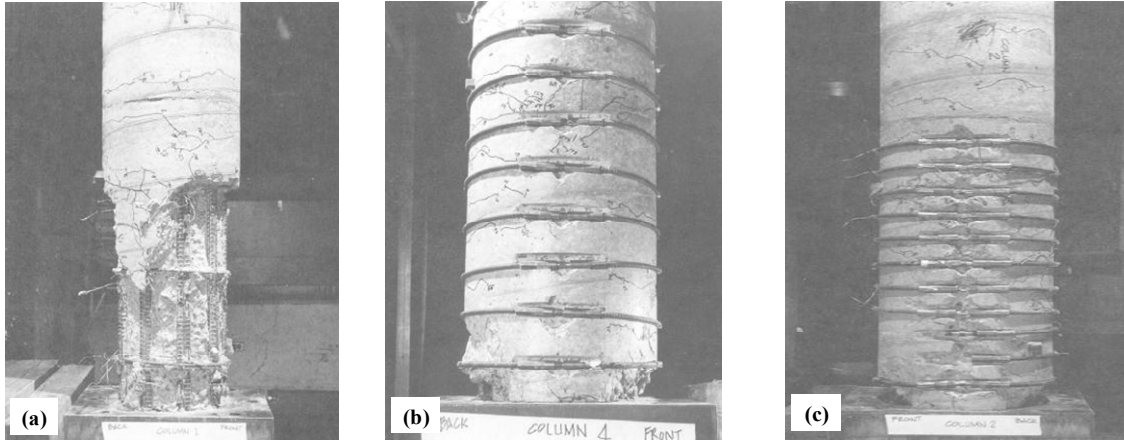
Çalışmanın bundan sonraki bölümünde, laboratuvar ortamında üç eksenli gerilme deneylerinden elde edilen davranışın, geçek yapı elemanlarındaki uygulanma örnekleri derlenmiştir. Ard-germeli sargılama yönteminde, daha önce belirtildiği gibi sargılama gerilmeleri, uygulamanın yapıldığı andan itibaren ve herhangi bir tetikleyici etkiye gerek duymaksızın kesit üzerinde oluşturulabilmektedir. Bunun sonucu olarak yapı elemanlarında, klasik pasif sargılama yöntemindeki gibi süneklik, kesme kapasitesi ve basınç dayanımı artışı elde edilmektedir. Aktif sargılama ile iç yapıdaki çatlakların geciktirilmesi ve kesit bünyesinin bozulmanın azaltılması sonucu betonarme elemanda, nihai hasar seviyesi azaltılabilmektedir. Ard-germeli sargılama yöntemlerinin kullanımıyla, daha az malzeme ile daha etkili sargılama oluşturulabilmesi ve göreceli olarak daha düşük seviyede kalan nihai hasar sonucu tamir işlemlerinin azalması sebebiyle, ekonomik olarak avantaj elde edilebilmektedir. Ard-germeli sargılama, günümüzün en önemli kıstasları arasında yer alan, hızlı çözüm ve temiz uygulama ihtiyaçlarına uygun bir yöntemdir. Ard-germeli sargılama tekniği özellikle, deprem sonrası oluşan hasarlarda geçici veya kalıcı, acil müdahale yöntemi olarak önemli bir alternatif sunmaktadır.

## ÇELİK VE METALİK ELEMANLAR İLE ARD-GERMELİ SARGILAMA

Betonarme yapı elemanlarında, üç eksenli gerilme deneylerinde görülen aktif sargılamanın olumlu etkilerinin kullanılması düşüncesi, 1940'lara kadar gitmektedir. Ard-germeli sargılama uygulamalarında ilk olarak yüksek dayanımlı çelik tellerin kullanıldığı görülmektedir. Martin (1966), aktif sargılamanın pratikte kullanıldığı ilk uygulamanın, 1943'te Creeps tarafından gerçekleştirilen, öngerilme teknolojisinden faydalanılarak sargılanan beton borular olduğunu bildirmiştir. Martin (1966), spiral ard-germe ile sargılanmış beton silindirelerin davranışını incelediği çalışmada, Feeser ve Chinn (1962)'in yaptığı benzer deneylerdeki gibi davranışta iyileşme kaydettiğini belirtmiş, basınç dayanımının ve ulaşılabilen en büyük eksenel birim deformasyon değerlerinde de artış elde edildiğini belirtmiştir. Martin (1966)'in yaptığı çalışmada, sabit olarak, eksenel yük oranının %80'i ve üstündeki değerlerde yük altında bırakılan numunelerde, zamana bağlı sünme kırılmasının olacağı sonucuna varılmıştır. Aynı yıllarda Amerika'da, çevresel ard-germenin uygulandığı, öngerilmeli beton tekniği ile üretilmiş beton tank yapıldığı da Scott (2004) tarafından bildirilmektedir. Gardner vd. (1992) farklı uzunluklar ve yük kaçıklık değerleri kullanarak, piyano telleri ile ard-germeli sargıladığı silindir numune testleri gerçekleştirmiştir. Narinliğin ve yük kaçıklığının az olduğu numunelerde, eksenel basınç testlerindeki genel davranışa uygun biçimde göçmenin, arda arda tellerde kopma ve betonda ezilme ile gerçekleştiği bildirilmektedir. Narinliğin ve kaçıklığın fazla olduğu durumlarda ise ard-germe verilmiş tellerde kopma görülmemiştir. Ard-germeli sargılama ile dayanım ve davranış sünekliğinde artış olduğu vurgulanmıştır.

