

# EKSENEL YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ KARE KESİTLİ MANTOLANMIŞ KOLONUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

**Alper BÜYÜKKARAGÖZ ve Yağmur KOPRAMAN**

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara  
[akaragoz09@yahoo.com](mailto:akaragoz09@yahoo.com), [yagmur@gazi.edu.tr](mailto:yagmur@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 21.05.2007; Kabul/Accepted: 22.03.2008)

## ÖZET

Eksenel yük altındaki betonarme kolonların onarılması ve güçlendirilmesinde mantolama sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik gerek ülkemizde ve gerekse de teknoloji bakımından gelişmiş olan ülkelerde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Dört kenarından kesitleri büyütülmüş (mantolanmış) kare kesitli bir kolon laboratuvar ortamında eksenel yük altında yüklenerek test edilmiş ve elde edilen sonuçlar ANSYS® sonlu elemanlar programıyla modellenmiş olan kolondan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile hazırlanan bilgisayar modeli sonuçları karşılaştırılarak, bilgisayar modeli sonuçlarının gerçek davranışa yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme kolon, eksenel yük, sonlu elemanlar yöntemi, ANSYS®.

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF JACKETED SQUARE CROSS SECTIONAL COLUMN UNDER AXIAL LOAD

### ABSTRACT

Jacketing is the most popular method in the rehabilitation of the reinforced concrete columns under axial loading. Not only in Turkey, but also in the other technologically developed countries, this technique is widespread used. A square cross-sectioned column enlarged by four sides (jacketed) was tested under axial load in the laboratory and the achieved results were compared with the results obtained from the column which was modelled by ANSYS® finite element program. By comparing the experimental results with the prepared computer model results, it was shown that computer model results were similar to real behaviour.

**Keywords:** Reinforced column, axial load, finite element method, ANSYS®.

### 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme için hesap yöntemlerinin gelişmesi ve davranışın gerek analitik hesap yöntemleriyle hesaplanarak gerekse bilgisayar ortamında model oluşturularak çözümlenmesi son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonarme bir elemanın davranışı genelde laboratuvar ortamında deney yaparak gözlenmektedir. Fakat bu işlem oldukça zaman almaktadır. Deneylerin yapılması için uygun koşulların sağlanması ve malzeme temininde yaşanan sıkıntılar, belli boyut ve sayıdaki elemana göre oluşturulan malzemelerin kullanımının sınırlı olması nedeniyle çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bütün bu işlemlerin hiçbir sınırlama olmadan bilgisayar

ortamında modellenmesi, kullanılan bilgisayarın kapasitesi el verdiği ölçüde genişler. Bilgisayarla modelleme yaparken kullanılan malzemelerin özellikleri ve sınır şartları doğru ve eksiksiz tanımlanmalıdır. Bilgisayar yazılımları henüz tam olarak deneysel çalışmaların yerini tutmasalar da büyük kolaylıklar sağlamakta ve tasarım aşamasına yön vermektedirler.

Bu çalışma için ANSYS® sonlu elemanlar programı seçilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi mühendislerin karşılaştığı karmaşık ve zor fiziksel problemleri kabul edilebilir bir yaklaşımla çözebilen sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS® programı, 1971 yılından günümüze

kendisine giderek daha büyük bir uygulama alanı bulacak şekilde geliştirilmiştir [1].

Beton, yükleme esnasında doğrusal davranış göstermeyen bir malzeme olduğundan, ANSYS® sonlu elemanlar programıyla beton, doğrusal olmayan davranış gösterecek şekilde modellenmiştir [2-13].

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı mühendislik dallarınca, gerilme analizi gibi özel analizler gerektiren mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan nümerik bir metottür. Sonlu elemanlar yönteminin ilk kullanımı 1900'lü yıllara dayanır. 1950'lerde Boeing'in uçak kanatlarında bu yöntemi kullanmasından sonra 1960'lı yıllarda diğer mühendislik dallarınca da benimsenmiştir. Bütünüyle sonlu elemanlar yöntemini anlatan ilk kitap 1967 yılında Zienkiewicz ve Cheung tarafından yayınlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan ANSYS® paket programı ilk kez 1971 yılında geliştirildikten sonra 30 yılı aşkın süredir bu yöntem ile analizler yapılmaktadır.

