

BETONARME ELEMANLARIN DOĞRUSAL ÖTESİ DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ

MODELLING NON-LINEAR BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Hayri Baytan ÖZMEN¹, Mehmet İNEL² ve Hüseyin BİLGİN³

ÖZET

Ülkemiz coğrafi konumu ve sahip olduğu yapı stoğu gereği oldukça ciddi deprem tehdidi altındadır. Deprem zararlarının en aza indirilmesi ülkemizin en önemli problemlerinden biridir. Bu nedenle bu konuyla ilgili bilimsel gelişmelerin yakından takip edilmesi gereklidir. Yeni yapılacak ve özellikle de mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde en gelişmiş yöntemler doğrusal ötesi statik ve dinamik analiz yöntemleridir. Fakat bu yöntemler için gerekli modellerin hazırlanması oldukça büyük zorluklar içermektedir. Bu zorluklardan en önemlisi yapıya ait her bir eleman için malzeme ve kesit bilgileri kullanılarak tek tek dayanım ve deformasyon kapasiteleri bilgilerinin hesaplanarak, analiz programlarına aktarılmasıdır. Bir yapıyı oluşturan yüzlerce eleman için bu işlemin gerçekleştirilmesi bu metotları uygulanabilir olmaktan çıkarmaktadır. Geliştirilen yazılım ile bu işlemin önemli ölçüde kolaylaştırılması amaçlanmaktadır. Bu yazılım betonarme bir kesitin kesme, eksenel yük ve moment plastik mafsalları bilgilerini hesaplayarak veri dosyaları aracılığıyla programların veri transfer özelliklerini kullanarak analiz programlarına birkaç tuşa basarak aktarılmasını sağlayacaktır. Bu işlem için kullanıcıya 4 farklı beton modeli, 4 farklı plastik mafsalları boyu denklemi, 4 adet süneklik kriteri kullanma şansı verilecektir. Seçenekli ve pratik kullanım olanakları sayesinde yazılımın eleman ve sistem davranışlarının öğrenilmesinde inşaat mühendisliği öğrencilerine önemli faydalar sağlayarak eğitimlerine katkı sağlaması amaçlanmıştır. Ayrıca önerilen yazılımın 2007Deprem Yönetmeliği' nin yeni bölümünün inşaat mühendislerince anlaşılmasında; deformasyon kapasitelerinin nasıl hesaplandığı, nelere bağlı olduğunun görerek öğrenilmesi sayesinde oldukça faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme eleman davranışının modellenmesi, Deformasyon kapasitesi, Doğrusal olmayan analiz, Sargılı beton modelleri

ABSTRACT

Seismic risk of Turkey is high due to location and vulnerable building stock. Research and advances in earthquake engineering need to be followed by civil engineers in practice to reduce seismic risk that is a primary concern for Turkey. Nonlinear static and dynamic procedures are well-known methods for the evaluation of existing structures. However, modeling of structures for these methods is complex compared to linear procedures. The deformation capacity of each element component needs to be determined using its material and geometric characteristics for the nonlinear procedures. Repeating this process for several hundred elements in a typical structure makes the use of these procedures almost impossible. In this paper, a practical software for estimating deformation capacity of reinforced concrete sections is introduced. The software includes moment-curvature analysis and determination of moment-rotation capacity of a section. Program provides the use of 4 different concrete models and 4 different plastic hinge lengths. Additionally, it has the feature of preparing input data for commonly used nonlinear analysis programs in Turkey. The easy-to-use feature and provided alternatives in modeling makes the program useful and an educational tool for engineers in practice and students. Also, visual part of the program makes engineers and

¹ Yüksek Mühendis, Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, hozmen@pau.edu.tr

² Yard. Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, minel@pau.edu.tr

³ Yüksek Mühendis, Pamukkale Üniversitesi İnşaat Müh Bölümü, Denizli, huseyinbilgin@gmail.com

students to easily understand element and system behavior under earthquakes The proposed program is considered as useful tool for civil engineers in practice because it helps to visualize the behavior of concrete components and understanding of the new chapter in 2007 Turkish Earthquake Code that is included to guide evaluation and retrofit of existing structures .

Keywords: Confined concrete models, Deformation capacity, Modeling behavior of reinforced concrete components, Nonlinear analysis.

GİRİŞ

Son yıllarda ülkemizin yaşadığı deprem felaketlerindeki (1999 Kocaeli ve Düzce, 2003 Bingöl depremleri) can ve mal kayıpları sonrası ülke genelinde mevcut bina stoklarının deprem davranışının tespiti ve gerekli önlemlerin alınması ihtiyacı ortaya çıkarmıştır (Özcebe vd., 2004; Sezen vd., 2003; Sucuoğlu, 2000). Bu anlamda *Afet Yönetmeliği (ABYYHY-1998)* içinde yer alan depreme dayanıklı yapı tasarım kuralları deprem afetine daha fazla vurgu yaparak *Deprem Yönetmeliği (DBYBHY-2007)* adı altında yenilenmiştir ve yönetmeliğe “Mevcut Yapıların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi” adı altında ilk defa olarak mevcut yapılarla ilgili hükümler içeren bir bölüm eklenmiştir. İlgili bölümde yapıların deprem etkisi altında doğrusal ötesi davranışının yansıtılması için kullanılabilir yöntemlerden birisi olarak deprem mühendisliğinde dünyada yaygın olarak kullanılan *İtme Analizi* (pushover analiz), “Artımsal İtme Analizi” adı ile önerilmektedir.

