

MONOTONİK YÜKLEME ETKİSİ ALTINDAKİ DİKDÖRTGEN KESİTLİ BETONARME KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Özgür ANIL ve M. Çağatay BELGİN

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara
oanil@gazi.edu.tr , cmbelgin@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 30.01.2006; Kabul/Accepted: 27.07.2006)

ÖZET

Günümüzde çok yaygın bir kullanım alanına sahip betonarme eleman ve yapıların, kesit tesiri, gerilme ve deformasyon davranışlarının elde edilebilmesi laboratuvar koşullarında model deneylerinin yapılması ya da modelin bilgisayar ortamında analiz edilmesi ile mümkün olabilmektedir. Deneysel çalışma, elemanın büyüklüğü, mesnetlenme şartları, yükleme durumu gibi bir çok etkenin deney düzeneğine yansıtılabilmesi yönüyle oldukça maliyetli ve uzun zaman alan bir seçenektir. Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli, basit mesnetli betonarme bir kirişin doğrusal olmayan sonlu eleman analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bilgisayar modellemesinde ANSYS® yazılımı kullanılmıştır. Deney sonuçları ile bilgisayar modeli karşılaştırılarak gerçek davranışa yakın sonuçlar veren bir bilgisayar modeli oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, sonlu elemanlar yöntemi, doğrusal olmayan analiz, ANSYS®.

NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RECTANGULAR CROSS SECTIONAL BEAM UNDER MONOTONIC LOADING

ABSTRACT

Two alternative methods exists for the nonlinear analysis of reinforced concrete members that are widely used in today's construction industry, namely, having a laboratory testing of sample members and analysis by developing computer simulation models. Laboratory testing is limited, often costly, and took long times considering the member sizes, support conditions, loading etc. This study aims to compare the actual laboratory test results of simply supported beams having rectangular cross-section subjected to monotonic loading with the results of the nonlinear finite element model developed for ANSYS structural analysis software. Thus, a computer model that can best represent the actual behavior tried to be achieved.

Keywords: Reinforced concrete beams, finite element methods, nonlinear analysis, ANSYS®.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme, 19. yy'ın ikinci yarısından itibaren, tüm dünyada en çok tercih edilen yapı malzemesi olmuştur. Bunun nedeni, betonarmenin yüksek dayanımı, güvenilirliliği, diğer malzemelere göre maliyetinin düşük olması ve yapım kolaylığı olarak sıralanabilir. 1855'te patenti alındıktan sonra hızla yaygınlaşmaya başlayan betonarme için hesap yöntemleri geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar yine bu dönemde başlamıştır. Ancak beton, davranışı zamana ve yük geçmişiine bağlı, elastik olmayan heterojen ve anizotrop bir malzemedir.

Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışını araştırmak için laboratuvarlarda model deneylerinin yapılması veya bilgisayar simülasyon tekniklerinin kul-

lanılması gereklidir. Deneysel çalışmalar gerçekçi sonuçlar vermekle birlikte betonarme elemanın büyüklüğü, boyutları, şekli, yükleme ve mesnetlenme koşullarıyla sınırlı kalmaktadır. Ayrıca, deneysel çalışmalar uzun zamana ihtiyaç duyulan, maliyeti yüksek ve laboratuvar olanakları ile çok yakından ilişkili çalışmalardır. Bunun yanında araştırılmak istenen betonarme yapı ya da eleman, bahsedilen sınırlamalar olmadan bilgisayar ortamında modellenebilir. Bilgisayarda oluşturulan modelin doğruluğunun büyük ölçüde malzeme varsayımlarına, modelin ve mesnetlenme şartlarının gerçeğe uygun olmasına bağlı olduğu unutulmamalıdır. Bilgisayar yazılımları henüz tam olarak deneysel çalışmaların yerini tutmasalar da büyük kolaylıklar sağlamakta ve tasarım aşamasına yön vermektedirler. Bu çalışmada, modelleme ve analizin gerçekleştirileceği bilgisayar

programı olarak dünyada değişik mühendislik dallarınca yaygın şekilde kullanılan ve ülkemizde de son zamanlarda sıkça adını duyduğumuz ANSYS® yazılımı seçilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı mühendislik dallarınca, özel analizler gerektiren mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan nümerik bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminin ilk kullanımı 1900'lü yıllara dayanır. Sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS programı, 1971 yılından günümüze kendisine giderek daha büyük bir uygulama alanı bulacak şekilde geliştirilmiştir [1,2]. Beton malzemesi ve doğal olarak betonarme elemanlar küçük yüklemeler dışında doğrusal davranış sergilemeyen elemanlardır. Doğrusal olmayan bir analiz, yükün adım adım etktilip, her adımın kendinden bir önceki adımın sonuçlarını temel alarak analize devam edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu sayede analiz edilen elemanın başlangıcından göçmesine kadar yük – şekil değiştirme grafiği çizilebilir. Analiz edilen elemanın artan yükleme etkisi altındaki davranışının gerçeğe en yakın olarak elde edilebilmesi için doğrusal olmayan çözümleme tercih edilmiştir [3-8].

