



Betonarme Kolon Tasarımında Kullanılan İki Eksenli Moment - Eksenel Yük Etkileşim Diyargamlarının Oluşturulmasında Fiber Ve Analitik Yöntemlerin Karşılaştırılması

Erkan Akpınar^{1*}, Eyüp Bingöl²

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-6576-2362), erkan.akpinar@kocaeli.edu.tr

² MUTEK Mühendislik, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0002-0298-7887), eyupbingol59@gmail.com

(International Conference on Design, Research and Development (RDCONF) 2021 – 15-18 December 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.1043708)

ATIF/REFERENCE: Akpınar, E. & BİNGÖL, E. (2021). Betonarme Kolon Tasarımında Kullanılan İki Eksenli Moment - Eksenel Yük Etkileşim Diyargamlarının Oluşturulmasında Fiber Ve Analitik Yöntemlerin Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 917-927.

Öz

Betonarme yapılarda kolonlar, gerek yapı ağırlığı gibi düşey yükler etkisinde, gerekse deprem gibi yatay etkiler altında, yapının ayakta kalmasını sağlayan düşey taşıyıcı elemanlardır. Kolonlar, yapılarda düşey yönlü eksenel yüklerle birlikte yatay kuvvetleri de karşılamak üzere tasarlanmaktadır. Taşıyıcı elemanların moment kapasiteleri, üzerindeki eksenel yük seviyesi ile birlikte değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle modern yapı şartnamelerinin tünümde olduğu üzere, eksenel yükün göz ardı edilemeyecek seviyede olduğu taşıyıcı elemanların tasarımında bu değişkenlik, moment – eksenel yük etkileşim ilkeleri ile tasarıma dahil edilmek zorundadır. Moment – eksenel yük etkileşim diyagramları, kolonların tasarımında bu değişkenliği hesaba katmak için kullanılmaktadır. Kolonlar için etkileşim diyagramlarının analitik olarak oluşturulması, tek eksenli moment durumu için oldukça basit denebilecek bir işlemdir. Ancak gerçekte olduğu gibi iki eksenli moment etkisi altında bu etkileşimin ortaya konulması, karmaşık hale gelmektedir. Kesitin derinlik boyunca dilimlere/parçalara ayrılarak, birim deformasyon profiline bağlı gerilme ve bunun yanında alanlara bağlı bileşke kuvvet hesaplarının, bu dilimler/parçalar üzerinde yapılmasına ve parçalarda elde edilen etkilerin birlikte hesaba katılarak sonuçların elde edilmesine, fiber yöntemle kesit analizi ismi verilmektedir. Elemanların moment kapasiteleri ve etkileşim diyagramları, analitik yöntemin yanında fiber analiz yöntemiyle de elde edilebilmektedir. Pratikte sıklıkla kullanılan analiz programları, kesit analizleri ve kolon tasarımları için bu yöntemleri kullanmaktadırlar. Bu çalışmada iki eksenli moment – eksenel yük etkileşim diyagramının elde edilmesi adına, analitik yöntem için bir algoritma kurgulanmıştır. Literatürde ve kaynaklarda tek eksenli eğilme altında oldukça basit olarak açıklanan bolca örneğe yer verilen etkileşim diyagramları, iki eksenli durumda tasarım mühendisleri için oldukça karmaşık hale gelmektedir. Genelde iki eksenli duruma yönelik açıklamalı örneğe pek rastlanmayan etkileşim diyagramları için açıklayıcı örnekler ve bilgisayar programı algoritması oluşturulmuştur. Kesit analizinde, XTRACT programında fiber analiz yöntemi kullanılırken, oluşturulan algoritmada ve Section Designer modülünde analitik yöntemden faydalanılmıştır. Analitik yöntemi temel alan bilgisayar programıyla kesit analizi yapılarak elde edilen iki eksenli etkileşim diyagramları, aynı analitik yöntemi kullanarak elde edilen SAP2000 Section Designer modülü sonuçları ile kıyaslanmıştır. Her iki analitik yöntem sonuçları ise fiber analiz yöntemini baz alan XTRACT programı yardımıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen etkileşim diyagramı grafiklerinin karşılaştırılmasından, analitik yöntemle ulaşılan sonuçların güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. Tek eksenli durum için analitik yöntemin ve fiber yöntemin, benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ancak fiber analiz yönteminde, özellikle beton üzerindeki gerçek gerilme dağılımının ve malzeme davranış modelinin göz önüne alınabilmesi sebebiyle, iki eksenli moment etkisi durumunda daha gerçekçi sonuçların elde edilebildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Kolon, Moment – Eksenel Yük Etkileşim Diyagramı, Kesit Analizi, Fiber Yöntemle Kesit Analizi

* Sorumlu Yazar: erkan.akpinar@kocaeli.edu.tr

Comparison of Fiber and Analytical Methods for Construction of Biaxial Moment – Axial Load Interaction Diagrams for Reinforced Concrete Column Design

Abstract

Columns in reinforced concrete structures are vertical load-bearing elements that allow the structure to stand under the influence of vertical loads such as the weight of the structure and lateral effects such as earthquakes. Columns are designed to withstand lateral forces as well as vertical axial loads in structures. The moment capacities of load-bearing elements vary with respect to the axial load level on them. For this reason, as in all modern building codes, this variability must be included, with the principles of moment - axial load interaction, in the design of load-carrying elements where the axial load cannot be ignored. Moment – axial load interaction diagrams are used to account for this variability in the design of columns. Analytical generation of interaction diagrams for columns is a fairly simple process as far as uniaxial moment is concerned. However, introducing this interaction under the effect of biaxial moment, as in reality, becomes complicated. The process of dividing a cross-section into slices/pieces along the depth, calculating the stress due to the unit deformation profile, as well as the resultant force with respect to the areas of these slices/pieces, and obtaining the resultant effect of the calculations acquired from these pieces, is called the cross-sectional analysis with fiber method. The moment capacities and interaction diagrams of structural members can be obtained by the analytical method as well as fiber analysis method. Analysis programs, which are frequently used in practice, use these methods for cross-sectional analysis and column designs. In this study, an algorithm for the analytical method is constructed in order to obtain the biaxial moment – axial load interaction diagram. Interaction diagrams, which are explained quite simply under uniaxial bending in the literature and other resources, with plenty of examples, become quite complex for design engineers in the biaxial case. Explanatory examples and a computer algorithm have been created for interaction diagrams, which are not often encountered for the biaxial situation. In the cross-sectional analysis, the fiber analysis method was used in the XTRACT program, while the analytical method was used in the created algorithm and the SAP2000 Section Designer module. Biaxial interaction diagrams obtained by performing cross-sectional analysis with a computer program based on the analytical method were compared with the results of the SAP2000 Section Designer module based on the same analytical method. The results of both analytical methods were compared with the results obtained with the help of the XTRACT program based on the fiber analysis method. From the comparison of the interaction diagram graphs, it was observed that the results obtained by the analytical method were on the safe side. It has been determined that the analytical method and the fiber method give similar results for the uniaxial case. However, in the fiber analysis method, it has been observed that more realistic results can be obtained in the case of biaxial moment effect, especially since the actual stress distribution on the concrete and the material behavior model can be taken into account.