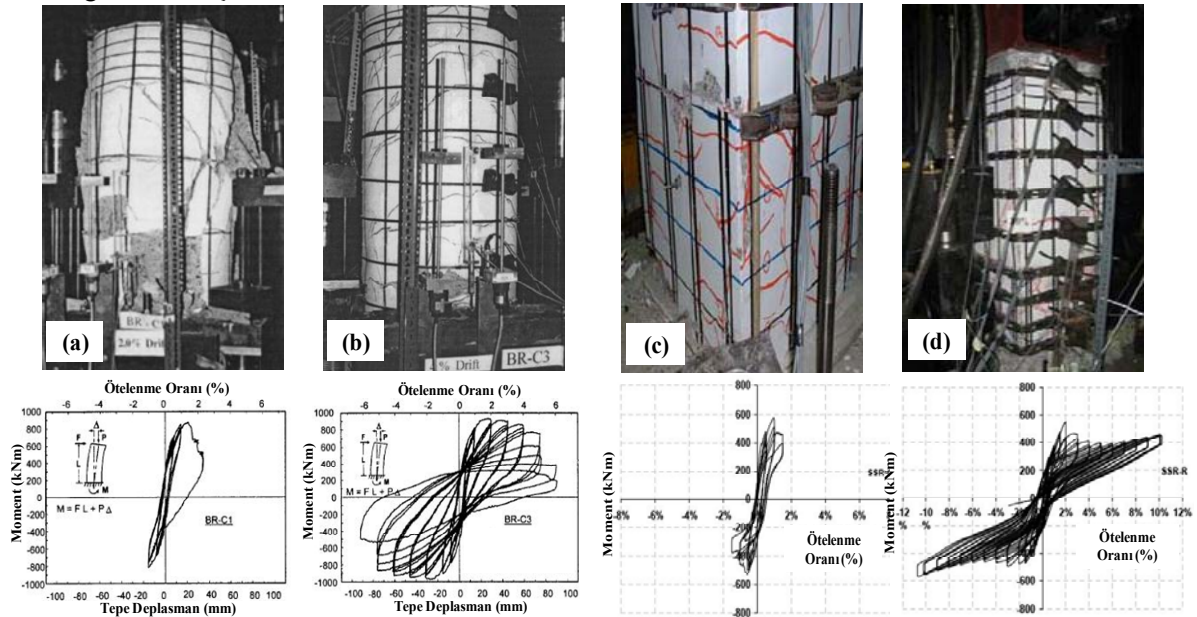
İlerleyen yıllarda aktif sargılamanın, hem kesme dayanımı hem de süneklik açısından, kolonların deprem performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir. Coffman vd. (1993), normal dayanımlı donatı kullanarak ard-germeli sargıladığı, donatı bindirmesi bulunan, 457 mm çapında ve 3000 mm boyunda kolonların davranışını incelemiştir. Deneylerde uygulanan eksenel yük oranı %20 olarak seçilmiştir. Aktif sargılama yöntemi ile yapılan bu güçlendirme çalışmasında, rijitliğin değişmediği, yük kapasitesindeki ve tek bir çevrimde yutulmuş enerjideki değişimin ise çok az olduğu ortaya konulmakla birlikte, kolonun göçmeye ulaşmadan önce dayanabildiği çevrim sayısının ve yükleme süresince tüketilen toplam enerjinin arttığı vurgulanmıştır. Şekil 5'de görüldüğü üzere, aktif sargılama uygulanmış numunelerde, test sonucunda oluşan kümülatif hasarın, daha az seviyede gerçekleştiği görülmektedir.





Şekil 5. Çelik bar kullanılan ard-germeli aktif sargılama uygulaması (Coffman vd., 1993)

Ard-germe tendonlarının kullanılması yardımıyla kolonların aktif sargılama ile güçlendirilmesi, 1993’de Ottawa Üniversitesi’nde başlayan bir dizi çalışmanın sonucu olarak literatüre girmiştir (Saatcioglu ve Yalcın 2003). Çelik tendonlar ile ard-germeli sargılamanın kolon davranışı üzerindeki etkileri, kolon geometrisi, boyu, donatı bindirme durumu, aktif sargılama değeri gibi değişkenler kullanılarak, on yılı aşkın bir dizi araştırmanın sonucunda ortaya konulmuştur (Saatcioglu vd.,2000, Saatcioglu ve Yalcın, 2003, Yarandi ve Saatcioglu, 2008). Yapılan bu çalışmalar sonucunda, kesme dayanımı eksikliği olan kolonların dayanım ve tepe deplasman değerlerinin, çelik tendonların kullanıldığı ard-germeli sargılama - çalışma sahiplerinin adlandırması ile retro-belt - kullanılarak, referans kolonlara göre önemli derecede artırılabilirdiği ortaya konulmuştur. Kesme etkin kolon davranışının, eğilme etkin davranışa dönüşmesi sağlanabilmektedir. Yanal donatı eksikliği bulunan eğilme etkin kolonlarda yapılan uygulamada ise ard-germeli sargılama ile yeterli sargılama etkisi oluşturulabilmekte ve daha sünek davranış elde edilmektedir. Donatı bindirmesi yapılmış ve/veya kare/dikdörtgen kesite sahip kolonlarda da etkinliğin azalmasına rağmen referans numunelere göre tatmin edici düzeyde sistemin işe yaradığı görülmüştür. Şekil 6’da “retro-belt” ard-germeli sargılama sisteminin, dairesel ve dikdörtgen kolonlarda uygulanması ve aynı kolonlar için testlerden elde edilen sonuçlar yer almaktadır (Saatcioglu ve Yalcın, 2003, Yarandi ve Saatcioglu, 2008). Kare ve dikdörtgen kolon uygulamalarında, tendonlar ile kolon yüzü arasına metal dolgu parçaları konularak, sistemin etkinliği artırılmıştır.