Literatür incelendiğinde bünyesinde betonarme elemanların modellenmesi için özel bir eleman içeren ANSYS® yazılımı ile ilgili olarak çok sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır [9-11]. Bu nedenle diğer mühendislik dallarında oldukça yaygın olarak kullanılan ancak inşaat mühendisliği problemlerinin analizi alanında yaygınlaşmaya başlayan ANSYS® yazılımı ile monotonik yükleme etkisi altındaki dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin analizine yönelik bir örnekleme yapılması amaçlanmıştır [12].

Araştırmacılar literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışmada ANSYS® sonlu eleman programının eleman kütüphanesinde yer alan beton modellemesi için geliştirilmiş SOLID65 eleman tipinin çeşitli özelliklerini test ederek deneysel sonuçlar ile uyumunu araştırmıştır. Ayrıca betonarmeyi oluşturan beton ve donatının modellenmesi için önerilen düzgün yayılı, dağıntık (smeared) ve ayrık (discrete) modelleme teknikleri arasındaki farklar ve ANSYS® programının kütüphanesinde yer alan beton ve donatı için kullanılacak malzeme modelleri arasında karşılaştırma yapılan sınırlı sayıda çalışma da mevcuttur [9-11].

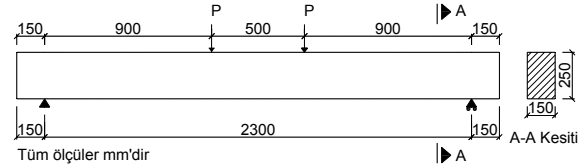
Yapılan çalışmada literatür incelenerek, ANSYS® sonlu eleman programı kullanılarak betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışının, deneysel veriler ile uyumlu olarak elde edilebilmesi için uygulanması gerekli adımlar belirlenmiştir. Bu adımlar üzerinde, seçilen monotonik yükleme etkisi altındaki dikdörtgen kesitli basit mesnetli betonarme kirişin yük-deplasman grafiğinin elde edilebilmesi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Yapılan inceleme sonucunda dağıntık (düzgün yayılı) modelleme tekniği seçilmiş ve beton için ANSYS® yazılımı malzeme modelleri arasında yer almayan Hognestad gerilme-birim deformasyon ilişkisinin kullanılmasına, donatı içinde elastik-tam plastik

malzeme modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. ANSYS® yazılımı ile yapılan doğrusal olmayan analiz sonuçları aynı kiriş için daha önce yapılmış deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve yazılımla uyumlu, gerçeğe yakın doğrusal olmayan analiz sonuçlarının elde edilebilmesi için öneriler sunulmuştur.

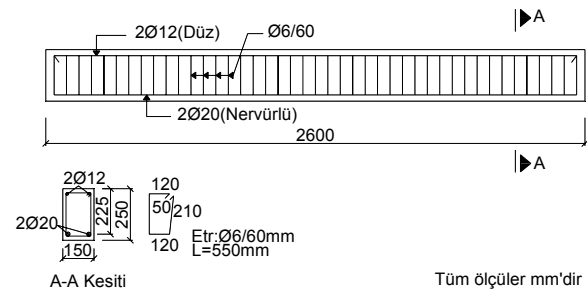
2. ANALİZDE KULLANILAN MODELİN DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS OF MODELLED RC BEAM)

Çalışmada dört nokta yükleme altında monotonik olarak yüklenen dikdörtgen kesitli basit mesnetli bir betonarme kiriş seçilmiştir [13]. Betonarme kirişin geometrik özellikleri Şekil 1'de ve donatı detayı Şekil 2'de sunulmuştur. Deneysel elemanı gerektiği gibi kesme donatısı ile donatılandırılmış, sünek eğilme davranışı sergilemesi beklenen bir kiriştir. Deneysel elemanın artan yükleme etkisi altında açıklık ortasında, yaptığı büyük düşey deplasman sonucu ana çekme donatısının akma dayanımına ulaşması ve betonun basınç bölgesinde ezilmesiyle sünek bir eğilme davranışı sergileyerek göçmesi beklenmektedir.