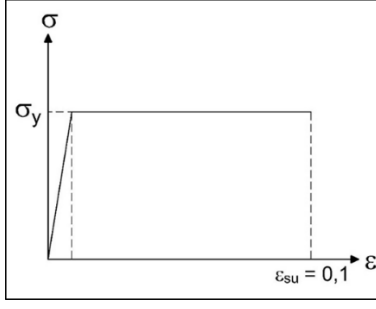
Keywords: Reinforced Concrete, Column, Moment – Axial Load Interaction Diagram, Cross-Sectional Analysis, Cross-Sectional Analysis with Fiber Method

1. Giriş

Kolonlar, özellikle betonarme perde duvar veya çapraz eleman bulunmayan yapılarda, düşey yüklerin güvenle zemine aktarılmasını ve yatay yüklerin taşınmasını sağlayan elemanlardır. Kolonların tasarımında ve/veya imalatında oluşabilecek herhangi bir problem, yapı güvenliğini tek başına tehlikeye atabilir. Betonarme kolonların tasarımı, hem düşey hem de yatay yük taşıma zorunluluğundan dolayı, söz konusu iki etkinin birlikte değerlendirildiği moment (M) – eksenel yük (N) etkileşimi gözetilerek yapılmak zorundadır. Zira eksenel yükün, betonarme kesitlerin moment kapasitesi üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Deprem doğrultusu, bina yerleşimi ve binadaki kütlelerin dağılımı, kolonlar üzerinde değişken açılarda eğilme momenti oluşmasına sebep olmaktadır. Deprem etkisinin yanında, binadaki düşey yüklerin mekansal farklılıkları kolonlar üzerinde, sabit veya göreceli uzun sürede değişkenliğe sahip, iki eksenli eğilme momentlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Açıkça anlaşıldığı üzere, kolonlar moment etkisi anlamında, genellikle çok eksenli eğilme etkisi altında olan elemanlardır.

Prizmatik şekle sahip betonarme kolonların tasarımı, genelde hâkim olan düşük seviyedeki mühendislik pratiğinde, ana

eksenleri baz alınarak, iki ana eksen için ayrı ayrı olmak üzere, tek eksenli eğilme ve eksenel kuvvet etkileşimi göz önüne alınarak yapılmaktadır (Tek eksenli bileşik eğilme, $N-M_x$ ve $N-M_y$). Kolon kesitinin iki ana ekseninde elde edilen etkileşim diyagramlarının ortak etkisi, literatürde yer alan ve şartnamelere de girmiş bulunan amprik formüllerle hesaba katılmaktadır. Bresler Yöntemi, İngiliz Betonarme Yönetmeliği Yöntemi ve Çakıroğlu-Özer Yöntemi, kolonların tasarımında tek eksenli bileşik eğilme sonuçlarından yararlanarak, eğik eksenli bileşik eğilme etkisini yaklaşık olarak hesaplamak için kullanılan yöntemler olarak sayılabilir (Ersoy ve Özcebe 2012). Doğrudan eğik eksenli bileşik eğilme yerine, tek eksenli bileşik eğilme hesabının tercih edilmesinin sebebinin, teknik hesaplama kabiliyetinin ve bilgisayar olanaklarının sınırlı olduğu eski zamanlardan kalma, basitleştirilmiş çözümleme yaklaşımı ve alışkanlığı olduğu düşünülmektedir ki halen daha bu yaklaşımın süregeldiği bilinmektedir. Günümüz hesaplama kabiliyetinin ve hızının artmasına bağlı olarak, ortalama ve yüksek seviyedeki mühendislik pratiğinde ise kolonlara etkiyen iki ana eksendeki eğilme momentleri ve eksenel kuvvetin etkileşimi aynı anda göz önüne alınarak, olması gerektiği gibi bir bütün olarak kolon tasarımına konu edilmektedir (Eğik eksenli bileşik eğilme, $N-M_x-M_y$). Gerçekte kolonlar üzerindeki açılı kuvvet etkisinin doğrudan değerlendirildiği eğik eksenli bileşik eğilme sonuçlarıyla, iki ana

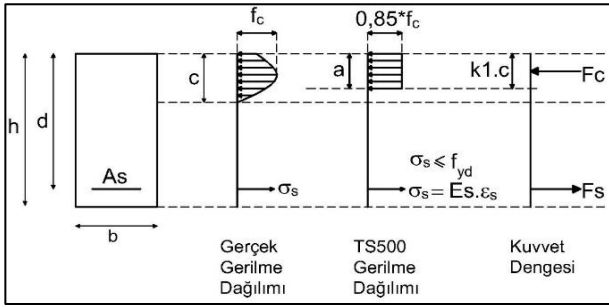


Şekil 2.2: Varsayılan donatı çeliği elasto-plastik davranışı

e. Hesaplarda kolaylık sağlaması amacıyla, gerçek beton basınç gerilmesi dağılımı yerine, eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu kullanılabilir. Eşdeğer basınç gerilmesi $0,85 \cdot f_{cd}$ ve eşdeğer blok yüksekliği $a = k_1 \cdot c$ olduğu varsayım yapılır. Kullanılacak olan k_1 değerleri TS500-2000 Çizelge 7.1'den alınmaktadır. Burada göz ardı edilmemesi gereken nokta, TS500-2000'e göre söz konusu hesaplardaki eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu için kullanılan k_1 değeri, C50 sınıfı beton seviyesine kadar tanımlanmış olduğudur. Daha yüksek sınıftaki betonlara ait basitleştirilmiş eşlenik davranışlar için ilgili sınıfa uygun basitleştirmeler ve katsayılar kullanılmalıdır.

Bu varsayımların yanında, TS500-2000'e göre yapılmakta olan standart kesit analizinde, betonun zamana bağlı davranışının ve kesme davranışının ihmal edildiği unutulmamalıdır.

Yukarıda verilen varsayımlar ışığında, betonarme kesitlerde taşıma gücü ilkelerine göre yapılacak eğilme hesaplarında temel alınan birim deformasyon ve gerilme dağılımları ve bileşke kuvvetlerin gösterimi Şekil 2.3'te yer almaktadır.



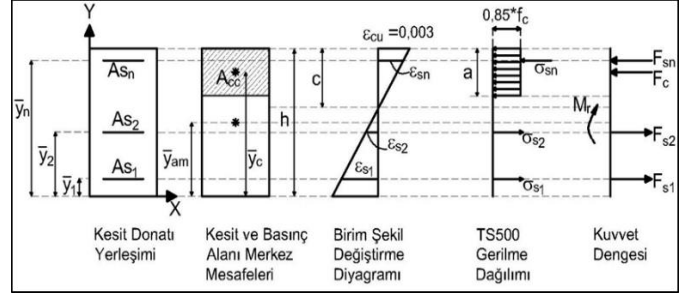
Şekil 2.3: Kesit analizinde kullanılan TS500 ile uyumlu birim deformasyon ve gerilme dağılımlarının gösterimi

2.1.1. Basit Eğilme Etkisinde Moment Kapasitesinin Hesaplanması

Eksenel basınç yükününün (N), $f_c \cdot A_c$ eksenel basınç kapasitesine (N_0) oranı belirli bir değerden küçük olan elemanlar, eğilme hesaplarında eksenel yükün etkisi ihmal edilerek, basit eğilme elemanı olarak tanımlanır. TS500-2000 ve T.B.D.Y.-2018'de bu oran (N / N_0) 0,1 olarak tanımlanmıştır.