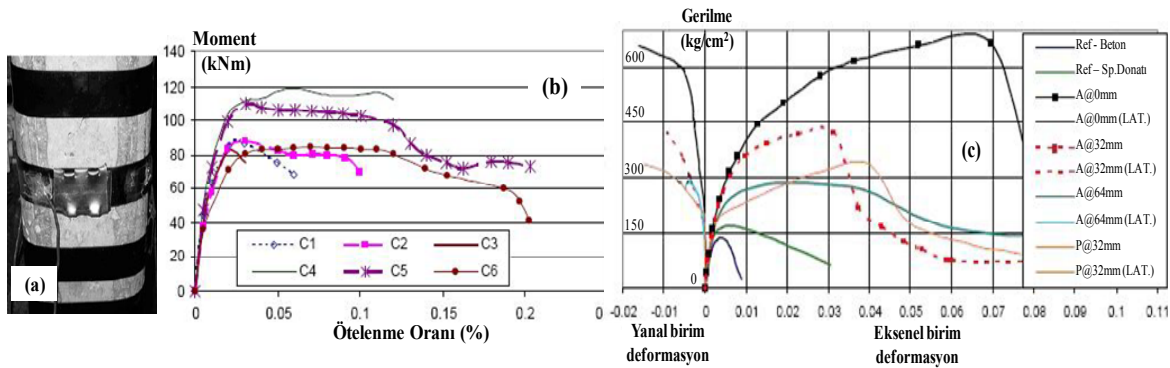


Şekil 6. Çelik tendonların kullanıldığı ard-germeli sargılama sistemi “retro-belt”, (a) ve (B) Saatcioglu ve Yalcın, 2003, (c) ve (d) Yarandi ve Saatcioglu, 2008



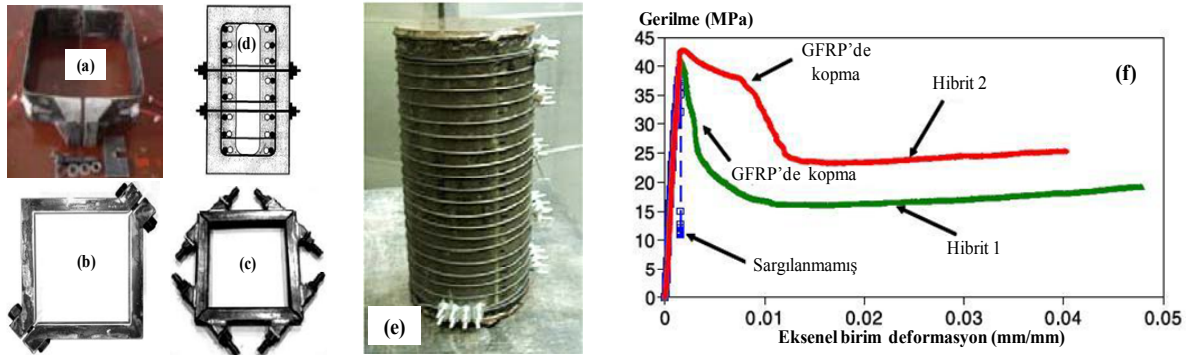
Sanayide, paketlemede kullanılan yüksek dayanımlı metal şeritler de, betonarme elemanların aktif sargılama ile güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Uygulama için yine paketlemede kullanılan cihazlardan faydalanılan sistem, nispeten kolay bir tekniktir. Şeritlerin iki ucunu, ard-germe altında birleştiren kilit parçaları, sistemin en zayıf noktası olarak görülmektedir. Literatürde, betonarme elemanların belirtilen şekilde aktif sargılamayla güçlendirilmesi konusundaki bilinen ilk çalışmaların, Frangou vd. (1995) ve Saatcioglu ve Yalcın (2003) tarafından gerçekleştirildiği görülmektedir. Frangou vd. (1995) tarafından, ard-germeli paketleme şeritleri kullanılarak, silindir numunelerde basınç ve prizmatik numunelerde eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Ard-germe değerinin net olarak verilmediği çalışmada, kullanılan tekniğin şeritlerin aralığına bağlı olmak kaydıyla, beton basınç dayanımını ve deformasyon kabiliyetini artırdığı görülmüştür. Prizmatik numunelerde de kullanılan yöntemin, kesme dayanımını ve sünekliği artırdığı belirtilmiştir. Saatcioglu ve Yalcın (2003) tarafından gerçekleştirilen uygulamada kolon boyutları, tendonlar ile ard-germeli sargılama yapılan kolonlarla aynı olduğu için doğrudan karşılaştırma yapabilmek mümkündür. Şekil 6 b'deki numune ile aynı özelliklere sahip ve yaklaşık eşit sargılama gerilmesi oluşturulan paketleme şeritleri ile aktif sargılama yapılmış kolon davranışının, %2 ötelenme oranına kadar yine aynı şekilde gösterilen grafikteki gibi olduğu belirtilmiştir. %2 ötelenme oranından sonra kritik bölgedeki şeritlerin kopmaya başladığı ve %3 ötelenme oranında, boy donatılarının burkulması ile göçmeye ulaşıldığı vurgulanmıştır.