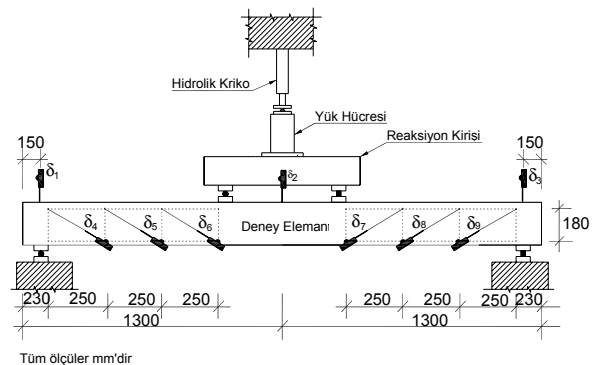
Analiz edilen kirişin deneyi Gazi Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yer alan 200 kN kapasiteli eğilme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve ölçüm düzeneği Şekil 3'te verilmiştir.



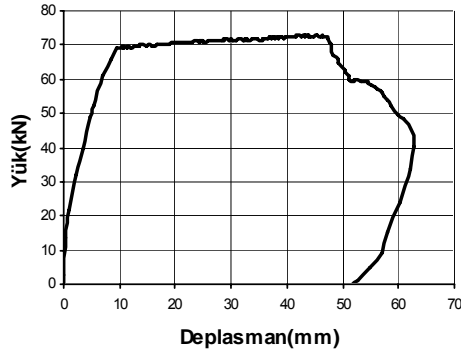
Şekil 1. Model kiriş geometrisi, mesnetlenme durumu ve yüklemesi (Loading, boundary condition and geometric dimensions of beam)



Şekil 2. Model kiriş donatı detayı (Reinforcement details of beam)



Şekil 3. Deneysel ve ölçüm düzeneği (Test setup and instrumentation of beam)



Şekil 4. Deney elemanı yük-deplasman grafiği (Load-displacement curve of test specimen)

Deney elemanına monotonik yükleme, dört nokta yüklemesi olarak 300 kN kapasiteli ve el kontrollü bir hidrolik kriko ile uygulanmış ve 200 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Deney elemanından kiriş orta nokta deplasmanı, mesnet çökmesi deplasmanları ve kesme açıklıklarından kesme çatlağı değerleri dört bölgeden elektronik deplasman ölçerler (LVDT) ile ölçülmüştür. Test sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği Şekil 4'te, deney sonuçları ise Tablo 1'de sunulmuştur. Deney elemanı tasarımına uygun olarak sünek bir eğilme davranışı sergilemiştir.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ ve MODELLERİ (MATERIAL PROPERTIES AND MODELS)

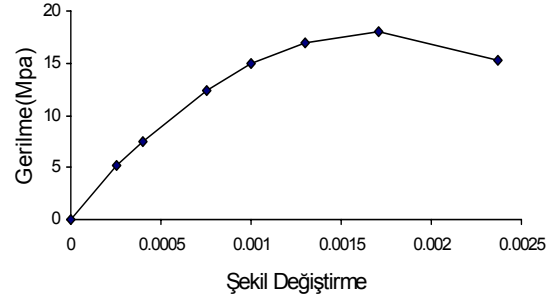
Deney elemanının malzeme özelliklerinin yapılan bilgisayar modellemesine aktarılması için kullanılan malzeme modelleri bu bölümde sunulmuştur. Beton ve donatı çeliğinin malzeme modelleri ve rijitlikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Malzeme modellemesinde yapılan temel kabuller aşağıda maddelenmiştir:

- Çatlamış betonu tanımlamak için gizli çatlak modeli seçilmiştir.
- Donatı çeliği analiz programının bir özelliği olarak beton elemanların bünyesinde, yönlerine ve hacimsel oranlarına göre, yalnızca eksenel yükleri alacak şekilde modellenmiştir (Dağınmık (smeared) modelleme tekniği).
- 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 [14]. Hognestad modelinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi betonun doğrusallığının sınırını ve plastik davranışını belirlemekte kullanılacak olan Multilineer İzotropik Pekleşmeli Plastisite (Von Mises) modelinde tanımlanmıştır. Modelde,

Tablo 1. Deney sonucunda elde edilen sonuçlar (Test results of beam)

Deney Elemanı	Akma Yüğü, P_y (kN)	Göçme Yüğü, P_u (kN)	Akma Dep., δ_y (mm)	Göçme Dep., δ_u (mm)	Ölçülen Rijitlikler (kN/mm)	
					Akmada (K_y)	Göçmede (K_u)
Kiriş-1	67	72	9,2	48,2	7,28	1,49