Taşıma gücü yöntemine göre, kesitte basınç bölgesinde, en dıştaki beton lifi $\epsilon_{cu} = 0,003$ 'e ulaştığı andaki kurulan denklemleri ile moment kapasitesi hesaplanmaktadır. Moment kapasitesi hesabında ilk adım olarak tarafsız eksen c 'nin bulunması ile ilgili uygunluk denklemlerinden yararlanılır (Ref Ersoy kitap). Ancak bu çalışma kapsamında, bilgisayar ortamında yapılacak kesit analizlerinde, iteratif deneme yanılma

yöntemi kullanılmış olup, denge denklemi kurulduktan sonra öncelikle c varsayımı yapılmış ve iterasyon ile denge denklemini sağlayan doğru c değeri elde edilmiştir. Kesitin denge denkleminin türetildiği dağılımlar ve bileşke kuvvetler, Şekil 2.4'de görülmektedir. Bu iteratif yöntem ile kesit göçme türünden ve şekilden bağımsız olarak c elde edilebilmektedir.



Şekil 2.4: Basit eğilme için kesit analizinde genel kuvvet dengesinin gösterimi

Basit eğilme etkisi altında, kesit analizinde kullanılan söz konusu iteratif yöntemin genel adımları, şu şekilde sıralanabilir.

Mantıklı olabilecek bir c varsayımı yapılır.

Taşıma gücü durumu için birim şekil değiştirme dağılımı kesit üzerinde çizilir. Üçgen benzerlikleri kullanılarak, her bir donatı alanı A_s için ϵ_s değerleri işareti ile hesaplanır (Denklem 2.2).

$$\epsilon_s(i) = (c - h + \bar{y}(i)) \left(\frac{\epsilon_{cu}}{c} \right) \quad (2.2)$$

Donatı çeliğinin elasto-plastik davranışına bağlı kalarak ve Denklem 2.1'de verilen gerilme ilişkisi kullanılarak, her bir donatı alanı, A_s için gerilme değerleri, σ_s yönü ile hesaplanır (Denklem 2.3).

$$\sigma_s(i) = \epsilon_s(i) E_s \quad (|\epsilon_s| < f_y / E_s) \quad (2.3a)$$

$$\sigma_s(i) = f_y \quad (|\epsilon_s| \geq f_y / E_s) \quad (2.3b)$$

Denge denkleminde, donatı alanlarındaki bileşke kuvvet değerleri, her bir alanın karşılığındaki gerilme değerleriyle çarpılarak, yönü ile birlikte bulunmaktadır (Denklem 2.4). Beton bileşke kuvvetinin yönü, pozitif yön olarak kabul edilmiştir.

$$F_s(i) = \sigma_s(i) A_s(i) \quad (2.4)$$

Eşdeğer basınç bloğunun etkidiği alan A_{cc} , dikdörtgen kesitlerde Denklem 2.5 ile bulunmaktadır.

$$A_{cc} = a \cdot b \quad a = k_1 c, \quad a < h \quad (2.5)$$

Eşdeğer basınç bloğunun etkidiği alan ile eşdeğer basınç gerilmesinin çarpılmasıyla, betonda oluşan basınç bileşke kuvveti elde edilir (Denklem 2.6).

$$F_c = 0,85 f_c A_{cc} \quad (2.6)$$

Kesite etkiyen eksenel yük olmadığı için denge denklemi, beton ve donatı bileşke kuvvetleri kullanılarak kurulur (Denklem 2.7). Donatı bileşke kuvvetleri, Denklem 2.2'den itibaren yönleri ile türetildiğinden dolayı, herhangi bir işaret karmaşası bulunmamaktadır.

$$F_c + \sum_{i=1}^n F_s(i) = 0 \quad (2.7)$$

Birinci adımda varsayılan tarafsız eksen c değeri, Denklem 2.7'deki eşitlik sağlanana kadar değiştirilerek doğru c değerine ulaşılır.

Moment kapasitesi M_r , tüm kuvvetlerin kesitin ağırlık merkezine göre moment alınması ile hesaplanır (Denklem 2.8). M_r hesabında saat yönünün tersi pozitif kabul edilmiştir.

$$M_r = \sum_{i=1}^n F_s(i) (\bar{y}(i) - \bar{y}_{am}) + F_c(\bar{y}_c - \bar{y}_{am}) \quad (2.8)$$

Dikdörtgen kesitler için kesit ağırlık merkezinin ve basınç bileşke kuvvetinin yerleri, Denklem 2.9 yardımı ile elde edilir.

$$\bar{y}_{am} = \frac{h}{2} \quad (2.9a)$$

$$\bar{y}_c = h - \frac{k_1 c}{2} \quad (2.9b)$$

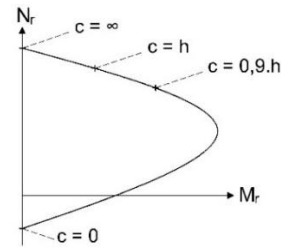
2.1.2. Tek Eksenli Bileşik Eğilme Durumunda Moment Kapasitesinin Hesaplanması

Eğilme etkisine ve ihmal edilemeyecek seviyede eksenel yüke maruz kalan elemanların tasarımı, moment – eksenel yük etkileşimi göz önüne alınarak, bileşik eğilme etkisinde yapılmaktadır. TS500-2000 ve T.B.D.Y.-2018' de bileşik eğilme tasarımı yapılması gereken eksenel yük oranı (N / N_0) alt sınırı %10 olarak tanımlanmıştır. Eksenel yük seviyesi, kesit moment kapasitesi üzerinde değişkenliğe sebep olmaktadır. Bileşik eğilmeye göre tasarımda ve moment (M_r) – eksenel yük (N_r) etkileşim hesaplarında, bu değişkenlik belirlenmektedir. Buna göre kesit moment kapasitesi, farklı eksenel yük değerleri için belirlenmekte ve kesit moment kapasitesi tekil bir değer yerine bir zarf eğrisi şeklinde tespit edilmekte, dışmerkezliğe bağlı olarak $N_r - M_r$ etkileşim diyagramı üretilmektedir. Tek eksenli bileşik eğilme durumunda, kesit üzerinde sadece ortogonal olan tek bir eksen etrafındaki eğilme etkisi ve eksenel kuvvet etkileşimi göz önüne alınmaktadır.

Basit eğilme durumunun incelendiği Bölüm 2.1.1'de verilen tüm denklemler, denge denklemi hariç aynı şekilde oluşturulur ve aynı adımlar gerçekleştirilir. Denklem (2.7)'de yer alan statik denge denklemi, N_r eksenel basınç yükü de dikkate alınarak kurgulanır (Denklem 2.10).

$$N_r = F_c + \sum_{i=1}^n F_s(i) \quad (2.10)$$

Tarif edilen adımların uygulanması ile kesite etkideği varsayılan herhangi bir eksenel yük değeri için statik dengeyi sağlayan tarafsız eksen derinliği ve buna bağlı moment kapasitesi elde edilebilmektedir. Etkileşim diyagramının daha pratik eldesi için söz konusu adımlar, eksenel yük varsayımı ve itirasyonu yerine, $c=0$ ve $c=\infty$ tarafsız eksen derinliği değerleri arasında varsayım ve iterasyon kullanılarak tekrarlanabilir. Varsayılan her bir c adımı, basit eğilme bölümündeki denklemler ile eksenel dış kuvvetin hesaba katıldığı Denklem 2.10'daki statik denge denklemi sağlanır. İlgili c için elde edilen sonuçlarla birlikte eksenel kuvvetin etkisi de hesaba katılarak, Denklem 2.8 yardımıyla moment kapasitesi, M_r belirlenir (Ersoy ve Özcebe 2012). Farklı c değerleri için elde edilen N ve M değerleri kullanılarak, moment – eksenel kuvvet karşılıklı etki diyagramı Şekil 2.6'da görüldüğü gibi oluşturulur.