Literatürde ANSYS® ile betonarme modellemesi yapılmış belirli sayıda çalışma mevcuttur [2-12]. Bunlardan ilki, betonarme yapı elemanlarının ANSYS® Sonlu Elemanlar Programı'nda nonlineer modellenmesi konusunu işleyen Antonio F. Barbosa ve Gabriel O. Riberio'nun çalışmasıdır. Bu çalışmada, aynı kiriş için iki farklı modelleme yapılmıştır. Modellemesi yapılan deney elemanı; 4.0 m açıklıklı, 200x350 mm kesitinde, düzgün yayılı yüklerle yüklenmiş basit mesnetli bir kiriştir. Donatı olarak yalnız 11.42 cm<sup>2</sup> alanlı çekme donatısı kullanılmıştır. Her iki modellemede de boyuna ve enine simetriden dolayı kiriş geometrisinin ¼'ü modellenmiştir [3].

Birinci modelde beton solid65 elemanı ile tanımlanırken, donatı için link8 çubuk elemanları kullanılmış (ayrık donatı), ikinci modelde ise donatılar solid65 elemanlarının bünyesinde hacimsel oranlarla tanımlanmıştır (gizli donatı). Her iki model de dört kere analiz edilmiştir. Beton için her analizde farklı malzeme modelleri oluşturulmuş (ezilmeli lineer elastik, elastik tam plastik (Drucker-Prager), ezilme ihmal multilinear pekleşmeli (Von Mises) ve ezilmeli multilinear pekleşmeli), donatı için ise iki model kullanılmıştır (lineer elastik, elastik-tam plastik).

Bütün analizlerde yük-deplasman eğrileri düşük yüklemelerde birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Başlangıçtaki lineer ilişki, betonda çatlama başlayınca ani bir rijitlik kaybı gösterip devamında yine yaklaşık lineer olarak devam etmiştir. Modeller arasındaki fark asıl servis yüklerinden sonra oluşmuştur. Lineer elastik modeller kısa zamanda göçmeye ulaşmış ve bir çözüm elde edilememiştir. En iyi sonuçlar ayrık donatılı modellemede, elastoplastik

malzeme modelinin ve özellikle ezilmenin ihmal edildiği multilinear pekleşmeli modellerden elde edilmiştir.

P. Fanning 2001 yılında yaptığı çalışmada [5] biri 3.0 m açıklıklı klasik, diğeri 9.0 m açıklıklı ön gerilmeli iki ayrık donatılı kirişi ANSYS® Sonlu Elemanlar Programı'nda modellemiş ve bulunan sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Beton için Solid65, çelik ve ön germe kabloları için Link8 elemanları kullanılmış, beton ve çeliğin birim uzamaları aynı kabul edilmiştir. Klasik kiriş, yakınsamayı kolaylaştırma ve deney elemanlarıyla uyum sağlayabilme amacıyla deplasman kontrollü yüklenmiştir. 9.0 m'lik kirişi ön gerilmeli olarak tanımlamak için ise girilen ön gerilme kablolarına (Link8 elemanları) başlangıç şekil değiştirmesi verilmiştir. ANSYS®'in betonun nonlineer davranışını modellerken yaptığı kabulde, kullandığı elemanlar ve özellikle betonun içinde tanımlanan gizli çatlak modelinin gerçeğe ne kadar uyduğunu belirlemek için yapılmış bu çalışmadan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İlk çatlığa kadar lineer devam eden yük-deplasman eğrisi, yaklaşık 17 kN'da ilk çatlak görüldükten sonra daha düşük bir rijitlikle deney sonuçlarıyla uyumlu bir biçimde devam etmiştir. Ancak, deneyden elde edilen maksimum kiriş orta nokta deplasmanı 45 mm iken, modelden elde edilen deplasman 27 mm'yi geçememiştir. Art germeli 9.0 m'lik kirişte ise sonlu eleman modeliyle bulunan göçme yükü, deneyden elde edilen göçme yükünden %12 daha düşük bulunmuştur.

Arnesen, Sorensen ve Bergan'ın çalışmasında iki program geliştirilmiştir. Birincisinde düzlem gerilme problemi ele alınmış ve plastisite teorisi kullanılmıştır. Bu programda iki boyutlu bir kiriş analiz edilmiştir. Bu kirişin dataları da Bresler-Scordelis kirişinden alınmıştır. Betonun modellenmesinde iki boyutlu dört düğüm noktalı düzlem elemanlar, donatı için ise iki düğüm noktalı çubuk elemanlar kullanılmıştır. Basınç altında beton malzemesinin davranışı Von Mises elipsiyle belirlenen elastik orantılılık sınırına kadar lineer elastik, ondan sonra da lineer pekleşmeli plastik olarak, donatı davranışı ise akma noktasından sonra pekleşmeli plastik olarak tanımlanmıştır [6].