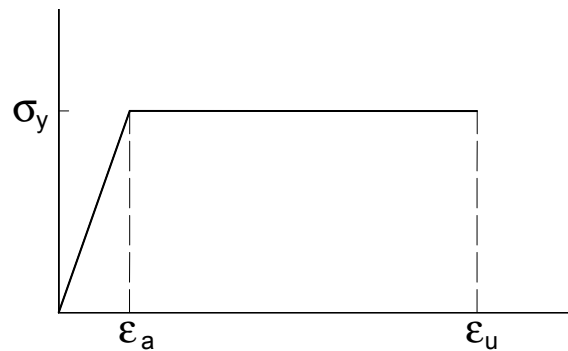


Şekil 5. Beton modellemesinde kullanılan malzeme modeli grafiği (Material model curve of concrete)

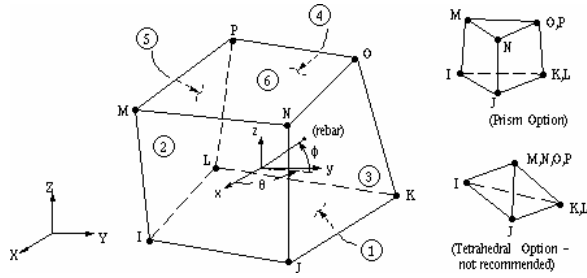
gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin tepe noktasına kadar olan parçası ikinci derece bir parabol, düşüş parçası ise doğrusal varsayılmıştır. Bu bilgiler ışığında ve elimizdeki verilere göre, modellemesi yapılacak betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi yedi noktada tanımlanarak Şekil 5'te görüldüğü gibi elde edilmiştir.

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 [15]. Çelik, betondan daha kolay ve gerçeğe yakın tanımlanabilir homojen ve izotrop bir malzemedir. Özellikleri beton gibi çevre koşullarına ve zamana bağlı değildir. Donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi başlangıçta doğrusal elastiktir. Bu bölgede şekil değiştirmeler yükleme kaldırılınca geri döner. Bu elastiklik durumu orantılılık sınırına kadar, doğrusallık da akma noktasına kadar devam etmektedir.

Orantılılık sınırından sonra plastik deformasyonlar oluşmaya başlar. Orantılılık sınırı ile akma noktası arasındaki fark çok küçüktür. Bu nedenle birleştirilip tek bir nokta olarak ele alınmıştır. Gerçekte akma noktasından sonra bir akma platosu ve onu takip eden bir pekleşme bölgesi bulunurken araştırmacılar modellemelerde çeliğin bu davranışını idealize ederek kullanırlar. Bu çalışmada akmadan sonraki dayanım artımı ihmal edilmiş, çelik malzemesi Von Mises akma kriterini esas alan lineer elastik-tam plastik (Bilineer izotropik pekleşmeli plastisite) olarak tanımlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Donatı çeliği malzeme modellemesi (Material model curve of reinforcement steel)



Şekil 7. Solid65 sonlu eleman özellikleri (Properties of Solid65 finite element)

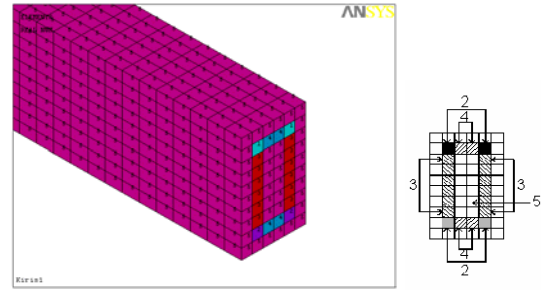
4. ANSYS® SONLU ELEMAN MODELİ (ANSYS® FINITE ELEMENT SOFTWARE MODEL)

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 [2]. Kirişimizi modellemek için ANSYS®'in bünyesinde yer alan eleman tiplerinden Solid65 elemanı kullanılmıştır. Solid65 çekmede çatılma, basınçta ezilme, plastik deformasyon ve sünme özelliklerini barındıran 8 düğüm noktalı solid elemandır (Şekil 7). Her düğüm noktasında x, y ve z yönlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesine sahiptir. Donatısız olarak da kullanılabilceği gibi, bünyesinde üç farklı malzeme ve kesit özellikli donatı tanımlanabilir. Çalışmamızda beton için Solid65 elemanı, içinde donatılar tanımlanarak kullanılacaktır (dağınık (smeared) modelleme tekniği).