Dolce vd. (2003) tarafından, metal şeritler kullanılarak aktif sargılama yapılmış kolonların aksel yük altındaki davranışı, çelik lama ve lifli polimer kullanılarak pasif sargılama yapılmış, aynı boyutlardaki kolonların davranışı ile karşılaştırılmıştır. 200 mm X 300 mm (L=800 mm) numune boyutlarının kullanıldığı çalışmada, metal şeritlerle ard-germeli sargılama sonucunda, hem donatılı hem de donatısız kolonlarda önemli dayanım ve süneklik artışı sağlandığı belirtilmiştir. Doğrudan karşılaştırma yapmanın yanıltıcı sonuçlar verebileceği düşünülerek birlikte Dolce vd. (2003), belirtilen aktif sargılama tekniğinin, bir kat ve tam boy uygulanmış karbon lifli polimer güçlendirmesinden daha iyi sonuç verdiğini, nispeten yoğun sayılabilecek çelik lama ve köşebentlerle yapılan pasif sargılama ile de hemen hemen eşit artışlar sağlandığını bildirmiştir. Metal şeritlerin ard-germeli sargılamada kullanımı üzerine en geniş ve sistematik çalışma, Moghaddam vd. tarafından gerçekleştirilmiştir (2008, 2009, 2010). Şekil 7 c'de, metal şeritlerle ard-germeli sargılama uygulaması yapılmış silindir numunelerdeki olumlu dayanım ve davranış değişimi görülmektedir (Moghaddam vd., 2008). Bu testler sonucunda, metal şeritlerin kullanıldığı ard-germeli sargılama güçlendirmesinde, aktif sargılama gerilmesi oluşturmanın, serbest olarak şeritlerin pasif sargılanmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir (Moghaddam vd., 2008, Moghaddam vd. 2010). Yine bu testlerden çıkan başka bir sonuç ise kullanılan tekniğin rijitliği değiştirmemekle beraber, beton dayanım değeri öncesi de davranış üzerinde olumlu etkisi olduğu bildirilmiştir. Moghaddam ve Samadi (2009) aynı sistemi, 200 mm X 250 mm (L=1000 mm) kolon numunelerde yatay yük altında test etmiş, hem dayanım hem de süneklik adına oldukça iyi sonuçlar elde edildiğini bildirmiştir (Şekil 7 a, Şekil 7 b). Grafikte C1, C2 numunelerinde diğer numunelere göre, nispeten aksel yük oranı daha azdır ve C1, C3 numuneleri referans numuneleridir. Grafikten de görüldüğü üzere, belirtilen teknikle uygulanan aktif sargılama ile yatay yük dayanımında ve deplasman sünekliklerinde önemli gelişim elde edilmiştir.



Şekil 7. Metal şeritler ile ard-germeli sargılama (a) (b) Moghaddam ve Samadi (2009), (c) Moghaddam vd. (2010)

Çelik plaka, lama ve köşebentler kullanılarak betonarme elemanların güçlendirilmesi, daha önce belirtildiği gibi kullanılagelen bir yöntemdir. Literatürde bu tür elemanlara, ard-germe uygulayarak aktif sargılama yapıldığı da görülmektedir. Cheong ve Perry (1991), prizmatik betonarme deney numunelerini, yan yüzlerinden geçirdiği yüksek dayanımlı gijonlarla sıkarak basınç altında test emiş ve üç eksenli gerilme durumunu mekanik sargılama ile oluşturmaya çalışmıştır. Değer olarak az olmakla birlikte dayanım ve süneklik artışı gözlemlendiği belirtilmiştir. Aboutaha vd. (1999) yaptıkları çalışmada, deney setindeki bir adet numunenin güçlendirilmesini, çelik levhalarla sargılamaya ek olarak, kesit içerisinde geçirdikleri gijonları ve dolayısıyla levhaları birbirlerine doğru sıkarak gerçekleştirmişlerdir (Şekil 8 d). Önceden hasar görmüş olan kolonun plastik mafsallık ve bindirme boyu bölgesinde yapılan bu uygulamanın, hem dayanım hem de süneklik açısından en iyi sonuç veren yöntem olduğu bildirilmiştir. Kaya (2003) benzer bir uygulamayı, düz yüzeyli donatılarla imal ettiği kolonlarda gerçekleştirmiştir. Bu uygulamada, çelik levha yerine belirli aralıklarla konulan çelik şeritlerle sargılama yapılmış ve bu levhaları birbirine doğru sıkarak gijonların bulunduğu deliklere, son aşamada harç doldurulmuştur. Gijonlara tork anahtarları yardımı ile gerilme uygulanmıştır. Çalışma sonucunda uygulamanın istenilen düzeyde iyileşmeye sebep olmadığı bildirilmiştir. Çelik levhaların kullanıldığı bir diğer ard-germeli sargılama türü ise L veya U şeklindeki iki karşılıklı çelik parçanın, kesitin çevresinde birleştirilerek sıkıştırıldığı uygulamadır (Hussain ve Driver, 2005, Şekil 8 b ve c, Guo vd. 2006, Şekil 8 a). Her iki çalışmada da ard-gerilme uygulanmış kolon dayanımlarının, aynı uygulamanın pasif sargılama olarak gerçekleştirilmiş karşılıklarına ve sargılama yapılmamış numunelere oranla, önemli derecede arttığı görülmüştür. Aynı sonucun süneklik için geçerli olmadığı bildirilmiştir. Kesme problemi olan veya yüksek eksenel yüke maruz kolonlarda uygulanabilir bir teknik olarak kullanılabilmesi, aynı çalışmalarda vurgulanmıştır. Mokari ve Moghadam (2008), eleman boyunca köşelere yerleştirdikleri köşebentler ve bunları birleştiren lamalarla sargıladıkları kare kesitli beton numuneleri, eksenel basınç altında test etmişlerdir. Çelik lamaların ısı ile genişmesi sağlanıp bu haldeyken köşebentlere kanatılmış ve numune üzerinde kısmen kontrolsüz ard-germe uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ard-germe uygulanmamış olan eşlenik numuneye göre, dayanım ve süneklik açısından çok az iyileşme elde edilirken, eleman kapasitesine ulaşılmadan önceki davranışta gözle görülür bir gelişim olduğu belirlenmiştir.