Hemmaty, De Roeck ve Vandewalle ise betonarme elemanların modellenmesinde, beton ile donatı arasında deneysel çalışmalara dayalı bir nonlineer aderans-kayma kanununu hesaba katmışlardır. Aderans-kayma ilişkisini modellerken malzeme modellerinden de yararlanılabileceğini belirtip (azaltılmış çekme ve basınç dayanımlı beton malzemesi ile) asıl modellemeyi COMBIN39 spring (yay) elemanlarla yapmışlardır. Sonuç olarak ANSYS®'de spring elemanı için tanımlanan dört farklı malzeme modelinden elde edilen çatlak

sonuçları, çekme deneyi uygulanan numunelerdeki çatlaklarla karşılaştırılmış ve betonarme uygun aderans kayma kanunları kullanılarak donatı aderansının gerçekçi bir şekilde modellenebileceği belirtilmiştir [7].

İnşaat mühendisliği alanında yeni yeni kullanılmaya başlayan ANSYS® programıyla kare kesitli mantolanmış kolonun analizi ilk kez yapılmıştır. Bu çalışmanın, bundan sonra yapılacak olan çalışmalara yol gösterici bir çalışma olacağı düşünülmektedir.

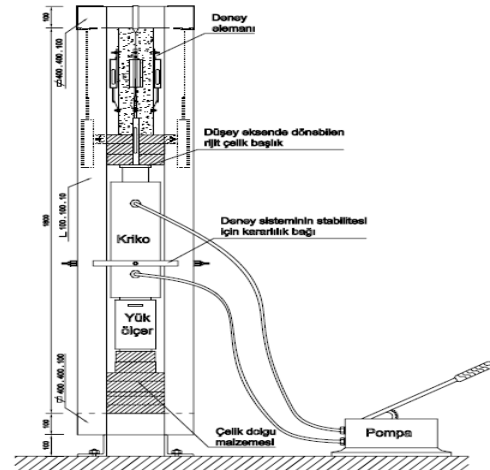
Bu çalışmada ANSYS® programıyla beton modellemesi için SOLID65 elemanı seçilmiş ve elde edilen sonuçlar deneyden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Donatı tanımlama yöntemi olarak ayrık modelleme tekniği kullanılmıştır. Literatürde donatı modellemesi genellikle dağınık ve ayrık olarak tanımlanmaktadır. Dağınık modellemede SOLID65 elemanı içinde donatı yüzdesel olarak tanımlanırken, ayrık modellemede ise donatı sonlu alanları oluşturan noktalardan, eleman tanımlaması yapılarak oluşturulmaktadır [3].

Bu çalışmada seçilen, eksenel yükleme altındaki kare kesitli kolondan elde edilen yük-birim deformasyon eğrisinin, ANSYS® programıyla modellenmiş olan elemandan elde edilebilmesi için gerekli adımlar belirlenmiştir. Betonun doğrusal olmayan davranışı gösterebilmesi için Hognestad beton modelinden elde edilen gerilme-birim deformasyon değerleri hesaplanarak veri olarak programda girilmiştir. Donatı içinde elastik-tam plastik malzeme modelinde donatı için elastisite modülü, poisson oranı, akma dayanımı ve tangent modülü tanımlanarak veri olarak girilmiştir.

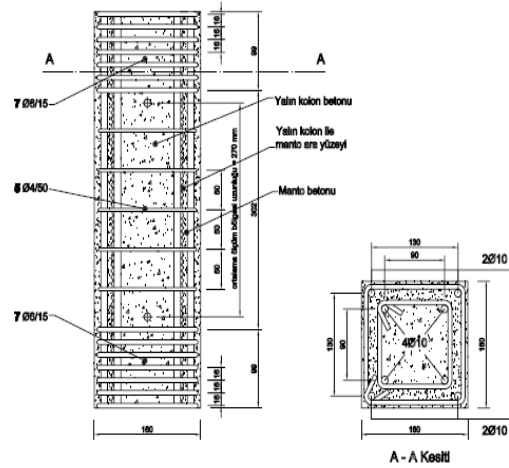
## 2. MODELİN DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS OF MODELLED RC COLUMN)

Çalışmada modelin yapılacağı deney elemanı olarak eksenel yükleme altındaki mantolanmış kare kesitli kolon seçilmiştir [14]. Kare kesitli betonarme kolonun yük düzeneği Şekil 1'de, donatı detayı ise Şekil 2'de verilmiştir. Deney elemanı önce yalın kolon olarak donatılandırılmış ve ardından betonu dökülmüş, sonra manto katmanı donatılandırılarak manto katmanı betonu dökülmüştür.