Yapıların deprem davranışlarının incelenmesinde altyapısı oturmuş ve kullanılabilir derecede pratik bilimsel metod *İtme Analizi*, doğrusal olmayan statik analiz prosedürüdür (Lawson vd., 1994). Bu metod ile standart elastik analiz ile elde edilemeyen yapının hasar almaya başladıkdan sonra nasıl davranış göstereceği, bir eleman aktıktan sonra kuvvet dağılımının yapı içinde nasıl gerçekleşeceği gibi birçok bilgi elde edilebilmektedir (Krawinkler ve Seneviratna, 1998). Bu bilgilerin inşaat mühendisleri için önemi büyüktür. Ayrıca öteleme analizi aracılığıyla bu bilgiler daha görsel ve somut bir hale getirilerek piyasada çalışan inşaat mühendisleri ve bu alanda öğrenimlerini devam etmekte olan öğrenciler tarafından yapıların deprem davranışının, yapıda mekanizma oluşumu ve göçme durumuna nasıl ulaşıldığının anlaşılması kolaylaşmaktadır.

Doğrusal ötesi statik analiz için yapıların modellerinin hazırlanması elastik analize göre oldukça uzun ve zahmetlidir. Elastik analiz için yapı taşıyıcı sisteminin yerleşiminin, boyutlarının ve sistemi oluşturan malzemenin rijitliğinin bilinmesi yeterlidir. Hâlbuki doğrusal olmayan analiz için bu bilgilerin yanında elastik analizde kullanılmayan dayanım ve süneklik değerlerinin de belirlenmesi gereklidir. Doğrusal olmayan analiz modellerinde her bir eleman için bu değerler hesaplanmalı ve modelin hazırlandığı bilgisayar programına aktarılmalıdır.

Doğrusal olmayan analiz modellerinin hazırlanmasındaki bu ek külfet nedeniyle bu yöntemlerin kullanımı sahip olduğu avantajlara rağmen sınırlı kalmaktadır. Öyle ki bu yöntemler akademik olarak dahi çok yaygın kullanıma sahip değildir.

ÇALIŞMANIN AMACI

Ülkemizdeki yapıların çok büyük bir kısmını oluşturan betonarme elemanların doğrusal ötesi davranışı kullanılan sargılı beton davranışı ve plastik mafsal boyuna bağlıdır (Fardis ve Biskinis, 2003). Betonarme yapılar için plastik mafsal bilgilerinin moment, kesme ve eksenel yük için hesaplanması durumunda her bir eleman için onlarca verinin hesaplanarak bilgisayara aktarılması gerekmektedir. Ortalama bir yapıda yüzlerce kolon ve kiriş olduğu düşünülürse elemanlardan her birinin malzeme ve kesit bilgileri kullanılarak bu verilerin (binlerle ifade edilebilecek boyutta) hesaplanması ve bilgisayara aktarılması bir tek model için oldukça uzun bir süre gerektirebilmektedir. Bu durum *Doğrusal Olmayan Statik Analizi* kullanılabilir olmaktan çıkarmaktadır.

Bu sebeple akademik ortamda dahi gerçek bir yapının kesme, eksenel yük ve moment-eğrilik ilişkilerinin hesaplanarak bir model oluşturulmasından kaçınılmakta, kullanılan analiz programlarında hazır olarak bulunan veriler ile hesaplamalar yapılmaktadır. Bu durumda üzerlerindeki eksenel yük, boyuna donatı oranı, yanal donatı oranı ve malzeme özellikleri farklı elemanlar için aynı deformasyon kapasiteleri göz önüne alınmış olmaktadır. Programlarda bulunan otomatik mafsalsal özelliklerinin enine donatının yetersiz olduğu ülkemiz mevcut yapı stoğunun birçoğu için uygun olmadığı önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Inel ve Ozmen, 2006).

Çalışmanın amacı doğrusal ötesi davranış modellemesinde yaşanan bu zorlukların üstesinden gelmek için bir yazılım geliştirmektir. Yazılım sayesinde ülkemiz yapı stoğunun çok büyük kısmını oluşturan betonarme yapı elemanlarının doğrusal ötesi davranışlarının belirlenen deformasyon kriterlerine göre pratik şekilde hesaplanarak, bu bilgilerin bir dosyada toplanması ve veri transfer özellikleri kullanılarak yaygın kullanılan analiz programlarına kolayca aktarılması mümkün olmaktadır. Söz konusu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 105M024'nolu proje olarak desteklenmektedir.

Yazılım betonarme kesitler için moment-eğrilik ilişkilerinin hesaplayarak grafik olarak gösterebildiğinden inşaat mühendisleri ve çeşitli düzeyde öğrencilere betonarme kesitlerin eğilme dayanım-deformasyon ilişkilerinin anlatılmasında önemli katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Geliştirilen yazılım ile öğrenciler eksenel yük, malzeme özellikleri, etriye sıklaştırması ve etriye konfigürasyonunun, eleman davranışını nasıl ve ne oranda etkilediklerini, sargılı ve sargısız beton arasındaki farklılıkları, değişik beton modelleri ve süneklik kriterleri ile görme fırsatı bulacaklardır. Ayrıca bu yazılım ile pratik şekilde hazırlayabilecekleri çerçeve modeller ile bu özelliklerin sistem davranışı üzerindeki etkilerini gözlemleyebileceklerdir.

DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZ

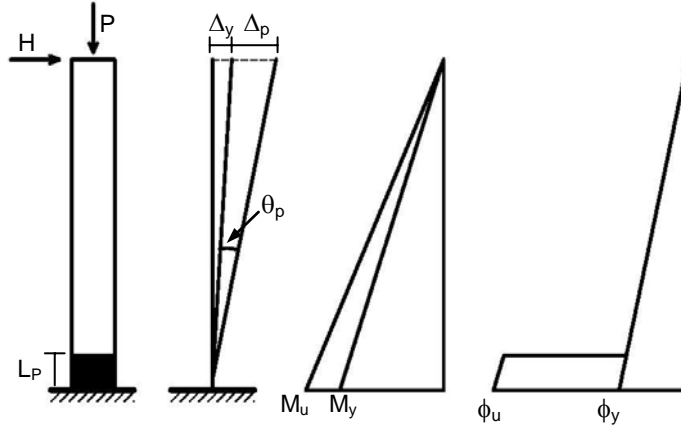
Doğrusal olmayan analizde elastik analizden farklı olarak elemanların belirli bir dayanım kapasitesi mevcuttur. Eleman üzerindeki yük etkileri arttıkça rijitliğinde azalma olur ve kritik bölgelerde dayanım değerine ulaştıktan sonra eleman sabit sayılabilecek yük değeri altında deformasyon yaparak enerji sönmülemeyi sürdürür. Bu durum eleman deformasyon kapasitesini kaybedene kadar devam eder. Doğrusal olmayan analizdeki bu dayanım deformasyon ilişkisi “plastik mafsallar” yoluyla modellenir.

Doğrusal ötesi davranışın oluştuğu varsayılan bölgenin eleman yüksekliği boyunca yayılı olarak veya yoğunlaşmış bir bölge olarak dikkate alınması durumuna göre “yayıllı” ve “yığılı” plastik davranış” hipotezleri bulunmaktadır. Bunlardan yığılı plastik davranış hipotezi basitliğinden dolayı daha yaygın kullanıma sahiptir ve 2007 yılında yürürlüğe giren yeni deprem yönetmeliğinde de (DBYYHY-2007) bu hipoteze yer verilmektedir.

Yığılı plastik davranış hipotezine göre elemanlara ait doğrusal ötesi davranış parametreleri, bu davranışın eleman uçlarında yoğunlaşacağı varsayımına dayanarak hesaplanmaktadır (Şekil 1). Bu hipotez uyarınca kiriş, kolon ve perde türü taşıyıcı sistem elemanlarındaki plastik şekil değiştirmelerin, iç kuvvetlerin kapasitelerine eriştiği sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca düzgün yayılı biçimde meydana geleceği varsayılmaktadır. Eğilme davranışının hakim olduğu bu bölge plastik mafsalsal boyu (L_p) olarak adlandırılır. Yığılı plastik davranışı karakterize eden plastik mafsalsal, bu bölgenin tam ortasında noktasal bir eleman olarak idealleştirilebilir. Tipik bir elemanın doğrusal ötesi davranışı Şekil 2’de gösterilen kuvvet-deformasyon eğrisi ile ifade edilebilir (DBYYHY-2007).

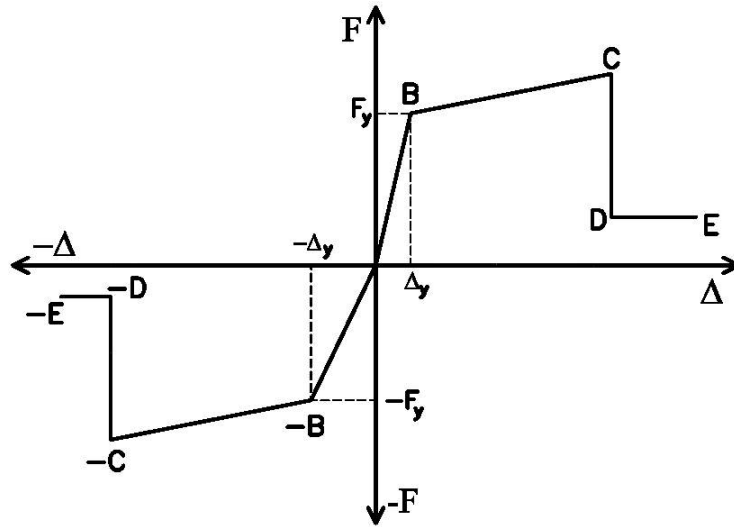
Şekil 2’de de görüldüğü gibi bir elemanın davranışının ifade edilebilmesi, eğri üzerindeki bazı noktaların koordinatlarının (B, C, D ve E gibi) belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Bunun için 8 adet dayanım-deformasyon değerinin hesaplanmasının gerektiği açıktır. Bir eleman göçme durumuna eksenel yük, kesme kuvveti ve moment etkisi ile ulaşabilir. Özellikle betonarme için bunlardan yalnız moment etkisi ile oluşan eğilme davranışı sünek olduğundan deformasyon kapasitesinin hesaplanması yalnız eğilme mafsalsal için yapılmaktadır. Bu durumda bir kolon eleman için her iki asal eksen düşünüldüğünde yalnız moment mafsalsal için 16 adet değer belirlenmelidir. Kirişlerin tek bir eksen etrafında eğilme davranışı gösterdiği varsayılabilir. Fakat kiriş kesitleri kolonlar gibi simetrik olmayıp farklı miktarda çekme ve basınç donatısına sahip olduğundan pozitif

ve negatif deformasyon değerleri için farklı davranışa sahiptir. Bu sebeple bir kiriş elemanın eğilme davranışının belirlenmesi için de 16 adet değere ihtiyaç vardır.