Tüm donatıların Solid65 beton elemanının içinde tanımlanması için beş ayrı nitelik eleman tanımlaması

Tablo 2. Solid65 malzeme katsayıları özellikleri (Real constant set of Solid65)

Real Constant Set	Eleman Tipi	1. donatı	2. donatı	3. donatı	
1	Solid65	Malzeme No	3	4	4
		Hacim Oranı	0,18	0,018	0,018
		$\theta=$	0°	90°	0°
		$\phi=$	0°	0°	90°
2	Solid65	Malzeme No	2	4	4
		Hacim Oranı	0,50	0,018	0,018
		$\theta=$	0°	90°	0°
		$\phi=$	0°	0°	90°
3	Solid65	Malzeme No	4	-	-
		Hacim Oranı	0,018	-	-
		$\theta=$	90°	-	-
		$\phi=$	0°	-	-
4	Solid65	Malzeme No	4	-	-
		Hacim Oranı	0,018	-	-
		$\theta=$	0°	-	-
		$\phi=$	90°	-	-
5	Solid65	Malzeme No	-	-	-
		Hacim Oranı	-	-	-
		$\theta=$	-	-	-
		$\phi=$	-	-	-

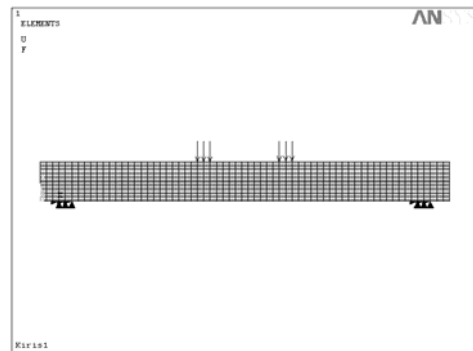


Şekil 8. Solid65 tiplerinin kiriş kesitindeki yerleşimi (Layout of Solid65 types)

gerekmıştır. Bu nitelikler ANSYS®'de malzeme özelliği katsayı seti (Real Constant Set) olarak tanımlanmıştır. Bu beş takımın ayrıntıları Tablo 2'de gösterilmiştir. Ayrıca 5 tip Solid65 elemanının modellenen kiriş kesitindeki yerleşimi ve 3 boyutlu olarak görünüşü Şekil 8'de sunulmuştur.

Beton için bir, donatılar için çekme, basınç donatılarının ve etriyelerin akma dayanımları farklı olduğundan üç farklı malzeme özelliği tanımlanmıştır. 1 numaralı malzeme modeli Solid65 eleman tipi için, 2, 3 ve 4 numaralı malzeme modelleri ise sırasıyla Ø20 çekme donatısı, Ø12 basınç donatısı ve Ø6 etriye için oluşturulmuştur. Donatılar Solid65 eleman tipi bünyesinde tanımlanacağı için donatılara eleman tipi atanmamıştır. Malzeme özelliklerinin detayları Tablo 3'te verilmiştir.

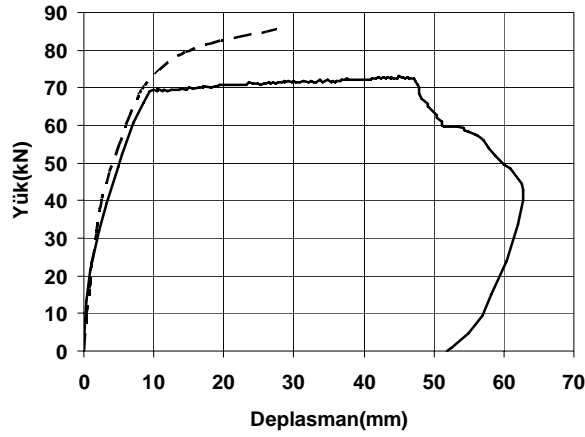
Solid65 elemanı ile yapılan analizlerde düzenli ve dikdörtgen bölünmeler yapılması önerilmektedir. Bu nedenle 2600 mm uzunluğunda ve kesit boyutları 150 mm×250 mm olan kiriş toplam 3900 dikdörtgen prizması şeklinde Solid65 elemanına bölünerek modellenmiştir. Uzunluğuna 65, enine 6 ve yükseklikte 10 parçaya bölünen kirişin her bir parçası boyuna 40 mm, enine ve yüksekliğine 25 mm boyutlarındadır. Kiriş simetriden yararlanılmadan bütün olarak modellenmiştir. Deney düzeneğine uygun olarak kiriş mesnetlerden 900 mm uzaklıkta iki ayrı noktadan tekil yük etkilmiştir. Deney düzeneğinde kiriş kenarından 150 mm uzaklıkta bulunan mesnetler oluşturulmuştur. Mesnetler x ve y yönlerinde yatay ve dikey hareket edemez, yalnızca z ekseninde dönmeye izin verilmemiştir. Kiriş, x-y düzleminde hareket edecektir. Şekil 9'da ANSYS® Sonlu Elemanlar Programında modellenen kirişin mesnetleri ve üzerine etkililen yükler görülmektedir.