Şekil 2.6: Moment – eksenel kuvvet karşılıklı etki diyagramı

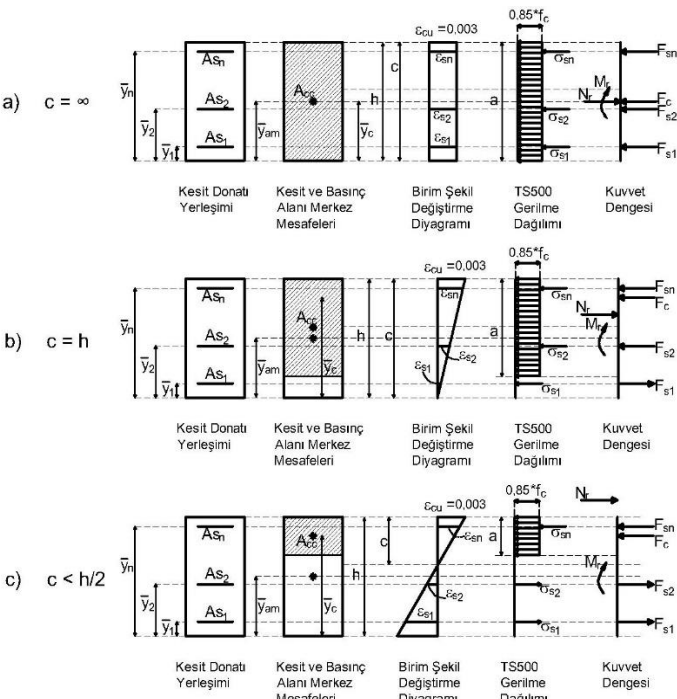
2.1.2. İki Eksenli Bileşik Eğilme Durumunda Moment Kapasitesinin Hesaplanması

İki eksenli bileşik eğilme durumu, kesit üzerindeki eğilme etkisinin ortogonal bir eksen etrafında değil, rastgele bir açı ile oluşan eksen etrafında olduğu zorlama durumudur. Tek eksenli bileşik eğilme durumunda, eşdeğer basınç bloğunun alanı A_{cc} , kesitin formuna uygun olarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Ancak iki eksenli bileşik eğilme durumunda A_{cc} , açı parametresi ile dikdörtgen kesitler için, üçgen, yamuk veya dörtgen formunda olabilir (Doğangün 2013). İki eksenli bileşik eğilmenin analitik çözümü, farklı alan hesapları ve koordinat dönüşümleri ile yapılabilmektedir.

Her farklı eksen açısı değeri için yeter sayıda c varsayımıyla ilgili açıda, ortogonal eksenlere ilişkin M_{rx} ve M_{ry} etkileşim diyagramı çıkartılabilmektedir.

Şekil 2.7'de görüleceği üzere beton basınç bloğu alanı, basit eğilme ve tek eksenli bileşik eğilme durumlarında olduğu gibi doğrudan eşdeğer basınç bloğu alanı olarak hesaplanabilmektedir.

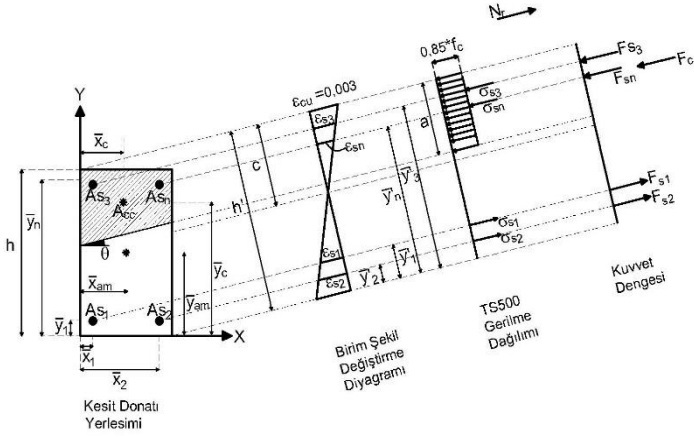
Eğik düzlemdeki donatı uzamalarını hesaplayabilmek için ortogonal eksenlere göre tanımlanmış durumda olan donatı çubuklarının mesafeleri ve kesit yüksekliği h üzerinde, Denklem 2.11 ve Denklem 2.12 kullanılarak koordinat dönüşümü işlemleri yapılır.



Şekil 2.5: Farklı tarafsız eksen değerlerine göre denge durumları a) $c=\infty$, b) $c=h$, c) $c < h/2$

$$h' = b \sin \theta + h \cos \theta \quad (2.11)$$

$$\bar{y}'(i) = \bar{x}(i) \sin \theta + \bar{y}(i) \cos \theta \quad (2.12)$$



Şekil 2.7: Genel kuvvet dengesinin kurulması

Yeni oluşturulan dönüştürülmüş mesafelerle, sırasıyla donatı uzamaları, donatı gerilmeleri, donatı kuvvetleri, beton bileşke kuvveti hesaplanır ve statik denge denklemi bağıntısı sağlanır (Denklem 2.13 – Denklem 2.17).

$$\varepsilon_s(i) = (c - h' + \bar{y}'(i)) \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{c} \right) \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..1})$$

$$\sigma_s(i) = \varepsilon_s(i) E_s \quad (|\varepsilon_s| < f_y / E_s) \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..2})$$

$$\sigma_s(i) = f_y \quad (|\varepsilon_s| \geq f_y / E_s) \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..3})$$

$$F_s(i) = \sigma_s(i) A_s(i) \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..4})$$

$$F_c = 0,85 f_c A_{cc} \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..5})$$

$$N_r = F_c + \sum_{i=1}^n F_s(i) \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..6})$$

Statik denge denklemi kurulduktan sonra ortogonal eksenlere göre aranan eğilme momenti, ilgili yöndeki kuvvet kolları kullanılarak elde edilir (Denklem 2.18 – Denklem 2.20).

$$M_{rx} = \sum_{i=1}^n F_s(i) (\bar{y}(i) - \bar{y}_{am}) + F_c |\bar{y}_c - \bar{y}_{am}| \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..7})$$

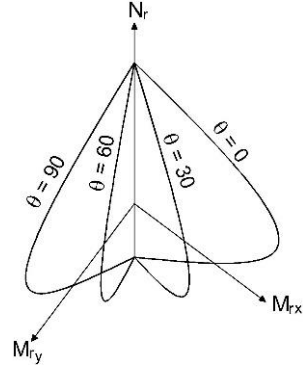
$$M_{ry} = \sum_{i=1}^n F_s(i) (\bar{x}(i) - \bar{x}_{am}) + F_c |\bar{x}_c - \bar{x}_{am}| \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..8})$$

$$M_r = \sqrt{M_{rx}^2 + M_{ry}^2} \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..9a})$$

kaynağı bulunamadı..8)

Yeterli sayıda açı değerleri için M_{rx} , M_{ry} ve N_r değerleri elde edilerek, üç boyutlu moment – aksel yük etkileşim yüzeyi Şekil 2.8'deki gibi oluşturulur.