Şekil 1. Konsol kolon için yığılı plastik davranış modeli

Bu değerlerin belirlenmesi için öncelikle betonarme kesite sargı etkisine bağlı olarak sargılı beton gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinin belirlenmesi gereklidir. Sargılı beton modelleri ile belirlenen bu ilişki kullanılan beton ve donatının fiziksel özellikleri, yanal donatı miktarı ve kesit üzerindeki aksel yük ile yakından ilgilidir. Daha sonra gerilme-şekil değiştirme ilişkisi bilinen kesitin moment-eğrilik ilişkisi elde edilebilir. Bu eğri kesitte bulunan donatı miktarı ve donatı için belirli deformasyon değerlerinin sınır değerler olarak kabul edilmesiyle Şekil 2’de görülen şekilde idealleştirilir. Yığılı plastik bölge hipotezine göre eğrilik değerlerinin plastik mafsalları ile çarpılmasıyla moment-dönme ilişkisi tanımlanır. Böylelikle kritik kesitin plastik mafsalları oluşturulmuş olur. Görüldüğü gibi doğrusal ötesi eğilme ilişkisinin tanımlanması önemli derecede işlem gücü gerektirmektedir.



Şekil 2. Betonarme elemana ait tipik kuvvet-deformasyon (F-Δ) eğrisi

Eğilme davranışı altında göçmesi gerekirken özellikle ülkemizdeki eski mevcut yapı elemanlarının çeşitli tasarım veya yapım kusurları nedeniyle kesme kırılmasına maruz kalması olasıdır. Bu durumun analizde dikkate alınması için elemanlarda kesme mafsalları da tanımlanmalıdır. Betonarme elemanlar için bu mafsallarda herhangi bir süneklik tanımlanmayarak kesme dayanımına ulaşır ulaşmaz göçmenin gerçekleşeceği varsayılabilir (DBYYHY-2007). Kesme

mafsalı için kolonun her iki asal ekseninde birer olmak üzere 2, kiriş eleman için de 1 adet dayanım değerine ihtiyaç vardır.

Her ne kadar sık karşılaşılsa da kesmeye benzer şekilde mevcut yapılarda kolon elemanlar için eksenel yük mafsallarının tanımlanması gerekebilir. Betonarme elemanlar için simetrik olmadığından eksenel yük mafsalı için 2 adet (basınç ve çekme) dayanım değeri belirlenmelidir.

Bu durumda bir kolon mafsalı için toplam 20, kiriş için ise toplam 17 değer hesaplanmalıdır. Sıradan bir betonarme yapının doğrusal ötesi analizi için on binlerle ifade edilebilecek kadar çok değerlerin hesaplanmasının gerekliliği açıktır.

GELİŞTİRİLEN YAZILIMIN ÖZELLİKLERİ

Doğrusal ötesi model hazırlanmasındaki sözü edilen zorlukların aşılması ve eleman doğrusal ötesi davranışını belirleyen parametrelerin etkilerinin görsel olarak ifade edilerek anlaşılması ve yorumlanmasında araştırmacılara kolaylıklar sağlamak amacıyla yazarlar tarafından bir yazılım geliştirilmiştir.

Kesit ve Malzeme Bilgileri

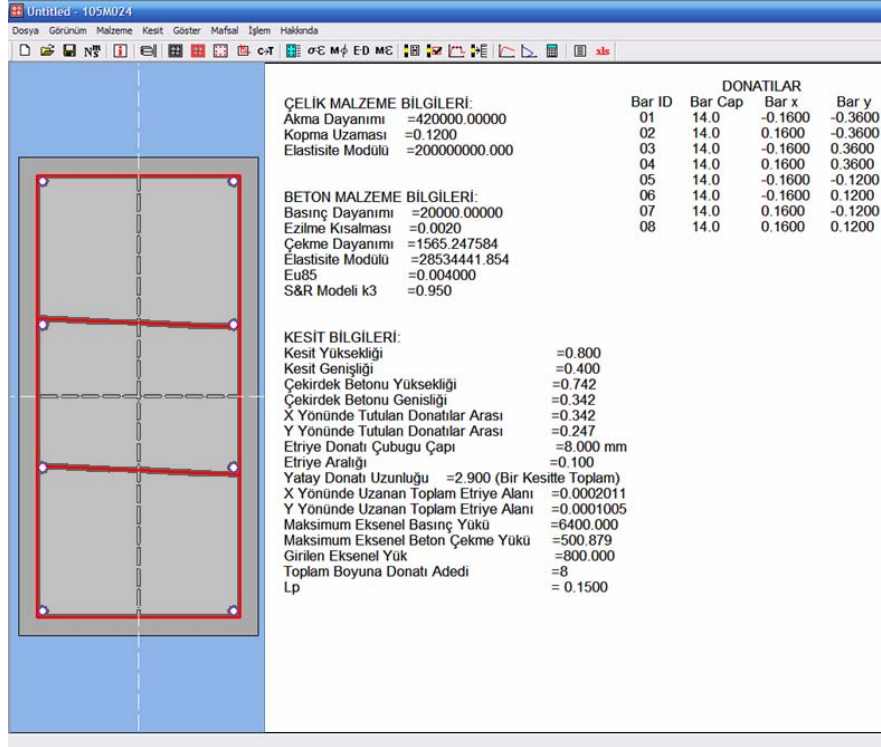
Yazılım kullanılarak betonarme bir kesite ait mafsal bilgilerinin hesaplanabilmesi için öncelikle malzeme özellikleri tanımlanmalıdır. Yazılım sargısız beton için Hognestad (1951) modelini esas almaktadır. Kabuk betonu için verilen malzeme bilgileri kullanılmakta, çekirdek betonu için ise sargılı beton özellikleri hesaplanmaktadır. Kullanıcı tarafından istenmesi durumunda betonun çekme dayanımı da hesaplarda dikkate alınabilmektedir. Betona ait çekme dayanımı-birim şekil değiştirme özellikleri TS500 (2000)'e uygun olarak yazılım tarafından otomatik olarak tanımlanmaktadır. Çelik için ise Mander (1984) tarafından önerilen, yeni deprem yönetmeliğine uygun şekilde pekleşmeli çelik modeli dikkate alınmaktadır. Bu modelde pekleşmenin tanımlandığı parabolün derecesi kullanıcı tarafından belirlenebilmekte, istenirse DBYYHY-2007'de olduğu gibi ikinci derece tanımlanabilmektedir. Daha sonra kesit üzerindeki eksenel yük ve yanal donatı ile ilgili bilgiler girilmelidir. Hazırlanan yazılım kullanılarak her türlü yanal donatı konfigürasyonuna sahip kesit modellenebilmektedir.