Şekil 9. Sonlu eleman modeli yükleme ve mesnetlenme durumu (Loading and boundary conditions of finite element model)

Tablo 3. Malzeme özellikleri (Material properties)

Malzeme No.	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri			
1	Solid65	Lineer İzotropik Pekleşmeli		} Betonun izotropik malzeme özellikleri	
		EX(MPa)	2,1E+4		
		PRXY	0,3		
		Multilineer İzotropik Pekleşmeli		} Betonun Von-mises gerilme dağılımını elde etmek için gerilme-birim deformasyon grafiği (Hognestad modeli)	
			Şekil Değ.		Gerilme(Pa)
		1.Nokta	0,00025		5,25
		2.Nokta	0,0004		7,44
		3.Nokta	0,00075		12,3
		4.Nokta	0,001		14,9
		5.Nokta	0,0013		16,9
		6.Nokta	0,00171	18,0	
		7.Nokta	0,00273	15,3	
		Beton		} Betonun göçme moduna karar vermek için göçme kriteri katsayıları (Willam-Warke göçme modeli)	
		ShrCf-Op	1		
ShrCf-CI	1				
UnTensSt(MPa)	1,48				
UnCompSt(MPa)	-1				
BiCompSt	0				
HydroPrs	0				
BiCompSt	0				
UnTensSt	0				
TenCrFac	0				
2		Lineer İzotropik		} Çekme donatısı izotropik malzeme özellikleri (Elastik-tam plastik malzeme modeli)	
		EX(MPa)	2,1E+5		
		Bilinear İzotropik Pekleşmeli			
		fy(MPa)	517,0		
3		Lineer İzotropik		} Basınç donatısı izotropik malzeme özellikleri (Elastik-tam plastik malzeme modeli)	
		EX(MPa)	2,1E+5		
		Bilinear İzotropik Pekleşmeli			
		fy(MPa)	367,0		
4		Lineer İzotropik		} Kesme donatısı izotropik malzeme özellikleri (Elastik-tam plastik malzeme modeli)	
		EX(MPa)	2,1E+5		
		Bilinear İzotropik Pekleşmeli			
		fy(MPa)	277,0		
		Tan.Mod	0		



— Deneysel — — Sonlu Eleman Analizi

Şekil 10. Deneysel ve analitik yük deplasman grafikleri (Experimental and analytical load-displacement curves)

5. SONLU ELEMAN ANALİZİ ve DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF FINITE ELEMENT ANALYSIS AND EXPERIMENTAL RESULTS)

Deneysel sonuçları ile sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlar dayanım, rijitlik, deplasmanlar ve oluşan çatlaklar yönünden karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar için Şekil 10'da sunulan deneyden ve sonlu eleman analizinden elde edilen yük-deplasman grafikleri kullanılmıştır. Şekil 10'dan görüleceği üzere deneysel ve analitik yük-deplasman grafikleri arasında, çekme donatısının akma dayanımına ulaştığı noktaya kadar çok iyi bir uyum görülmektedir.

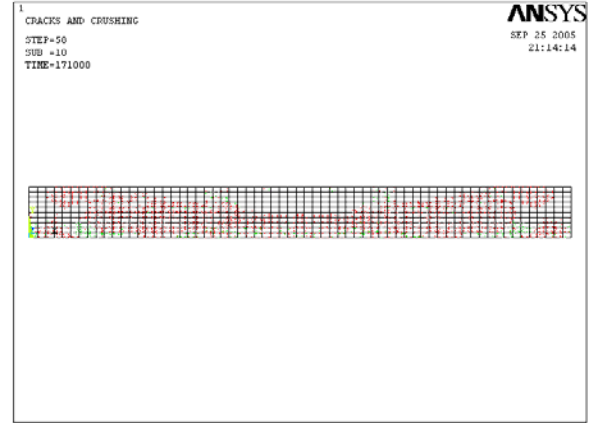
Analitik başlangıç rijitliği, akma noktası deplasman ve yük değerleri büyük bir doğrulukla hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar arasındaki karşılaştırma Tablo 4'te sunulmuştur. Sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çatlak ve gerilme dağılımları Şekil 11 ve 12'de sunulmuştur. Çatlak ve gerilme dağılımı incelendiğinde sonlu eleman analizinden elde edilen çatlak ve gerilme dağılımının deney sonucunda meydana gelen göçme mekanizması ile büyük oranda uyumlu olduğu görülmüştür. Sonlu eleman modelinde artan yükleme etkisi ile model kiriş açıklığında eğilme çatlakları oluşmuş ve basınç bölgesinde gerilmelerde artış meydana gelmiştir. Sonlu eleman modeli de aynı deneyde gözlemlendiği gibi basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile göçmüştür.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