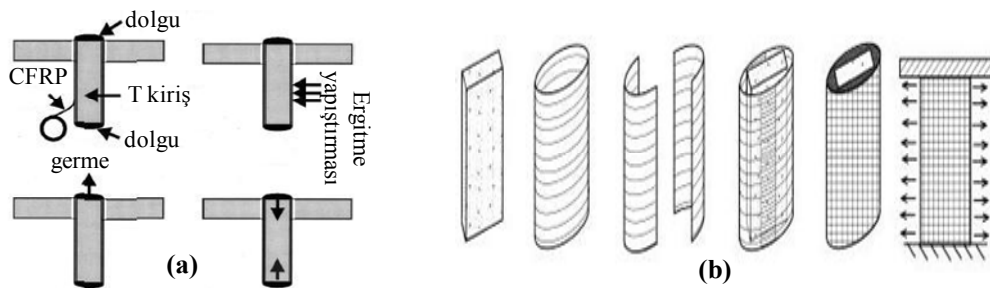


Şekil 8. Çelik malzeme ve akıllı metaller ile ard-germeli sargılama

Artan ısı ile faz değiştirerek gerilme oluşturan akıllı metaller ile betonarme elemanlar üzerinde aktif sargılama oluşturma çabaları, 2000'li yılların başlarından bu yana süregelmektedir (Krstulovic-Opara N and Thiedeman PD, 2000, Janke L Czaderski C Motavalli M and Ruth J, 2005, Andrawes B, Shin M and Wierschem N 2010). Şekil 8 e ve Şekil 8 f'de, Shin ve Andrawes (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kullanılan, hibrit olarak adlandırılmış, GFRP ile sargılandıktan sonra akıllı metal tel ile aktif sargılanmış silindirik beton numune ve çalışmadan elde edilen sonuçların yansıdığı grafik görülmektedir. Hibrit 2 olarak tanımlanan numunede 4 kat GFRP ve 13 mm adımla spiral akıllı metal tel kullanılmıştır. Şekildeki grafikten görüldüğü gibi GFRP sargılama ve akıllı metal ile aktif sargılamanın birlikte kullanılması sonucunda, özellikle davranışın fark edilir biçimde geliştirilebildiği ifade edilmektedir. 13 mm adımla akıllı metal tel kullanılarak aktif sargılama yapıldığında, 8 kat GFRP pasif sargılamaya göre %12 dayanım artışı sağlandığı ve ulaşılan en büyük birim deformasyonun önemli derecede arttığı belirtilmiştir.

## LİFLİ POLİMERLER İLE ARD-GERMELİ SARGILAMA

Lifli polimerler, betonarme elemanların güçlendirilmesinde son 10 yıldır yaygın biçimde kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi çelik plakalarda olduğu gibi lifli polimer malzeme ile sargılamada da sargılamanın etkinliği kare ve dikdörtgen elemanlarda azalmaktadır. Bu düşüşün giderilebilmesi amacı ile kare ve dikdörtgen elemanlarda, kesit-şekil değişikliği en uygun seçim olarak görülmüştür. Kesitin büyütülmesinde kullanılmakta olan genişleyen harç, sadece kesit değişikliğine yol açmakla kalmamış, aynı zamanda kesit üzerinde aktif sargılama gerilmelerinin oluşmasına sebebiyet vermiştir. Bu etki ve lifli polimer ile aktif-pasif sargılama farklılığı, Sadatmanesh vd. (1996) tarafından belirtilmiştir. Dairesel kolonlarda lifli polimer ve beton arasındaki boşluğun, basınçlı epoksi ile doldurulması sonucunda elde edilen düşük seviyedeki ard-germeli sargılamanın, referans kolonun sonuçlarına göre etkili olduğu, pasif sargılama uygulanmış numune sonuçlarına göre de küçük bir miktar artış sağlayabildiği görülmüştür. Genleşen epoksi/harç kullanarak, lifli polimer sargılama uygulamalarını pasiften, aktif sargılamaya dönüştürme çabalarının, 1990'ların ortasından beri süregeldiği görülmektedir. Mortazavia (2003) lifli polimer sargılanmış dairesel numunelerde, genleşen harç yardımıyla oluşturulan ard-germenin, eksenel basınç davranışına etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda ard-germeli sargılamayla, sargılanmamış numunelere göre %400'ün üzerinde, pasif sargılanmış eşlenik numunelere göre ise %35 dayanım artışı elde edildiği bildirilmektedir. Yan vd (2007) tarafından, kare ve dikdörtgen numunelerde, kesit-şekil değişikliği ve aktif-pasif sargılamanın farklılığı üzerine çalışmalar yapılmıştır (Şekil 9 b). Önceden şekil verilmiş lifli polimerler ve harç yardımıyla kesit-şekil değişikliği yapılan numunelerde aktif sargılamanın, kesit-şekil değişimi olmadan pasif sargılanan numunelere göre önemli derecede iyi davranış gösterdikleri belirlenmiştir. Kesit-şekil değişikliği yapılarak aktif sargılanan numunelerin, kare kesitten daire kesite dönüşümde daha fazla olmak üzere, kesit-şekil değişikliği yapıp pasif sargılanmış numunelere göre fark edilir derece daha iyi sonuçlara ulaştığı vurgulanmıştır. Takip edilen birim deformasyon değerleri için de benzer yönde sonuçlara ulaşılmıştır. Comert vd. (2009), dairesel numuneler üzerinde, genleşen harç kullanarak yaptığı lifli polimerler ile ard-germeli sargılama deneylerinde, diğer araştırmacıların elde ettiğinden farklı bir sonuca ulaşmıştır. Her iki sargılama tipinin kullanıldığı numunelerden elde edilen sonuçların, sargılanmamış numunelerden elde edilenden yüksek olduğu görülmekle birlikte, aktif sargılanmış numunelere ait davranışın, pasif sargılanmış numunelerden elde edilenden, kısmen aşağıda olduğu vurgulanmıştır. Ard-germeli sargılanmış numuneler, süneklik ve yük kapasitesi öncesindeki davranış açısından daha iyi performans sergilemişlerdir. Tamuzs vd. (2006) ve Janke vd. (2009)'nin yaptıkları çalışmalarda, beton silindir numuneler, gerilme uygulanmış lif öbekleri ile sargılanmış ve eksenel yükleme altında test etmiştir. Her iki çalışmada da sargılanmamış ve ya aynı malzemelerle pasif olarak sargılanmış numunelere göre daha iyi sonuçlar elde edildiği bildirilmektedir. Janke vd. (2009) bu gelişimin hem statik yükleme hem de tekrarlı yükleme altında elde edildiğini, ard-germeli sargılama sayesinde, kapasiteye ulaşıldıktan sonra kalan, artık dayanım değerinin belirli bir çevrim sayısını takiben stabil değere ulaştığını vurgulamıştır.