Yazılım kesit üzerindeki herhangi bir noktaya herhangi bir çapta donatı girilmesine olanak vermektedir. Çap değerleri tam sayı dışında değerler alabilmekte böylelikle standart dışı donatılar veya korozyon nedeniyle alanında azalma meydana gelen donatılar modellenebilmektedir. Girilen donatı koordinatlarında kesit dışına çıkma gibi bir hata olması halinde kullanıcı uyarılarak hatalı girilen donatının hangisi olduğu bildirilmektedir.

Girilen kesit bilgilerinin bir kirişe ait olması durumunda çekme ve basınç donatısının yer değiştirmesi (negatif-pozitif moment durumu) veya kolon olması halinde diğer asal eksen için hesaplamaların yapılması sıklıkla gereklidir. Bu durumda yazılımda tek bir komut ile kesitin 90 derece veya 180 derece (çekme-basınç bölgesi değişimi) döndürülmesi mümkündür. Girilen bilgilerin daha kolay anlaşılması ve olası hataların azaltılması için yazılıma girilen bilgilerin bir özeti ve kesite ait şeklin görülmesi mümkündür (Şekil 3).

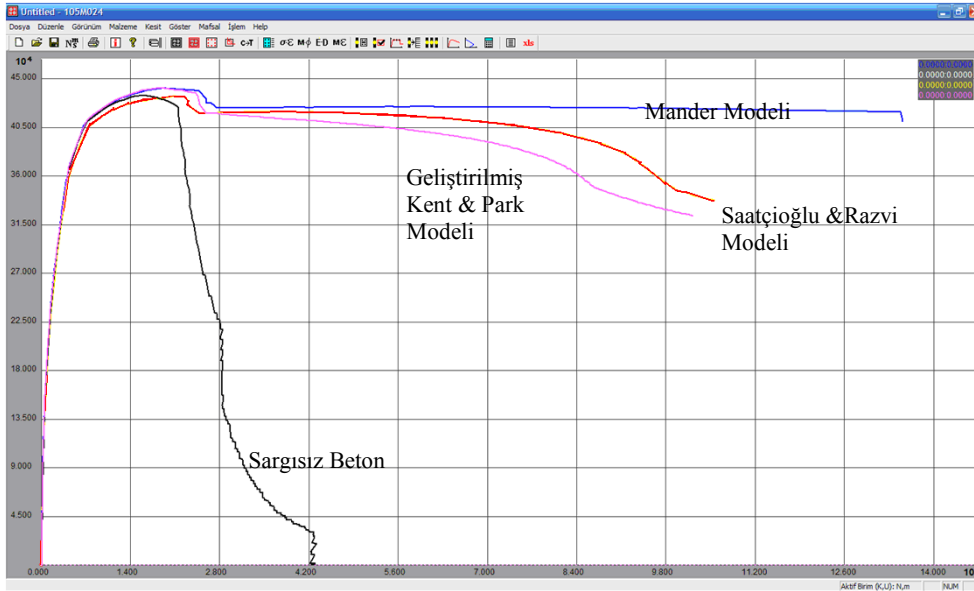
Beton Modelleri

Yazılım Hognestad sargısız beton modeli ve Geliştirilmiş Kent & Park, Mander, ve Saatçioğlu & Razvi sargılı beton modelleri olmak üzere toplam dört farklı beton modelini kullanarak kesite ait birim şekil değiştirme-dayanım eğrisini elde edebilmektedir (Hognestad, 1951; Scott vd., 1982; Mander vd, 1988; Saatcioglu ve Razvi, 1992). Bu eğriler kullanılarak dört farklı beton modeli için kesite ait moment-eğrilik ilişkisi belirlenebilmektedir. Seçilen sargılı beton modelleri literatürde sıklıkla kullanılan modeller arasındadır.



Şekil 3. Geliştirilen yazılıma ait ara yüz ve kesit özet bilgilerinden bir görüntü

Kesit özellikleri Şekil 3'te verilen üzerinde 800 000 N eksenel yük bulunan bir kolon elemana ait dört farklı beton modeli için moment-eğrilik ilişkileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi farklı beton modelleri için oldukça farklı moment-eğrilik değerleri elde edilebilmektedir. Yazılımda farklı beton modellerinin dikkate alınmasıyla kullanıcıya en uygun modelin seçilebilmesi için olanak sağlanmaktadır.