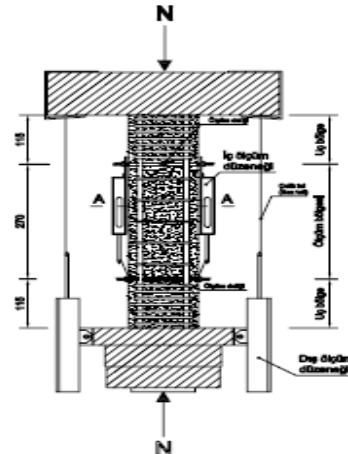
Kolon deney elemanı, Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yer alan 2m yüksekliğindeki, eksenel yük uygulanmasına imkan verecek şekilde tasarlanmış olan çelik bir çerçeve içerisinde test edilmiştir. Deney sırasında 2000 kN basınç kapasiteli hidrolik bir kriko ile yükleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar 2000 kN basınç kapasiteli bir yük ölçer ile bilgisayara kaydedilmiştir. Deney ve ölçüm düzeneği Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 1. Kolon yük düzeneği (Load setup of column)



Şekil 2. Kolon donatı detayı (Reinforcement detail of column)



Şekil 3. Kolon deney ve ölçüm düzeneği (Test setup and instrumentation of column)

Deney elemanında deformasyon ölçümleri için dört adedi elemanın ölçüm bölgesi içerisinde, eleman yüzünden deformasyon okuyan, diğer dört tanesi de elemanın alt ve üstünde bulunan iki rijit çelik plaka arasında dıştan yerleştirilmiş 100 mm'lik ölçme

kapasitesine sahip LVDT'den oluşan toplam sekiz adet LVDT kullanılmıştır.

### 3. MODEL İÇİN MALZEME ÖZELLİKLERİ (MATERIAL PROPERTIES FOR THE MODEL)

Deney elemanının malzeme özelliklerinin oluşturulan bilgisayar modeline aktarılması için kullanılan malzeme modelleri bu bölümde verilmiştir. Beton ve donatının malzeme özellikleri tanımlanarak modelde veri olarak girilmiştir. Malzeme özelliklerini tanımlamak için aşağıda verilen bazı kriterler esas alınmıştır:

- Donatı çeliği ayrı olarak, oluşturulan küçük alanlardaki noktalar arasından eleman tanımlayarak modellenmiştir.
- Beton ve çelik arasında birim şekil değiştirme oranı eşit varsayılmış yani beton ve çelik arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle beton ve çelik arasında ayrıca yay gibi bir aderans elemanı tanımlanmamıştır.

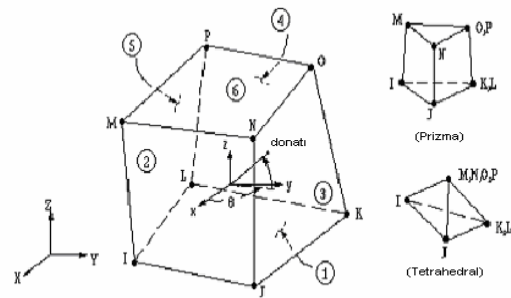
Çalışmada sargısız betonlar için geliştirilmiş Hognestad beton modeli kullanılmıştır [15]. Hognestad modelinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi betonun doğrusallığının sınırını ve plastik davranışını belirlemede kullanılacak olan Multilineer İzotropik Pekleşmeli Plastisite (Von Mises) modelinde tanımlanmıştır.

Betonun göçme şeklini tanımlamak için Willam-Warnke modeli kullanılmıştır. ANSYS® Sonlu Elemanlar programı'nda betonun üç eksenli gerilme altında göçme yüzeyini modellemek için Willam ve Warnke'nin beton için geliştirdiği model kullanılmaktadır [16]. Çelik, betondan daha kolay ve gerçeğe yakın tanımlanabilir homojen ve izotrop bir malzemedir. Özellikleri beton gibi çevre koşullarına ve zamana bağlı değildir. Bu çalışmada çeliğin davranışı idealize edilmiş, çelik malzemesi Von Mises akma kriterini esas alan lineer elastik-tam plastik (Bilineer izotropik pekleşmeli plastisite) olarak tanımlanmıştır.