Yukarıda belirtilen işlem adımlarında A_{cc} 'nin hesabı, basınç bloğunun formuna göre karmaşık hale gelebilmektedir. Ancak temel analitik geometri bilgisiyle veya daha ileri seviye sayısal çözümlene metotları ile bu alan hesaplanabilmektedir. Dikdörtgen kesitlerde eşdeğer basınç bloğu alanı için $k_1 c$ ve θ değerlerine bağlı olarak, 0° ile 90° arasında geçerli olan dört tip



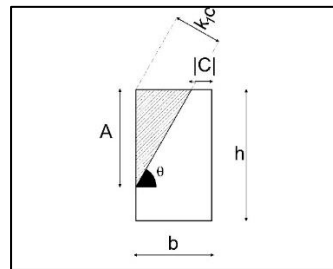
Şekil 2.8: Üç boyutlu etkileşim yüzeyi

alan formu hesaplanmıştır. Bu hesaplarda A, B ve C katsayıları temel analitik geometri ve benzerlik formülleri kullanılarak türetilmiştir (Denklem 21). Söz konusu dört farklı tip alana ait görseller Şekil 2.9'da, Şekil 2.10'da, Şekil 2.11'de ve Şekil 2.12'de yer almaktadır.

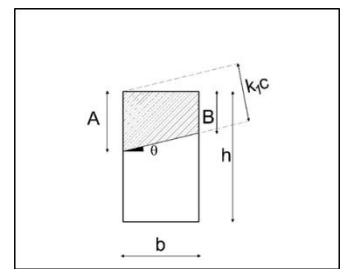
$$A = \frac{k_1 c}{\cos \theta} \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..9a})$$

$$B = A - b \cdot \tan \theta \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..10b})$$

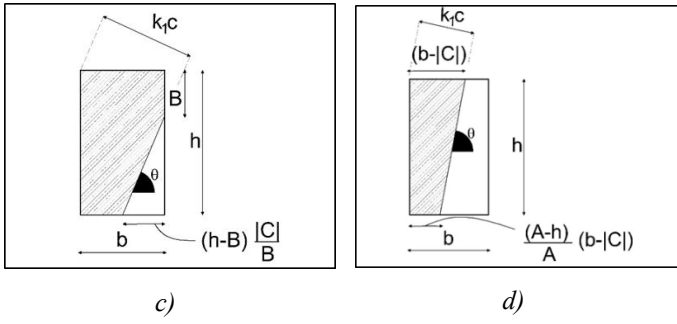
$$C = \frac{B}{\tan \theta} \quad (\text{Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..11c})$$



a)



b)



Şekil 2.9: Eğik eğilme için tanımlanan dört farklı tipteki eşdeğer basınç bloğu alanları a) $A < h$ ve $B < 0$ durumu, b) $A < h$ ve $B > 0$ durumu, c) $A > h$ ve $B > 0$ durumu, d) $A > h$ ve $B < 0$ durumu

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında, Bölüm-2’de anlatılan analitik yöntemlerle, üç boyutlu moment – aksenal kuvvet etkileşim zarfi oluşturulmuştur. Oluşturulan etkileşim zarf diyagramları, SAP-2000 Section Designer modülünden ve XTRACT programından elde edilen zarf diyagramları ile karşılaştırılmıştır (SAP2000 2005, Xtract 2001).

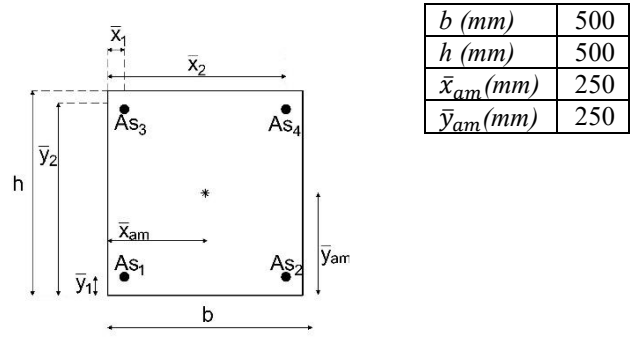
XTRACT programı fiber modele göre çözüm yapmaktadır. Program, malzemeler için gerçek davranış modellerini kullanmak üzere tasarlanmıştır. Çalışmadaki kesit analizleri için programda donatı modeli, TS500-2000 varsayımında olduğu gibi elasto plastik olarak tanımlanmıştır. Diğer sonuçlar ile kıyaslama yapabilmek amacıyla, eşdeğer basınç bloğu varsayımında kullanıldığı üzere, beton dayanımı $0,85 f_c$ olacak biçimde beton modeli oluşturularak programa tanımlanmıştır (Xtract 2001).

SAP2000 programında fiber model yerine ϕ katsayısı olmaksızın ACI 318-14 yönetmeliğine göre çözüm tercih edilmiştir. Eşdeğer basınç bloğu varsayımı, uygulamalarda kullanılan C25 beton dayanımı için TS500 ile aynıdır (SAP2000 2005)

Bu durumda, Bölüm 2’de algoritması verilen ve çalışmada bir bilgisayar kodu yazılarak kullanılan analitik yöntem ile SAP2000 Section Designer modülü sonuçlarının yakın olması beklenmektedir. Kurgulanan analitik hesap metoduna dayanan programda, diğer iki programdan farklı olarak donatı çubuk alanlarının beton basınç bloğu alanından çıkartılmamıştır.

3.1. Simetrik Donatılı Kare Kesit için Üç Boyutlu Etkileşim Yüzeyinin Oluşturulması

Bu bölümde, iki ana eksene göre simetrik donatılı, kare bir betonarme kesit için Bölüm 2’de açıklanmış hesap adımlarından oluşan ve analitik yöntemin baz alındığı bilgisayar programı sonuçları ile SAP2000 Section Designer modülü ve XTRACT programı sonuçları karşılaştırılmıştır.



b (mm)	500
h (mm)	500
\bar{x}_{am} (mm)	250
\bar{y}_{am} (mm)	250

Şekil 3.1: Simetrik donatılı kare kesite ait görünüm ve boyut bilgileri

Tablo 3.1: Donatı Bilgileri

No	x (mm)	y (mm)	çap (mm)
1	35	35	20
2	35	465	20
3	465	465	20
4	465	35	20

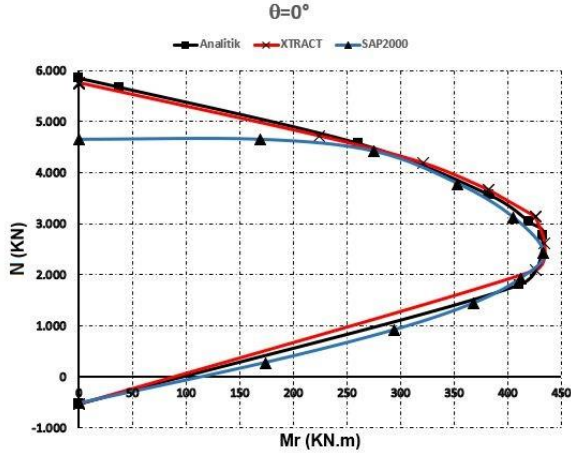
Şekil 3.1’de, üzerinde hesaplamaların yapıldığı, simetrik donatılı kare kolonun kesit görüntüsü ve boyutlara ilişkin bilgiler yer almaktadır. Tablo 3.1’de ve Tablo 3.2’de, sırasıyla, donatı yerleşim bilgileri ve malzeme özellikleri görülmektedir.