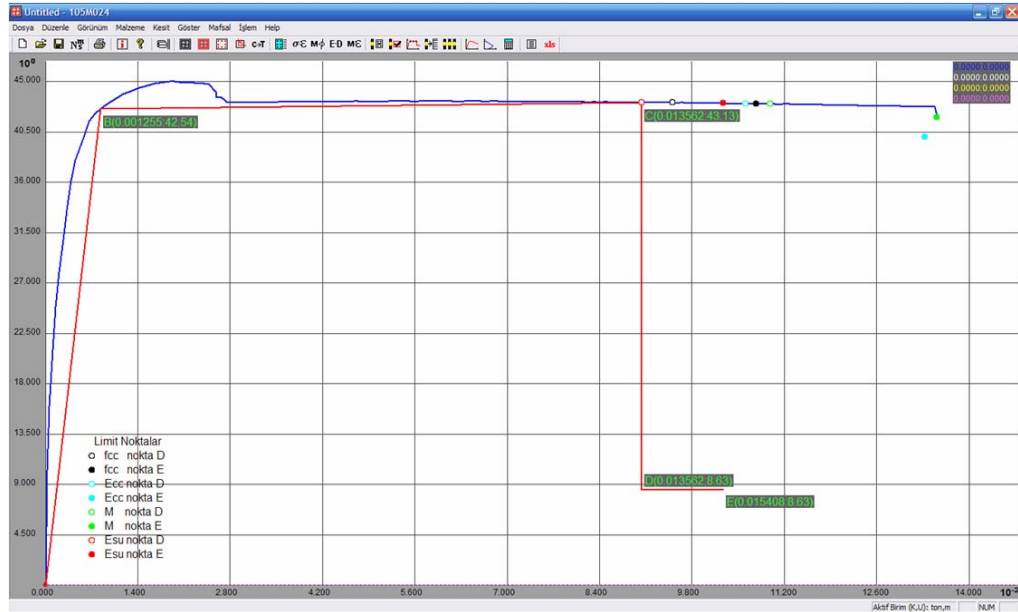
Şekil 4. Farklı beton modelleri için moment-eğrilik grafiğinin elde edilmesi

Süneklik Kriterleri

Yazılım moment eğrilik noktalarının idealleştirilmesi için C ve E noktalarının belirlenmesinde farklı kesit deformasyon kriterlerinin tanımlanmasına imkan vermektedir. C ve E noktalarının her biri için kullanıcı tarafından dört farklı kriter tanımlanabilmektedir. Bunlar: minimum beton basınç

dayanımı, maksimum çekirdek betonu birim basınç deformasyonu, minimum moment dayanım oranı (limit durumdaki moment dayanımı değerinin maksimum moment dayanım değerine oranı), maksimum çelik birim çekme deformasyonudur (Şekil 5). Hesaplanan bu değerlerin her biri moment-eğrilik grafiği üzerinde görüntülenerek hangi parametrelerin ne oranda etkiye sahip olduğu kullanıcı tarafından görülebilmektedir (Şekil 6). En küçük deformasyon değerine sahip olanlar seçilerek C ve E noktaları tanımlanmaktadır.

Şekil 5. Yazılım *Plastik Mafsali Ayarları* diyalog kutusu



Şekil 6. Moment-eğrilik ilişkisinin idealleştirilmesi ve moment-dönme ilişkisinin gösterimi

İstenmesi durumunda grafik üzerinde idealleştirilmiş moment-eğrilik ilişkisi de görülebilmektedir. B, C, D ve E noktalarının eğrilik değerlerinin plastik mafsali boyu ile çarpılmasıyla dönme değerleri elde edilmektedir. Yine istenmesi durumunda grafik üzerinde idealleştirilmiş moment-dönme davranışının koordinatları verilmektedir (Şekil 6).

Plastik Mafsali Tanımlanması ve Transferi

Yazılımda plastik mafsali boyu için literatürde yer alan üç farklı (Priestley vd.,1996; Park and Paulay, 1975; Fardis and Biskinis, 2003) denklem kullanılabilir veya kullanıcı tarafından mafsali boyu olarak herhangi bir değer girilebilmektedir (Şekil 5). Yazılım kullanılarak her bir

beton modeli için etkileşim diyagramları da elde edilebilmektedir. Yazılım tarafından hesaplan moment-eğrilik ve etkileşim diyagramı bilgileri. txt veya Excel dosyalarına aktarılabilir.