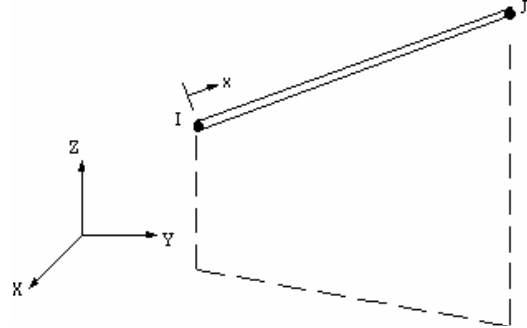
### 4. ANSYS® SONLU ELEMAN MODELİ (ANSYS® FINITE ELEMENT SOFTWARE MODEL)

ANSYS® Sonlu Elemanlar Programı, doğrusal olmayan problemlerin çözümü için Newton-Raphson metodunu kullanır. Newton – Raphson metodunda üç yaklaşım vardır. ANSYS® Sonlu Eleman Programı'nda analiz için istenilen yaklaşım seçilebileceği gibi programa otomatik tercih de ettirilebilir. ANSYS® Sonlu Elemanlar Programı'nda Solid65 eleman tipi için Başlangıç Rijitlik (Initial Stiffness) seçeneği kullanılmaktadır. Başlangıç Rijitlik (Initial Stiffness) yaklaşımında her iterasyonda başlangıç elastik rijitlik değeri kullanılır.

Betonarme kolon modelinde beton modeli için Solid65 elemanı kullanılmıştır. Solid65, çekmede çatlama, basınçta ezilme, plastik deformasyon ve sünme özelliklerini barındıran 8 düğüm noktalı solid elemandır (Şekil 4). Her düğüm noktasında x, y ve z yönlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesine sahiptir. Donatısız olarak kullanılabileceği gibi, bünyesinde üç farklı malzeme ve kesit özellikli donatı tanımlanabilir. Donatı tanımlamak için ise yine ANSYS® Sonlu Elemanlar Programının bünyesinde yer alan Link8 iki düğüm noktalı çubuk elemanı kullanılmıştır (Şekil 5). Link8 elemanının da her bir düğüm noktasında x, y, z yönlerinde üç ötelenme serbestlik derecesi vardır. Tek eksenli çekme ve basınç elemanıdır, eğilme hesaba katılmaz.



Şekil 4. Solid 65 elemanı (Solid 65 element)



Şekil 5. Link 8 elemanı (Link 8 element)

2 etriye ve 1 boyuna donatı olmak üzere toplam 3 farklı özellikteki donatı için tanımlanan malzeme katsayıları özellikleri (Real constant set of Link8) Tablo 1'de verilmiştir.

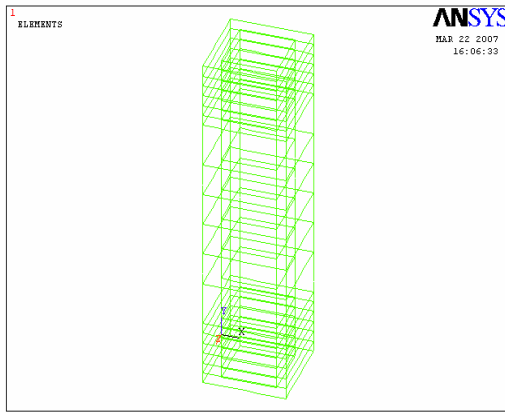
Deney elemanında kullanılan donatılar ve etriyeler ayrı (discrete) yöntemiyle, betonu oluşturan sonlu alan noktalarından eleman tanımlaması yapılarak modellenmiştir. Modelenmiş olan donatı ve etriyelerin modeldeki görünümü Şekil 6'da verilmiştir.

500 mm boyunda ve 160 mm × 160 mm kesite sahip olan kolon toplam 2180 adet dikdörtgen prizması şeklinde sonlu alanlara ayrılmıştır. Deney elemanının en üst yüzeyinden bütün yüzeyi kaplayacak şekilde basınç uygulanarak elemana yük etkilenmiştir. Kolon

**Tablo 1** Link 8 malzeme katsayıları özellikleri (Real constant set of Link 8)

Real Constant Numarası	Eleman Tipi	Donatı Çapı ve Özelliği	Donatı Alanı ( $mm^2$ )
2	Link8	$\phi 10$ Boyuna Donatı	79
3	Link8	$\phi 4$ Etriye	13
4	Link8	$\phi 6$ Etriye	29

en alt kısmında bulunun sonlu alanları oluşturan noktalardan ankastre olarak mesnetlenmiştir. Şekil 7'de modellenmiş olan kolonun mesnetleri ve etkiyen yükler görülmektedir.