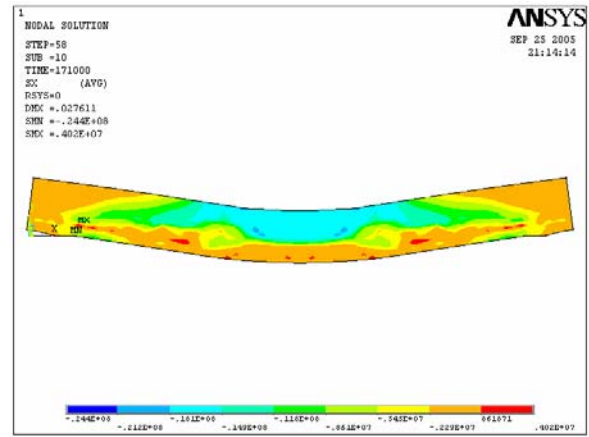
Çalışmada monotonik yüklü, dikdörtgen kesitli betonarme bir kirişin ANSYS® sonlu eleman programı ile doğ-

Tablo 4. Deneysel ve analitik sonuçlar (Experimental and analytical results)

	Deneysel Kirişi	Model Kiriş	Fark
Akma Yüğü (kN)	138,0	144,0	%4
Göçme Yüğü (kN)	144,0	171,0	%15
Akma Deplasmanı (mm)	9,2	9,2	%0
Göçmede Deplasmanı (mm)	48,2	27,6	%42



Şekil 11. Sonlu eleman analizinden göçme anında elde edilen çatlak dağılımı (Crack pattern evaluated from finite element analysis at failure)



Şekil 12. Sonlu eleman analizinden göçme anında elde edilen gerilme dağılımı (Stress distribution evaluated from finite element analysis at failure)

rusal olmayan sonlu eleman analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmadan elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda bilgisayarda oluşturulan sonlu eleman modelinin gerçek davranışa oldukça yaklaştığı, fakat deney elemanına göre bilgisayar modelinin daha rijit davranıp daha az süneklik göstererek göçmeye ulaştığı görülmüştür. Bu durumun aşağıdaki nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Sonlu eleman modelinden elde edilen akma yükünün deneysel çalışmadan elde edilen yükten daha fazla olması, model kirişinin daha rijit olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun bir nedeninin deney kirişinin sahip olduğu gerçek malzeme dayanımları ile betondan alınan üç numunenin kırılmasıyla elde edilen dayanımlar arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı durum donatı için de geçerlidir. Deneysel çalışma sırasında donatılar için yapılan üçer adet çekme deneyi sonucunda elde edilen malzeme dayanımlarının kesinliği şüpheli olmakla birlikte bilgisayar modellemesinde bu deneylerden elde edilen değerlerin mutlak doğru olduğu kabul edilmiştir. Beton ve donatının dayanımlarının daha yüksek tanımlanmış olması ihtimali model kirişinin daha rijit davranması için kuvvetli bir nedendir.
- Beton, daha önce de bahsedildiği gibi, heterojen ve anizotrop bir malzeme iken, modelde homojen ve

izotrop olarak tanımlanması deney sonuçlarıyla birebir uyumunu engellemektedir.