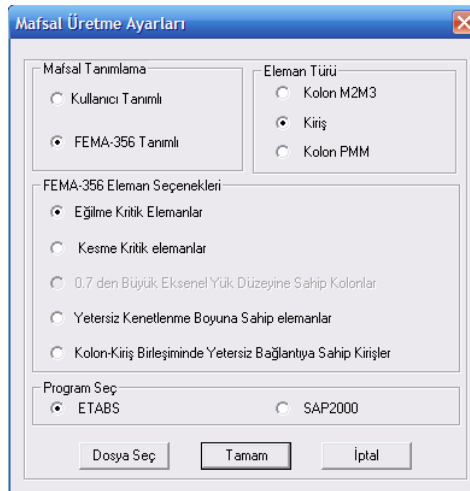
Hesaplanan tüm veriler yalnız kullanıcının bilgisine sunulmakla kalmamakta ülkemizde en yaygın olarak kullanılan analiz programlarından olan SAP2000 ve ETABS programlarına veri transfer (import) özellikleri kullanılarak aktarılabilir. Kullanıcı tarafından bilgileri girilen herhangi bir betonarme kolona ait P (eksenel yük), M2, M3 (iki asal eksen doğrultusunda moment), V2, V3 (iki asal eksen doğrultusunda kesme) mafsalsal bilgileri oluşturulmaktadır. Kolonda ekstenel yük değişimi ile moment dayanımında oluşan değişimin de hesaba katılması durumunda ekstenel yük ve iki asal eksen doğrultusunda moment dayanımının etkileşimli olarak değerlendirildiği PMM mafsalsal da tanımlanabilir. Kesitin kiriş olması durumunda M2, V3 mafsalsal bilgileri oluşturulmaktadır. Tüm bunlar yazılımda tek bir tuşa basılarak gerçekleştirilebilir.

Mafsalsal tanımlama işlemleri şu şekilde yapılmaktadır: Kesit bilgileri girildikten sonra yazılıma mafsalsal bilgilerinin oluşturulması komutu verildiğinde yazılım kesit ile ilgili verilen deformasyon sınırları ve plastik mafsalsal boyunu kullanarak moment-dönme ilişkisini hesaplayarak eğilme mafsalsal bilgilerini bir dosyaya kaydeder. Aynı şekilde kesme ve ekstenel yük mafsalsal bilgileri de hesaplanarak kaydedilir. Kesitin bir kolon olması durumunda kesit 90 derece döndürülerek tekrar eğilme ve kesme mafsalsal bilgileri hesaplanarak kaydedilir. PMM mafsalsal oluşturulmak istendiğinde kesitin her iki asal eksen doğrultusunda etkileşim diyagramı bilgileri de hesaplanarak dosyaya aktarılır. Kesitin kirişe ait olması durumunda eğilme mafsalsal bilgileri negatif ve pozitif yükleme durumu için ayrı ayrı hesaplanarak simetrik olmayan moment dönme bağıntısı elde edilmiş olur. Kiriş kesit için ekstenel yük mafsalsal hesaplanmaz ve yalnız majör eksen doğrultusunda kesme mafsalsal oluşturulur.

Kesitlere ait kesme dayanım değerlerinin hesaplanmasında TS500 veya ACI318 (2002) denklemleri kullanıcının isteğine göre kullanılabilir. Yazılım tarafından mafsalsal bilgilerinin yazıldığı dosya herhangi bir text editörü tarafından açılabilir ve kullanıcı seçimine göre SAP2000 veya ETABS programına transfer edilebilecek formattadır. Bu programların veri transfer özellikleri kullanılarak onbinlerce mafsalsal bilgisi birkaç dakikada istenilen programa aktarılabilir. Yazılımda ekstenel yük, kesme ve eğilme dayanımlarının her biri için beton ve çelik malzemede farklı güvenlik faktörleri kullanılması mümkündür.

Yazılımda *mafsalsal kabul kriterlerinin* (Hemen Kullanım, Can Güvenliği ve Göçme Önlenmesi hasar sınırları) de kullanıcı tarafından belirlenebilmesi sağlanmıştır. Bunun için kullanıcı tarafından mafsalsal plastik kapasitesinin ne kadarının kullanıldığı (Hemen Kullanım için %10, Can Güvenliği için %60 vb.) veya DBYBHY-2007’de öngörülen sınırlar dikkate alınabilir.

Ek olarak yazılım kullanıcılara FEMA-356 (2000) dökümanında kolon ve kirişler için öngörülen değerlerin kullanılabilmesi seçeneğini de sunmaktadır. Dayanım değerleri girilen kesit bilgilerine göre yazılım tarafından hesaplanırken deformasyon kapasitesi değerleri seçilen eleman durumuna göre ilgili dokümandan alınmaktadır (Şekil 7). Gerekli durumlarda verilen değerler arasında interpolasyon işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 7. Kullanıcı tanımlı yada FEMA-356 tanımlı mafsal seçim diyalog kutusu

Yazılımda istenilen birimlerde girdi ve çıktı işlemlerinin yapılması mümkündür. Yazılım kuvvet birimi olarak “N, kgf, kN ve ton”; uzunluk birimi olarak “mm, cm, m” birimlerinin istenilen kombinasyonunun kullanılmasına olanak vermektedir.

ÖZET VE SONUÇ

Ülkemiz deprem afeti açısından dünyanın en yüksek riskli bölgeleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte ülkemiz yapı stoğu büyük oranda bu gerçekle bağdaşmayacak şekilde depreme dayanıksız binalardan meydana gelmektedir. Bu durum dikkate alınarak 2007 yılında yayınlanan yeni deprem yönetmeliğine mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi için bir bölüm eklenmiştir. Bu bölümde doğrusal olmayan yöntemlere de yer verilmektedir. Özellikle doğrusal olmayan statik yöntemler daha gerçekçi kabulleri ve deplasman esaslı değerlendirmeye imkan vermesi nedeniyle son yıllarda oldukça yaygınlaşan kullanıma sahiptir. Fakat bu yöntemler halen ülkemizde lisans düzeyinde inşaat mühendisliği öğrencilerine öğretilmemekte, daha önce mezun olanlar ise çok büyük oranda bu konuları bilmemektedir. Bu durumda yönetmelikte yer alacak kadar önemli bir yöntem yurdumuz inşaat mühendislerince neredeyse hiç bilinmemektedir.