İncelenen kesit simetrik olduğundan dolayı, 0° , 30° ve 45° açıları için etkileşim diyagramları oluşturulmuş durumdadır. Bu değerlerin devamındaki eşlenik açılar için diyagramlar aynıdır (0° ile 90° ve 30° ile 60°).

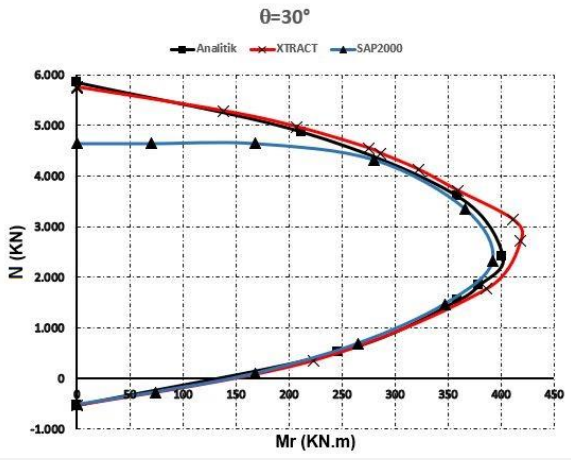
Tablo 3.2: Malzeme Bilgileri

Beton	ϵ_{cu}	0,003
	f_c (Mpa)	25
	k_1	0,85
Çelik	f_y (Mpa)	420
	E_s (Mpa)	200.000

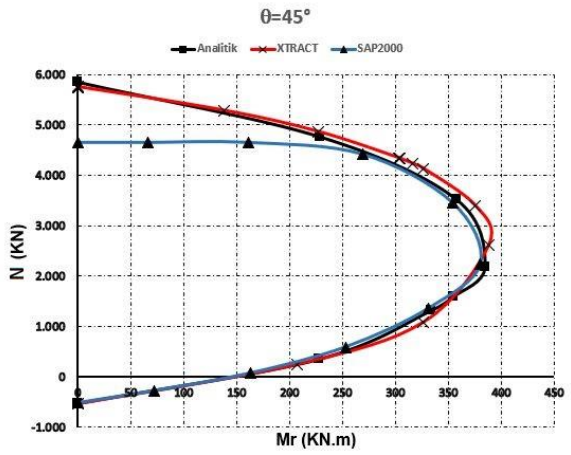
Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, SAP2000 kesit analizi sonuçlarında, aksenal yük kapasitesi değerleri belirli bir seviyeden sonra sabit kalmaktadır. SAP2000 Section Designer modülü, hesap temeli olarak kullanmakta olduğu ACI-318-14’e göre aksenal tasarım dayanımını sınırlamaktadır ve grafiplerde söz konusu yatay çizgi, bu nedenle ortaya çıkmaktadır (ACI 318-14 2014). Değerlendirmelerde bu sınır değere göz ardı edilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 3.2: Simetrik donatılı kare kesit için $\Theta = 0^\circ, 30^\circ$ ve 45° açılarındaki moment – eksenel yük etkileşim diyagramları

Şekil 3.2 a'daki durumda, $\Theta = 0^\circ$ olduğu için M_{ry} etkisi bulunmamakta ve söz konusu durumda salt $N-M_{rx}$ etkileşimi görülmektedir. Her üç yol ile elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu, çekme etkin bölgede oldukça küçük bir farklılaşmanın bulunduğu belirlenmiştir.

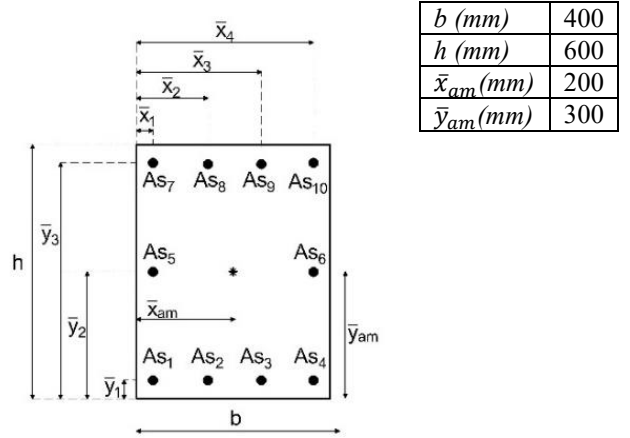
Şekil 3.2 b'deki $\Theta = 30^\circ$ durumuna göre, kurgulanan analitik yöntem ve SAP2000 sonuçlarının birbirine çok yakın çıktığı, buna karşın bu sonuçların özellikle denge bölgesinde, XTRACT programından elde edilenden görece olarak farklı olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 3.2 c'ye göre $\Theta = 45^\circ$ durumuna, SAP2000 sonuçları ile kurgulanan analitik yöntem sonuçlarının, yine birbirine çok yakın olduğu ve XTRACT programı sonuçlarının diğer sonuçlara yakın olduğu görülmüştür (aradaki fark, $\Theta = 30^\circ$ için oluşandan çok daha azdır ve farklılık basınç etkin bölgeye kaymıştır).

Her üç kesit analizine ait etkileşim diyagramlarının, birbirinden farklı eksenel yük noktalarında türetilbildiği ve bu noktaların düzleştirilmiş çizgilerle birleştirildiği göz ardı edilmemelidir. Buradaki sayısal uygulama için $\Theta = 30^\circ$ eğik eksen durumuna ait örnek hesap özetleri, Tablo 3.3 'de gösterilmiştir.

3.2. Asimetrik Donatılı Dikdörtgen Kesit için Üç Boyutlu Etkileşim Yüzeyinin Oluşturulması

Bu bölümde, iki ana eksenle göre asimetrik donatılı, dikdörtgen bir betonarme kesit için Bölüm 2'de açıklanmış hesap adımlarından oluşan ve analitik yöntemin baz alındığı bilgisayar programı sonuçları ile SAP2000 Section Designer modülü ve XTRACT programı sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3: Asimetrik donatılı dikdörtgen kesite ait görünüm ve boyut bilgileri

Tablo 3.4: Donatı Bilgileri

No	x (mm)	y (mm)	çap (mm)
1	35	35	16
2	145	35	16
3	255	35	16
4	365	35	16
5	35	265	16
6	365	265	16
7	35	565	16
8	145	565	16
9	255	565	16
10	365	565	16

Tablo 3.5: Malzeme Bilgileri

Beton	ϵ_{cu}	0,003
	f_c (Mpa)	25
	k_1	0,85
Çelik	f_y (Mpa)	420
	E_s (Mpa)	200.000

İncelenen kesit asimetrik olduğundan dolayı $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90° açıları için etkileşim diyagramları ayrı ayrı oluşturulmuş durumdadır.