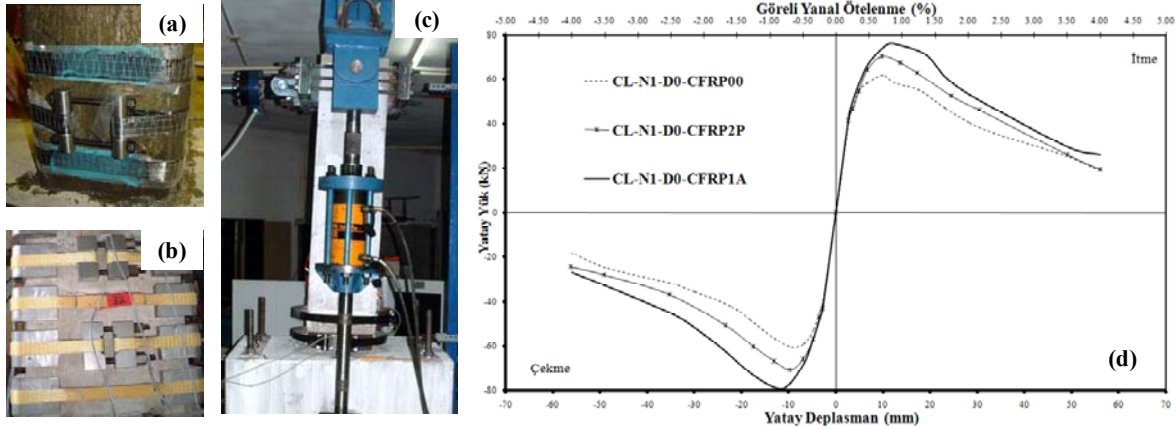


Şekil 9. Lifli polimerler ile çeşitli ard-germeli sargılama örnekleri

Lifli polimerler kullanılarak aktif sargılama uygulaması yapabilmek amacıyla, ergitme yapıştırması (fusion bonding) kullanılabilir. Lees vd (2002) ve Kesse ve Lees (2007) tarafından, kirişlerde lifli polimer malzeme kullanarak ard-germeli sargılama deneyleri bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 9 a). 1997'den bugüne yürütüldüğü bildirilen bu çalışmalarda, Şekil 9

a'da gösterilen biçimde lifli polimere ard-germe verilmektedir. Bu yöntemle, kesme geçmesi oluşan T kirişlerin kapasitesi, uygulama değişkenlerine bağlı olarak %40 ile %90 arasında arttırılabildiği, aynı zamanda geçmenin, gevrek olan kesme türünden, sünek olan eğilme türüne dönüştürülebildiği görülmektedir.

Ard-germeli lifli polimer sargılama oluşturabilmek için kullanılan ikinci yöntem ise mekanik germe tekniğidir. Bu teknik oldukça basit olup, kesit çevresini dönen lifli polimerlerin uçlarındaki metal kafaların, gijonlar ve tezgah anahtarları kullanılarak sıkılmasından ibarettir. Nesheli KN ve Meguro K (2005, 2006) tarafından, kesme etkin kısa kolonlar üzerinde, lifli polimerlerle ard-germeli sargılamanın etkilerini araştırılmıştır (Şekil 10 a ve b). Aramid ve karbon elyafların kullanıldığı çalışmada, hem aktif hem de pasif teknikle güçlendirilen kolonların, birbirlerine çok yakın değerlerle, daha sünek davrandıkları, yük kapasitelerinin referans numuneye göre arttığı belirtilmektedir. Öte yandan ard-germeli sargılamanın, çatlakların açılmasını yavaşlattığı ve deney sonu hasar seviyesinin daha az miktarda kalmasını sağladığı vurgulanmıştır. Yamakawa vd. (2005), yatay yük etkisine maruz kalan kısa kolonlarda, eksenel yükün sorunsuz olarak taşınabilmesi adına ard-germeli sargılama tekniğinden faydalanmıştır. Acil müdahale yöntemi olarak düşünülen, aramid liflerin kullanıldığı bu testler sonucunda, hasar görmüş kısa kolonlarda aktif sargılama ile kesme çatlaklarının kısmen kapatılabildiği, kesme dayanımının ve eksenel yük kapasitesinin belirli oranda geri kazanılabildiği ve oluşacak yeni bir etki altında basınç birim deformasyonlarının sınırlanabildiği görülmüştür.