Doğrusal olmayan yöntemlerin ilk basamaklarından biri elemanların belirli bölgelerinde oluşacak plastik mafsal özelliklerinin belirlenmesidir. Yapıların tasarlanması gereği bu davranış büyük ölçüde plastik mafsalda eğilme davranışına, dolayısıyla kritik kesitlerin moment-eğrilik ilişkilerine bağlıdır. Bu ilişkinin hesaplanması için yazarlar tarafından verilen kesit özelliklerine bağlı olarak farklı sargılı beton modellerini dikkate alarak, kesitlerin moment-eğrilik ve moment-dönme ilişkilerini hesaplayan bir yazılım TUBİTAK 105M024’ nolu araştırma projesi kapsamında geliştirilmiştir. Yazılım mevcut haliyle üç farklı sargılı (Mander, Geliştirilmiş Kent ve Park, Saatçioğlu ve Razvi) ve bir sargısız (Hognestad) beton modeli ve dört farklı plastik mafsal boyu seçeneği kullanarak kesitte beton gerilme-birim deformasyonu, moment-eğrilik, idealleştirilmiş moment-dönme, etkileşim diyagramı, moment-çekirdek betonu birim deformasyonu grafiklerini hesaplayıp çizmektedir. Kesit nihai deformasyon değeri beton gerilmesi, beton basınç birim deformasyonu, moment dayanım kaybı, çelik çekme birim deformasyonu değerlerinden istenilen parametreler dikkate alınarak belirlenebilmektedir. Yazılım ayrıca, hesaplanan verileri ülkemizde yaygın olarak kullanılan SAP2000 ve ETABS programına bir text dosyası aracılığıyla aktarabilmekte ve doğrusal olmayan model hazırlanmasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Yazılımda eğilme dışı davranışları da dikkate almak için eksenel yük ve kesme mafsalları tanımlanabilmektedir. Böylece yazılım verilen kolon kesitler için P, M2, M3, V2, V3 veya PMM, V2, V3 mafsalları; kirişler için ise simetrik olmayan M3 ve V2 mafsallarını otomatik olarak oluşturmaktadır. Ayrıca istenilmesi durumunda yazılım mafsal bilgilerini FEMA-356 dokümanında verilen deformasyon bilgilerine uygun olarak da oluşturabilmektedir.

Yazılım sayesinde kullanıcılar, farklı beton dayanımı ve enine donatıya sahip kesitlerde eleman davranışının nasıl değiştiğini, farklı beton modelleri kullanılarak grafiklerle görsel halde görüp, verilen kesitler ile hızlı ve kolay şekilde doğrusal olmayan modeller hazırlayabileceklerdir. Böylelikle doğrusal olmayan davranışın inşaat mühendisleri ve öğrenciler tarafından öğrenilmesi kolaylaştırılmış olacak ve bu konuda çalışan araştırmacıların da doğrusal olmayan model hazırlama çalışmalarında kolaylık sağlanmış olacaktır. Çalışma yeni deprem yönetmeliğinin anlaşılması ve kullanımına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 105M024’ nolu proje kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

ACI Committee 318 (2002). “Building Code Requirements for Structural Concrete (318-02) and Commentary (318R-02)”. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

- DBYYHY-2007 (2007), "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- ETABS, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Fardis MN and Biskinis DE (2003) "Deformation of RC members, as controlled by flexure or shear". *Proceedings of the International Symposium Honoring Shunsuke Otani on Performance-Based Engineering for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Structures*, The University of Tokyo, Tokyo, Japan. September 8-9.
- FEMA-356 (2000) Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Hognestad E (1951) A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Pp:128.
- Inel M, Ozmen H (2006) "Effect of Plastic Hinge Properties in Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Buildings", *Engineering Structures*, 28:1494-1502.
- Krawinkler H, Seneviratna GDPK (1998) "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", *Engineering Structures*, 20, 4-6: 452-464.
- Lawson RS, Vance V, Krawinkler H (1994) "Nonlinear static push-over analysis - why, when and how?", *Proceedings of 5th US Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, Chicago, IL, pp 283-292.
- Mander JB, Priestley MJN, Park R (1988) "Theoretical stress-strain model for confined concrete". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1825.
- Mander JB (1984) Seismic Design of Bridge Piers, PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand.
- Ozcebe G, Ramirez J, Wasti T S and Yakut A (2004) "1 May 2003 Bingöl Earthquake Engineering Report", Publication No:2004/1.
- Park R, Paulay T (1975) Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Son, Inc, New York, 769 pp.
- Priestley MJN, Seible F and Calvi GMS (1996) Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Saatcioglu M and Razvi SR (1992) "Strength and Ductility of Confined Concrete". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607.
- SAP2000, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA
- Scott BD, Park R, Priestley MJN (1982) "Stress-Strain Behavior of Concrete Confinement by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," *ACI Structural Journal*, Vol. 76, No. 1, pp.13-27.
- Sezen H, Whittaker A, Elwood KJ, Mosalam KM (2003) "Performance of Reinforced Concrete Building During the August 17 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, and Seismic Design and construction Practise in Turkey", *Engineering Structures*, Vol. 25, pp:103-114.
- Sucuoğlu H (2000) "The 1999 Kocaeli and Düzce-Turkey Earthquakes", www.eerc/guncel/koca-dzc.pdf
- TS500 (2000) Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Turk Standartları Enstitüsü, Ankara