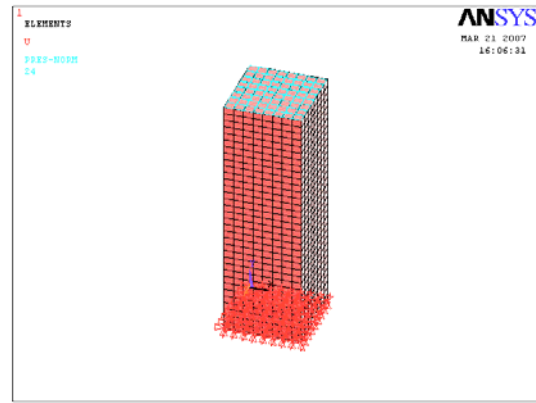
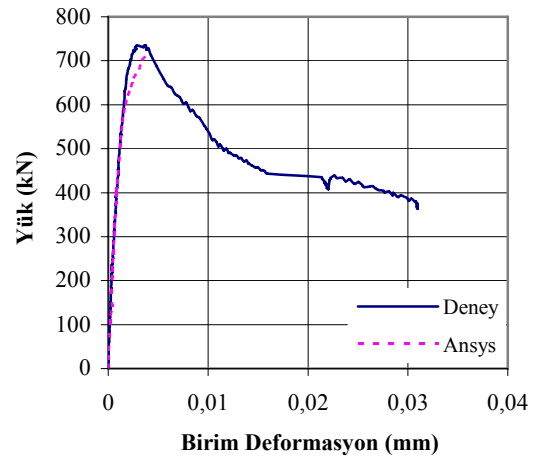
**Şekil 6.** Donatı ve etriyelerin model görünümü (The model appearance of reinforcement)

Tablo 2'de beton ve donatı malzemelerinin ANSYS® Sonlu Elemanlar Programında tanımlanmış malzeme özellikleri verilmiştir. Beton için tanımlanmış Lineer Isotropik Pekleşmeli başlığı altında betonun Elastisite modülü ve Poisson oranları tanımlanmıştır. Multilineer Isotropik pekleşmeli başlığı altında beton için tanımlanmış gerilme-birim deformasyon ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) değerleri tanımlanmıştır. Beton başlığı altında ise açık ve kapalı çatlak kesme transfer katsayıları ve betonun çekme dayanımı tanımlanmıştır.

Donatı için; Lineer Isotropik başlığı altında Elastisite Modülü ve Poisson Oranları, Bilineer Isotropik Pekleşmeli başlığı altında ise donatının akma dayanımı ve Tangent Modülü tanımlanmıştır.

## 5. DENEY SONUÇLARININ VE SONLU ELEMAN ANALİZİNİN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF EXPERIMENTAL RESULTS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS)

Deney sonuçlarıyla sonlu eleman analizinden elde edilen yük-birim deformasyon diyagramı Şekil 8'de verilmiştir. Elde edilen diyagram incelendiğinde davranış açısından birbirine oldukça benzeyen iki diyagram elde edilmiştir. Deney elemanında, artan eksenel yük etkisiyle maksimum yük değerine ulaştıktan sonra kabuk betonun dökülmesi ve kolonun taşıma gücüne ulaşması sonucunda yükte düşme meydana gelmiş daha sonra etriyenin sargılama etkisi sonucunda yükün bir miktar yataya yakın seyretmesi sonucunda kolon tamamen göçmüştür. Sonlu eleman analizinden elde edilen davranışta ise adım adım etkilenen basınç yüklemesi sonucunda maksimum basınç yüküne ulaştıktan sonra y eksenini doğrultusundaki birim deformasyon çok büyümüş ve eleman göçmüştür. Sonlu eleman analizinden elde edilen göçme anındaki çatlak ve gerilme dağılımları Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir

**Şekil 7.** Model yükleme ve mesnetlenme (Loading and boundary conditions of model)**Şekil 8.** Deneysel ve analitik yük-deplasman grafikleri (Experimental and analytical load-displacement curves)