Şekil 9. Lifli polimerler ile çeşitli ard-germeli sargılama örnekleri

Bu çalışmanın yazarlarından olan Akpınar (2010), Özden ile birlikte yapmış oldukları çalışmada, oldukça yetersiz (15Ø) donatı bindirme boyu olan eğilme etkin kolonlarda, lifli polimerlerle ard-germeli sargılamanın etkilerini araştırılmıştır. Çalışmada, lifli polimerlere ard-germe verebilmek için mekanik germe tekniği uygulanmış, aynı zamanda malzeme üzerinde oluşan gerilmenin kolon yüzlerine tam olarak etkiyebilmesi için dolgu parçaları kullanılmıştır (Şekil 10 c). Karbon liflerin kullanıldığı çalışmada, %25 eksenel yük altında her aktif ve pasif olarak güçlendirilmiş kolonların, orijinal numuneden daha iyi davranış sergiledikleri, 2 kat ve 2 şeritle ard-germeli sargılamanın, 3 kat pasif sargılamadan kısmen daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Buna rağmen tam olarak bindirme problemi çözülememiş olsa da, katman sayısının arttırılması ve değişik boylarda bindirme eklerinin incelenmesi adına uygun bir sonuç elde edilmiştir.

## SONUÇ

Betonarme elemanların, çeşitli malzemelerle ard-germeli sargılama tekniği kullanılarak güçlendirilmesi çalışmaları, derlenerek bir kaynaktan toplanmıştır. İncelenen tüm çalışmalar göz önüne alındığında, ard-germeli sargılama yöntemiyle hızlı ve yapı kullanımını en az düzeyde engelleyerek betonarme elemanların betonarme elemanların güçlendirilmesi gerçekleştirilebilmektedir. Ard-germeli sargılama yönteminin, diğer sargılama tekniklerine kıyasla dayanım açısından ilave büyük kazanımlar getirmediği; süneklik ve özellikle yük kapasitesine ulaşılmadan önceki davranışa olumlu etkisi görülmektedir. Buna göre ard-germeli sargılama ile güçlendirme durumunda, özellikle yük kapasitesi öncesinde ve kısmen sonrasında, pasif sargılama

tekniklerine oranla hasar seviyesinin daha az miktarda gerçekleşebileceği düşünülmektedir. Bu düşüncenin netleştirilebilmesi için, ard-germeli ve pasif sargılamının kullanıldığı, tam karşılaştırılabilir eşlenik numunelerle oluşturulmuş çalışmaların yapılması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- Aboutaha RS, Engelhardt MD, Jirsa JO, and Kreger ME (1999) “Experimental Investigation of Seismic Repair of Lap Splice Failures in Damaged Concrete Columns”, *Structural Journal ACI*, 96(2):297-307
- Akpınar E (2010) “Yetersiz Donatı Bindirme Boyu Bulunan Kolonların Aktif FRP Sargısı ile Güçlendirilmesi”, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye
- Andrawes B, Shin M and Wierschem N (2010) “Active Confinement of Reinforced Concrete Bridge Columns Using Shape Memory Alloys”, *Journal of Bridge Engineering ASCE*, 15(1):81-89
- Bakis CE, Bank LC, Brown VL, Cosenza E, Davalos JF, Lesko JJ, Machida A, Rizkalla SH and Triantafillou TC (2002) “Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review”, *Journal of Composites for Construction ASCE*, 6(2):73-87
- CEB Task Group of Commission 7 (Seismic Design) TG7\_1 (2003) State-of-the-Art report - Seismic Assessment and Retrofit of RC Buildings, Bulletin No 24, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne
- CEB Task Group 9\_3 (2001) Technical Report - Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Bulletin No 14, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne
- Cheong HK and Perry SH (1991) “Concrete Columns with Lateral Prestressing”, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 117(1):70-87
- Coffman HL, Marsh ML and Brown CB (1993) “Seismic Durability of Retrofitted Reinforced-Concrete Columns”, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 119(5):1643-1661
- Comert M, Goksu C and Ilki A (2009) “External Confinement of Concrete with Post-Tensioned GFRP Sheets-A Pilot Study”, *FRPRCS-9 International Symposium*, Sydney, Australia, 13-15 July
- Dolce M, Masi A, Cappa T, Nigro D, Ferrini M (2003) “Experimental evaluation of effectiveness of local strengthening on columns of R/C existing structures”, *FIB-Symposium, Concrete Structures in Earthquake Regions*, Athens, Greece, 6-9 May
- Ersoy U ve Özcebe G (2001) Betonarme, Geliştirilmiş Yeni Baskı, Evrim İstanbul
- Frangou M, Pilakoutas K and Dritsos S (1995) “Structural repair/strengthening of RC columns”, *Construction and Building Materials*, 9(5):259-266
- Gardner NJ, Godse RM and Wong TF (1992) “Laterally Prestressed Eccentrically Loaded Slender Columns”, *Structural Journal ACI*, 89(5):547-554
- Guo Z, Zhang J and Yun Z (2006) “Experimental Study On A New Retrofitted Scheme For Seismically Deficient Rc Columns”, *4th International Conference on Earthquake Engineering*, Taipei, Taiwan, 12-13 October
- Harries AK and Kharel G (2002) “Behavior and Modeling of Concrete Subject to Variable Confining Pressure”, *Materials Journal ACI*, 99(2):180-189
- Hussain MA and Driver RG (2005) “Experimental Investigation of External Confinement of Reinforced Concrete Columns by Hollow Structural Section Collars”, *Structural Journal ACI*, 102(2):242-251
- Imran I and Pantazopoulou SJ (1996) “Experimental Study of Plain Concrete under Triaxial Stress”, *Structural Journal ACI*, 93(6):589-601
- Janke L Czaderski C Motavalli M and Ruth J (2005) “Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas”, *Materials and Structures*, 38:578-592
- Janke L, Czaderski C, Ruthb J and Motavalli M (2009) “Experiments on the residual load-bearing capacity of prestressed confined concrete columns”, *Engineering Structures*, 31:2247–2256
- Kaya O (2003) “Seismic Retrofitting Of Existing R/C Columns For Improved Ductility”, MS Thesis, Bogazici University, Istanbul, Turkey
- Kesse G and Lees JM (2007) “Experimental Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Shear Straps”, *Journal of Composites for Construction ASCE*, 11(4):375-383
- Krstulovic-Opara N and Thiedeman PD (2000) “Active Confinement of Concrete Members with Self-Stressing Composites”, *Materials Journal ACI*, 97(3):297-308
- Laine DP (2004) Effect of axial preloads on confined concrete MS Thesis, University of Toronto, Toronto, Canada
- Lees JM Winistörfer AU and Meier U (2002) “External Prestressed Carbon Fiber-Reinforced Polymer Straps for Shear Enhancement of Concrete”, *Journal of Composites for Construction ASCE*, 6(4):249-256
- Park R and Paulay T (1975) Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons Inc, New York