Şekil 3.4'deki etkileşim diyagramlarında görüldüğü gibi Bölüm 3.1'de olduğu gibi burada da SAP2000 kesit analizi sonuçlarında, eksenel yük kapasitesi belirli bir değerde sabit kalmakta. Bu durum açıklanmış olduğu üzere ilgili programın baz aldığı şartname kaynaklıdır ve bu çalışmadaki değerlendirmelerde göz ardı edilmiştir.

Şekil 3.4 a ve e'den görüldüğü üzere, simetrik donatılı kare kesitte olduğu gibi 0° ve 90° olan ana eksenlerdeki etkileşim diyagramları için üç analiz sonuçları da oldukça birbirine yakındır.

Şekil 3.4 b, c ve d'den görüldüğü üzere, $30^\circ, 45^\circ$ ve 60° durumlar için etkileşim diyagramları, özellikle denge bölgesinde kullanılan yöntemle göre farklılık göstermiştir. Bu farklılık, kurgulanan analitik prosedür ile SAP2000 kesit analizi arasında ihmal edilebilecek seviyede azdır. Ancak diyagramlar arasındaki

fark, bu iki yöntem ile XTRACT kesit analizi arasında ciddi seviyededir. Söz konusu farkın, 45° ve 60° (zayıf eksene en yakın açılı durum) eğik eğilme durumlarında çok daha belirgin olduğu görülmüştür.

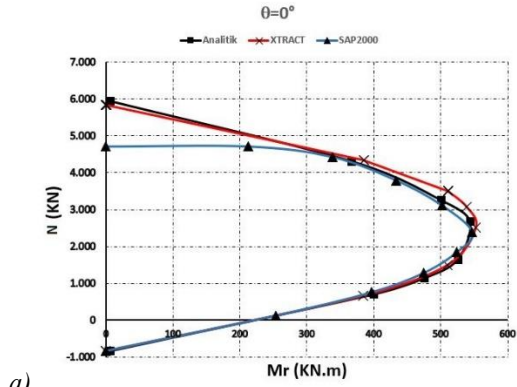
4. Sonuç

Kolonlar, yapıyı ayakta tutan ve deprem yüklerine karşı koyan düşey taşıyıcı elemanlardır. Kolonlarda eğilme tasarımı, eksenel yükün eğilme momentiyle birlikte değerlendirildiği, moment – eksenel yük etkileşimine göre yapılmaktadır. Kesit ana aksları etrafında söz konusu etkileşim diyagramlarının üretilmesi oldukça basitken, gerçek durumdaki kesit üzerinde eğik eksenle moment etkisinde, bu etkileşimin hesabı komplike hale gelmektedir.

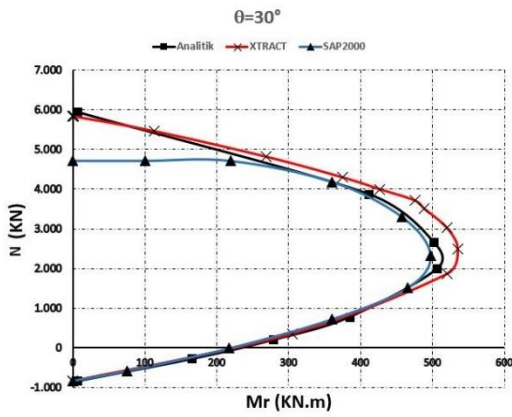
Tablo 3.3: $\theta = 30^\circ$ eğik eksen durumuna ait etkileşim diyagramı örnek hesap tablosu

c	(mm)	∞	600	475	375	325	300	200	0
a	(mm)	∞	510,0	403,8	318,8	276,3	255,0	170,0	0,0
A_{cc}	(mm ²)	250.000	215.436	160.936	111.86 2	87.324	75.056	33.371	0
\bar{y}_c	(mm)	250	279	328	373	393	402	435	500
\bar{x}_c	(mm)	250	228	213	196	181	170	113	0
$\bar{y}'(1)$	(mm)	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8
$\bar{y}'(2)$	(mm)	420,2	420,2	420,2	420,2	420,2	420,2	420,2	420,2
$\bar{y}'(3)$	(mm)	635,2	635,2	635,2	635,2	635,2	635,2	635,2	635,2
$\bar{y}'(4)$	(mm)	262,8	262,8	262,8	262,8	262,8	262,8	262,8	262,8
$f_l(1)$	(mm)	20	20	20	20	20	20	20	20
$f_l(2)$	(mm)	20	20	20	20	20	20	20	20
$f_l(3)$	(mm)	20	20	20	20	20	20	20	20
$f_l(4)$	(mm)	20	20	20	20	20	20	20	20
$\varepsilon_s(1)$		0,0030	-0,0002	-0,0010	-0,0021	-0,0029	-0,0034	-0,0065	-0,1
$\varepsilon_s(2)$		0,0030	0,0017	0,0013	0,0009	0,0006	0,0004	-0,0009	-0,1
$\varepsilon_s(3)$		0,0030	0,0028	0,0027	0,0026	0,0026	0,0025	0,0023	-0,1
$\varepsilon_s(4)$		0,0030	0,0009	0,0003	-0,0004	-0,0009	-0,0012	-0,0033	-0,1
$\sigma_s(1)$	(MPa)	420,0	-35,2	-202,4	-416,3	-420,0	-420,0	-420,0	-420,0
$\sigma_s(2)$	(MPa)	420,0	337,2	268,0	179,5	114,8	74,4	-188,4	-420,0
$\sigma_s(3)$	(MPa)	420,0	420,0	420,0	420,0	420,0	420,0	420,0	-420,0
$\sigma_s(4)$	(MPa)	420,0	179,8	69,2	-72,3	-175,8	-240,4	-420,0	-420,0
$F_s(1)$	(kN)	131,9	-11,1	-63,5	-130,7	-131,9	-131,9	-131,9	-131,9
$F_s(2)$	(kN)	131,9	105,9	84,2	56,4	36,1	23,4	-59,2	-131,9
$F_s(3)$	(kN)	131,9	131,9	131,9	131,9	131,9	131,9	131,9	-131,9
$F_s(4)$	(kN)	131,9	56,5	21,7	-22,7	-55,2	-75,5	-131,9	-131,9
F_c	(kN)	5.312,5	4.578,0	3.419,9	2.377,1	1.855,6	1.594,9	709,1	0,0
N_r	(kN)	5.840,0	4.861,2	3.594,1	2.411,9	1.836,5	1.542,8	518,1	-527,5
$M_{rx}(1)$	(kN.m)	-28,4	2,4	13,7	28,1	28,4	28,4	28,4	28,4
$M_{rx}(2)$	(kN.m)	28,4	22,8	18,1	12,1	7,8	5,0	-12,7	-28,4
$M_{rx}(3)$	(kN.m)	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	-28,4
$M_{rx}(4)$	(kN.m)	-28,4	-12,1	-4,7	4,9	11,9	16,2	28,4	28,4
$M_{rx}(c)$	(kN.m)	0,0	134,7	267,7	291,5	265,0	242,1	130,9	0,0
M_{ry}	(kN.m)	0,0	176,1	323,1	364,9	341,3	320,1	203,2	0,0
$M_{ry}(1)$	(kN.m)	-28,4	2,4	13,7	28,1	28,4	28,4	28,4	28,4
$M_{ry}(2)$	(kN.m)	-28,4	-22,8	-18,1	-12,1	-7,8	-5,0	12,7	28,4
$M_{ry}(3)$	(kN.m)	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	-28,4
$M_{ry}(4)$	(kN.m)	28,4	12,1	4,7	-4,9	-11,9	-16,2	-28,4	-28,4
$M_{ry}(c)$	(kN.m)	0,0	98,9	127,8	127,8	127,8	127,8	96,9	0,0
M_{ry}	(kN.m)	0,0	119,0	156,4	167,3	164,9	163,3	138,0	0,0