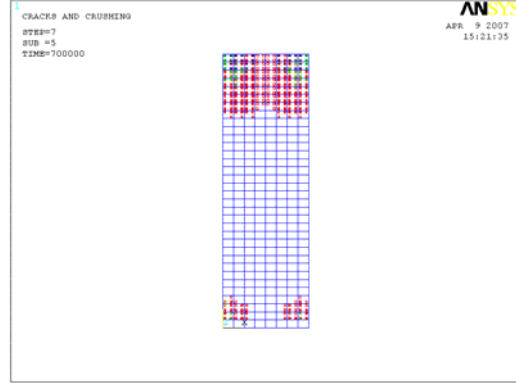
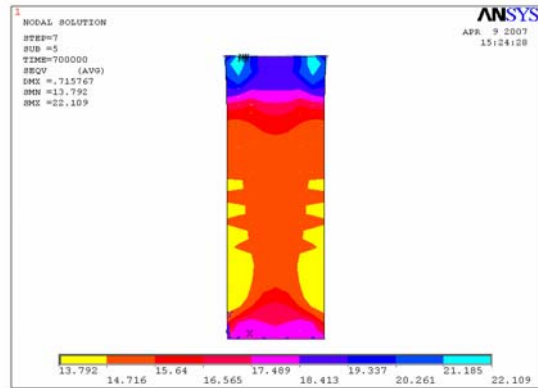
**Tablo 2.** Malzeme özellikleri (Material properties)

Malzeme No.	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri		
1	Solid6 5	<b>Lineer Isotropik Pekleşmeli</b>		
		EX(M)	19150	
		PRXY	0,3	
		<b>Multilineer Isotropik</b>		
			Şeki	Gerilme
		1.Nokt	0,00	4
		2.Nokt	0,00	8
		3.Nokt	0,00	12
		4.Nokt	0,00	16
		5.Nokt	0,00	18,8
		<b>Beton</b>		
		ShrCf-	1	
		ShrCf-	1	
		UnTen	1,58	
		UnCo	-1	
		BiCom	0	
		Hydro	0	
BiCom	0			
UnTen	0			
TenCr	0			
2	Link8	<b>Lineer Isotropik</b>		
		EX	2,0E+5	
		PRXY	0,3	
		<b>Bilinear Isotropik</b>		
		fy	450	
Tan.M	20			
3	Link8	<b>Lineer Isotropik</b>		
		EX	2,0E+5	
		PRXY	0,3	
		<b>Bilinear Isotropik</b>		
		fy	362	
Tan.M	20			
4	Link8	<b>Lineer Isotropik</b>		
		EX	2,0E+5	
		PRXY	0,3	
		<b>Bilinear Isotropik</b>		
		fy	365	
Tan.M	20			

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Eksenel yük etkisi altındaki kare kesitli bir kolonun deneysel davranışından elde edilen sonuçlar, ANSYS® Sonlu Elemanlar Programından oluşturulmuş modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların birbirine

olduğu yakın olduğu görülmüş, ancak deney elemanı, sonlu eleman modelinden elde edilmiş modele göre daha rijit ve daha sünek bir davranış göstermiştir. Tablo 3'de deney ve model sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney elemanı ile uyumlu bir sonuç elde edilmiştir. Deney elemanı ile model elemanından elde edilen sonuçların farklı çıkmasının muhtemel sebepleri aşağıda belirtilmiştir.

**Şekil 9.** Göçme anındaki çatlak dağılımı (Crack pattern at failure)**Şekil 10.** Göçme anındaki gerilme dağılımı (Stress distribution at failure)**Tablo 3.** Deney ve model sonuçları (Experimental and model results)

	Deney Kolonu	Model Kolonu	Fark
Maksimum Yük (kN)	734	720	%2
Maksimum Yükte Birim Deformasyon (mm)	0,0038	0,0042	%10

- Beton malzeme özelliği gereği her doğrultuda aynı malzeme özelliğini göstermeyip heterojen bir özelliğe sahiptir. Sonlu eleman modelinde ise malzeme özelliği tanımlanırken betonun her doğrultuda homojen bir karışıma sahip olduğu kabul edilerek modelleme yapılmıştır.
- Modelde yükleme yüzeyinin pürüzsüz ve kusursuz olduğu düşünülerek tam eksenel yükleme yapılabilenken deney elemanındaki yüzey pürüzlülüğü nedeniyle tam eksenel yükleme yapılamamaktadır.
- Model oluşturulduktan sonra mesnetler, sonlu alanları oluşturan her noktadan son derece düzgün bir şekilde tanımlanmaktadır. Deneyde ise kullanılan yükleme düzeneğindeki kusurlar, mesnetlenme durumunu etkilemektedir.
- Betonun gerilme-birim deformasyon davranışı Hognestad beton modelinde tanımlanan formüller kullanılarak elde edilmiştir. Deneyde ise kullanılan betonun özellikleri gerilme-birim deformasyon değerini etkilemektedir.
- Model oluşturulurken betonu oluşturan Solid 65 elemanı daha fazla sayıda elemana bölünerek daha hassas çözümleme yapılabilir. Bunun için daha kapasiteli bilgisayarlar kullanılabilir.