- Priestley MJN, Seible F and Calvi GM (1996) Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons Inc, New York
- Mirmiran A and Shahawy M (1997) "Dilation characteristics of confined concrete", *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2, 237-249
- Mander JB, Priestley MJN and Park R (1988) "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 114(8):1804-1826
- Martin CW (1968) "Spirally Prestressed Concrete Cylinders", *Journal Proceedings, ACI*, 65(10):837-845
- Moghaddam H, Samadi M and Mohebbi S (2008) "On The Effect Of External Active Confinement On Spirally Reinforced Concrete Columns", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12-17 October
- Moghaddam H and Samadi M (2009) "Seismic Retrofit of large-scale reinforced concrete columns by prestressed high-strength metal strips", *ASCE/SEI Structures Congress*, Austin, Texas, USA, 30 - April - 2-May
- Moghaddam H, Samadi M, Pilakoutas K and Mohebbi S (2010) "Axial compressive behavior of concrete actively confined by metal strips; part A: experimental study", *Materials and Structures*, 43(10):1369-1381
- Mokari J and Moghadam AS (2008) "Experimental and Theoretical Study of Reinforced Concrete Columns with Poor Confinement Retrofitted by Thermal Post Tension Steel Jacketing", *Journal of Applied Sciences* 8(24):4579-4586
- Mortazavia AA, Pilakoutasa K and Son KS (2003) "RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP", *Construction and Building Materials*, 17:491-497
- Nesheli KN and Meguro K (2005) "External Prestressing Concrete Columns with Fibrous Composite Belts", *FRPRCS-7 International Symposium*, Kansas City, Missouri, USA, 6-9 November
- Nesheli KN and Meguro K (2006) "Seismic Retrofitting of Earthquake-Damaged Concrete Columns by Lateral Pre-Tensioning of FRP Belts", *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, 18-22 April
- Richart FE, Brandtzaeg A and Brown RL (1928) A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, University of Illinois, Bulletin No 12
- Richart FE, Brandtzaeg A and Brown RL (1929) The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression, University of Illinois, Bulletin No 31
- Saadatmanesh H, Ehsani MR and Jin L (1996) "Seismic Strengthening of Circular Bridge Pier Models with Fiber Composites", *Structural Journal ACI*, 93(6):639-647
- Saatcioglu M and Razvi SR (1992) "Strength and Ductility of Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 118(6):1590-1607
- Saatcioglu M, Yalcin C, Mes D and Beausejour P (2000) 'Seismic retrofitting concrete columns by external prestressing', OCEERC Research Report, Ottawa-Carleton Earthquake Engineering Research Centre, University of Ottawa, Ottawa, Canada
- Saatcioglu M and Yalcin C (2003) "External Prestressing Concrete Columns for Improved Seismic Shear Resistance", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 129(8):1057-1070
- Sakai K and Sheikh SA (1989) "What Do We Know about Confinement in Reinforcement Concrete Columns? (A Critical Review of Previous Work and Code Provisions)", *Structural Journal ACI*, 86(2):192-207
- Scott NL (2004) "Reflections on the early precast/prestressed concrete industry in America", *PCI Journal*, 49(2):20-33
- Sheikh SA and Uzumeri SM (1980) "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns", *Journal of the Structural Division ASCE*, 106(5):1079-1102
- Shin M and Andrawes B (2010) "Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys", *Engineering Structures*, 32:656-664
- Tamuzs V, Tepfers R, You CS, Rousakis T, Repelis I, Skruls V and Vilks U (2006) "Behavior of Concrete Cylinders Confined by Carbon-Composite Tapes and Prestressed Yarns 1 - Experimental Data", *Mechanics of Composite Materials*, 42(1):13-32
- Yamakawa T, Banazadeh M and Fujikawa S (2005) "Emergency Retrofit of Shear Damaged Extremely Short RC Columns Using Pre-tensioned Aramid Fiber Belts", *Journal of Advanced Concrete Technology JCI*, 3(1):95-106
- Yan Z, Pantelides CP, and Reaveley LD (2007) "Posttensioned FRP Composite Shells for Concrete Confinement", *Journal of Composites for Construction*, 11(1):81-90
- Yarandi M and Saatcioglu M (2008) "Rapid Seismic Repair of Shear Damaged Concrete Bridge Columns by Transverse Prestressing", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12-17 October