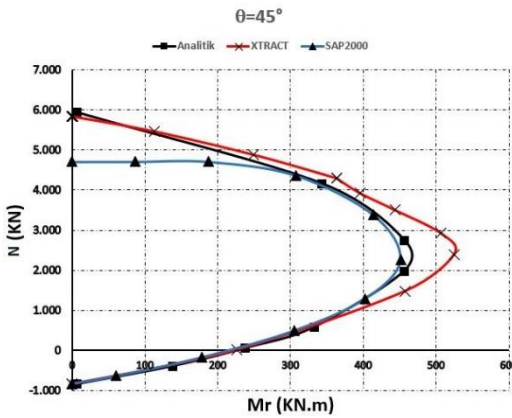
M_r	(kN.m)	0,0	212,5	359,0	401,4	379,0	359,3	245,6	0,0
-------	--------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----



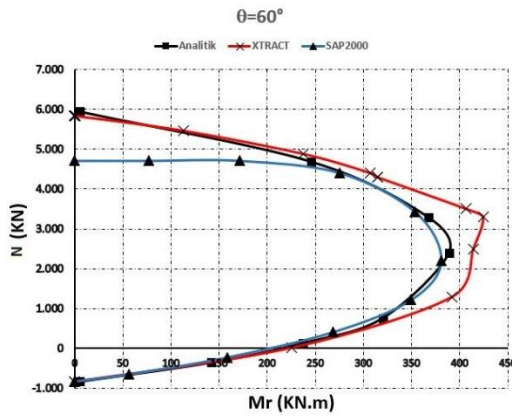
a)



b)

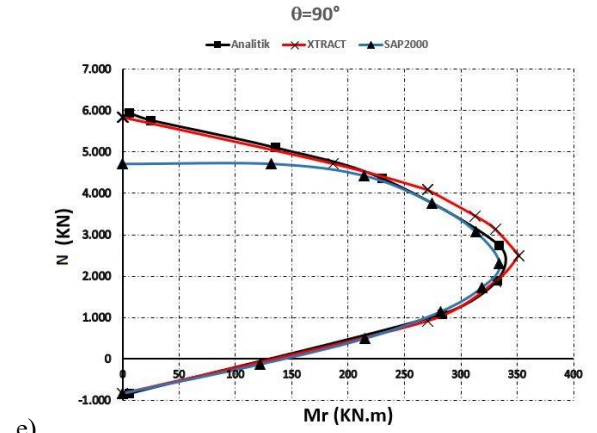


c)



d)

Şekil 3.4 dvm.: Asimetrik donatılı dikdörtgen kesit için $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90° açılarındaki moment – eksenel yük etkileşim diyagramları



e)

Şekil 3.4 dvm.: Asimetrik donatılı dikdörtgen kesit için $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90° açılarındaki moment – eksenel yük etkileşim diyagramları

Bu çalışma kapsamında kare ve dikdörtgen betonarme kesitler için iki eksenli moment – eksenel yük etkileşim diyagramları, kurgulanan analitik yöntemle ve bilgisayar kodlaması yardımıyla hesaplanmış ve uluslararası geçerliliği olan ve iki farklı ticari bilgisayar programlarının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu ticari yazılımlardan biri, kesit analizi için manuel çözümdeki analitik yaklaşımın aynısı kullanırken (opsiyonel), diğeri kesit analizi için fiber metodu kullanmaktadır. Böylelikle iki eksenli eğik eğilme durumunda, moment – eksenel yük etkileşim diyagramlarında, analitik metod manuel ve ticari yazılım olarak kıyaslanmış, ayrıca bu sonuçlarla da fiber metodun kıyaslaması yapılabilmektedir.

Tek eksenli bileşik eğilme durumunda (0° ve 90°), her iki prizmatik kesit tipi için de manuel analitik, ticari program tabanlı analitik ve fiber metodlar, moment – eksenel yük diyagramlarını çok yakın biçimde üretmektedirler.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal uygulamalardan anlaşıldığı üzere, tek eksenli bileşik eğilme durumu dışında kalan eğik eksenli bileşik eğilme durumlarında, manuel analitik yöntem ile SAP2000 sonuçlarının (analitik metod opsiyonuyla) benzer olduğu, fiber metod kullanan XTRACT sonuçlarının görece olarak farklı olduğu görülmüştür. Bu farklılığın özellikle denge konumu civarında kendini gösterdiği ve fiber metod ile daha yüksek kapasitelerin hesaplandığı belirlenmiştir. Manuel analitik yöntem yaparken, XTRACT programı doğrusal olmayan yakınsayan eşdeğer basınç bloğu yaklaşımının, kesit ortogonal ana eksenlerindeki moment – eksenel yük etkileşimlerinin hesabı için oldukça doğru bir kabulken, ara açılardaki eğik bileşik eğilme durumlarında gerçekten uzaklaştığı anlaşılmıştır.

Günümüzde kullanılan paket programların birçoğu, iki eksenli bileşik eğilme hesapları için analitik yöntemlerle çözüm yapmaktadır. Analitik yöntem, fiber yöntemle göre güvenli tarafta kalma koşulunu sağlamaktadır. Ancak özellikle köşe ve dikdörtgen kolonlarda, doğrusal olmayan deprem hesaplarında kullanılan plastik mafsalların ve buna bağlı kesit hasar seviyesinin tayini, bu yöntemle ekonomik sonuçlar vermeyebilir. Bu gibi durumlarda fiber yöntemin daha uygun olduğu değerlendirilmeye ulaşılmıştır.

Kaynakça

- ACI 318-14. (2014). Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Doğangün, A.(2013). Betonarme yapıların hesap ve tasarımı. İstanbul: Birsen.
- Ersoy, U. ve Özcebe G. (2012). Betonarme. İstanbul: Evrim.
- Moehle, J. (2015). Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings. McGraw-Hill Education
- SAP2000, Computers and Structures. (2005). Structure Analysis Program. California.
- TS500. (2000). Betonarme yapıların tasarımı ve yapım kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Topçu, A. (2013). Betonarme 1 ders notları. <http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu>
- Wang, G. G. and Hsu, C. T. (1992). Complete Biaxial Load-Deformation Behavior of RC Columns. Journal of Structural Engineering, Vol.18, No. 9, September.
- Xtract, Imbsen Software System. (2001). Cross Sectional Analysis of Components. California.
- T.B.D.Y Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 18 Mart 2018 Tarih ve 30364 Sayılı Resmî Gazete. 2018