- Bir kirişte çekme donatısının yeri faydalı yüksekliği, dolaylı olarak moment kapasitesini belirler. Modelde donatılar solid elemanların içinde hacimsel oranlarıyla gizli donatılı modelleme yöntemi (smeared modeling) ile tanımlanmıştır. Gizli donatının hacimsel olarak tanımlanması, donatı yerinin tam olarak deney elemanında olduğu gibi tanımlanamamasına neden olmuştur.
- Bilgisayar modeli ile deney sonuçları arasında fark oluşturabilecek diğer bir önemli nokta da sınır koşullarıdır. Bilgisayar modelinde mesnet tanımlamaları hatasız, mükemmel bir şekilde uygulanır. Öte yandan deney düzeneği oluşturulurken kirişin mesnet şartları kabullere birebir uydurulamaz. Mesnet koşulları açısından deney kirişi ile model kirişi arasında bir uyumsuzluk olması ve bu durumun sonuçlarda farklılığa yol açması kaçınılmazdır.
- Aşağıda kısaca analiz gerçekleştirilirken karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri özetlenmiştir.
- Doğrusal olmayan analizi gerçekleştirmeden önce modelleme sırasında ilk verilmesi gereken karar modelin ağ yoğunluğu hakkında olmuştur. İlk çalışmalarda düşük tutulan ağ yoğunluğu ile hedeflenen yük düzeyine ulaşılamamış, bunun sonucunda kullanılan solid eleman sayısı artırılarak yeni modeller oluşturulmuştur. Eleman yoğunluğunun artması işlem hacmini de arttırmış, analiz için gereken süre de uzamıştır. Analiz 3900 adet solid eleman kullanılarak sonuçlandırılmıştır.
- Modelleme sırasında verilmesi gereken önemli kararlardan biri de donatının gizli (smeared reinforcement) ya da ayrık (discrete reinforcement) olarak tanımlanması olmuştur. İlk oluşturulan modelde ayrık donatı kullanılmış, bunun için donatıyı tanımlamak üzere Link8 çubuk (spar) elemanından yararlanılmıştır. Ancak Link8 elemanlarının kullanıldığı modellerde boyuna donatılar için ilave 260, etriyeler için ilave 1536 eleman gerekmiş, bunun sonucunda da işlem hacmi önemli derecede artmıştır.
- Yine ilk çalışmalarda yük etkileri ve mesnetler kiriş derinliği boyunca bir hat üzerinde tanımlanmışken, deney düzeneğine uyup kirişin gerilme-şekil değiştirme grafiğine yaklaşmak ve bölgesel gerilme yığılmalarını engellemek amacıyla yük ve mesnetler üç doğrultuda tanımlanmıştır.
- Analiz sırasında ilk karşılaşılan sorunlardan biri malzeme modellemesinde meydana gelmiştir. İlk çalışmalarda beton modellenirken yalnızca Willam-Warnke modeli için gereken değişkenler tanımlanmıştır. Ancak daha sonra plastik deformasyon hesaba katılmadıkça betonun göçmeye kadar lineer davranacağı görülmüştür. Bu yüzden betonun Multilineer İzotropik pekleşmeli plastisiteli (Von-Mises) davranışının da mutlaka tanımlanması gerektiğine karar verilmiş ve beton için Hognestad modelini temel alan gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi tanımlanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Moaveni, S., **Finite Element Analysis, Theory and Applications with ANSYS**, Bill Stenquist, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.
2. Lawrence, K. L., "ANSYS Tutorial Release 7.0 and 6.1", **SDC Publications**, Canonsburg, 1.1-2.25, 2002.
3. Arnesen, A., Sorensen, S., I., Bergan, P.G., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete", **Computers and Structures**, 12, 571-579, 1979.
4. Bergan, P. G. and Holand, I., "Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures", **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 17, pp. 443-467, 1979.
5. Chen, W. F., **Plasticity in Reinforced Concrete**, McGraw Hill, New York, 1982.
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. Ashour, A. F. and Morley, C. T., "Three Dimensional Nonlinear Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures", **Finite Elements in Analysis and Design**, 15, 43-55, 1993.
8. Chan, H. C., Cheung, Y., K., Huang, Y., P., "Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structures", **Computers & Structures**, 53 (5), 1099-1107, 1994.
9. Fanning, P., "Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams", **Electronic Journal of Structural Engineering**, 2, 111-119, 2001.
10. Wolanski, A. J., "Flexural Behavior of Reinforced and Pre-stressed Concrete Beams Using Finite Element Analysis", **Degree of Master of Science, Faculty of Graduate School**, Marquette University, Wisconsin, 48, 2004.
11. Barbosa, A., F., Riberio, G., O., **Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model**, Computational Mechanics New Trends and Application, S. Idelsohn, E. Onate, and E. Dvorlin (editors), CIMNE, Barcelona, Spain, (1998).
12. Yavuzer, M., **Monotonik Yükleme Etkisi Altındaki Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Nonlineer Analizi**, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, 54 sf., 2005.
13. Altın, S., Anıl, Ö. ve Gökten, Y., "Betonarme Kirişlerin Kesmeye Karşı Güçlendirilmesine Bir Kelepeç Uygulaması", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 19, (4), sf. 415-422, 2004.
14. Ersoy U., Özcebe G., **Betonarme**, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2001.
15. Willam, K., J., Warnke, E., P., "Constitutive Model for the Tri-axial Behavior of Concrete", **IABSE**, Report No.19, Bergamo, 1-30, 1974.