Mantolama yöntemiyle güçlendirilmiş kolonun nasıl bir davranış göstereceği genelde laboratuvar ortamında deney yapılarak gözlenmektedir. Fakat bu işlem oldukça zaman almaktadır. Deneylerin yapılması için uygun koşulların sağlanması ve malzeme temininde yaşanan sıkıntılar, belli boyut ve sayıdaki elemana göre oluşturulan malzemelerin kullanımının sınırlı olması nedeniyle çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bütün bu işlemlerin hiçbir sınırlama olmadan bilgisayar ortamında hızlı bir şekilde modellenmesi, kullanılan bilgisayarın kapasitesi el verdiği ölçüde geniştir. ANSYS® Sonlu Elemanlar Programından elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu da göstermektedir ki, ANSYS® Sonlu Elemanlar Programıyla yapılan modellemeler literatürde de kabul gördüğü gibi [2-14] güvenilir sonuçlar vermektedir. ANSYS® Sonlu Elemanlar Programıyla yapılan modellemeler, deney elemanı tasarım aşamasında yapılabilecek tasarım hatalarının ve yanlış malzeme seçimlerinin önüne geçilmesi açısından hem maddi hem de zamandan tasarruf edilmesini sağlayacak, yapılacak olan deneysel çalışmalara yol gösterici olacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lawrence, K. L., "ANSYS Tutorial Release 7.0 and 6.1", **SDC Publications**, Canonsburg, 1.1-2.25, 2002.
2. Wolanski, A. J., "Flexural Behaviour of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis", **Degree of Master of Science, Faculty of Graduate School, Marquette University**, Wisconsin, 1-48, 2004.
3. Barbosa, A., F., Riberio, G., O., **Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model**, Computational Mechanics, New Trends and Application, CIMNE, Barcelona, Spain, 1998.
4. Kachlakev, D., Miller, T., "Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates", **Final Report**, Oregon, SPR 316, 2001.
5. Fanning, P., "Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams", **Electronic Journal of Structural Engineering**, 2, 111-119, 2001.
6. Kwak, H. G. and Filippou, F. C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Under Monotonic Loads", **UCB/SEMM-90/14**, California, 13-37, 1990.
7. Hemmaty Y., De Roeck G., Vandewalle L., "Finite Element Modelling of Corner Joints in Reinforced Concrete Frames", **International Conference Concrete 2000, Economic and Durable Construction Through Excellence**, University of Dundee, Concrete Technology Unit, Dundee, UK, 465-472, 1993.
8. Arnesen, A., Sorensen, S. I. and Bergan, P. G., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete", **Computers and Structures**, 12, 571-579, 1979.
9. Ashour, A. F., Morley, C. T., "Three Dimensional Nonlinear Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures", **Finite Elements in Analysis and Design**, 15, 43-55, 1993.
10. Bergan, P. G., Holand, I., "Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures", **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 17, 443-467, 1979.
11. Chan, H. C., Cheung, Y. K. And Huang, Y.P., "Nonlinear Modelling of Reinforced Concrete structures", **Computers&Structures**, 53 (5), 1099-1107, 1994.
12. Anıl, Ö., Belgin, Ç., "Monotonik Yükleme Etkisi Altındaki Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Doğrusal Olmayan Analizi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 22, (1), sf. 191-197, 2007.
13. Büyükkaragöz, A., Doğan, O., "Çift Cidarlı Kompozit Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi", **Pamukkale Üniv. Müh. Bil.Der.**, 13, (1), sf. 39-45, 2007.
14. Koprman, Y., **Onarılmış ve Güçlendirilmiş Betonarme Kolonlarda Manto Alanının Davranışa Etkisi**, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 170 sf., 2003.
15. Ersoy, U., Özcebe, G., **Betonarme**, Evrim Yayınevi, İstanbul, 59, 2001.
16. William, K., J., Warnke, E., P., "Constitutive Model for the Tri-axial Behaviour of Concrete", **IABSE**, Report No.19, Bergamo, 1-30, 1974.