İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİK EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ GENEL KESİTLERİN ANALİZİ İÇİN BİR ALGORİTMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulkadir GÜNGÖR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİK EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ GENEL KESİTLERİN ANALİZİ İÇİN BİR ALGORİTMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulkadir GÜNGÖR
(501101200)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ercan YÜKSEL

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101200 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Abdulkadir GÜNGÖR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"EĞİK EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ GENEL KESİTLERİN ANALİZİ İÇİN BİR ALGORİTMA"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Ercan YÜKSEL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Mustafa GENÇOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Zafer KÜTÜĞ Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 16 Aralık 2013
Savunma Tarihi : 24 Ocak 2014

Aileme,

ÖNSÖZ

Tüm eğitim ve öğretim hayatım boyunca bana destek ve yardımlarını esirgemeyen öncelikle babama, aileme ve arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2014

Abdulkadir Güngör
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 2
2. EĞİK EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ GENEL KESİTLERİN ANALİZİ İÇİN BİR ALGORİTMA ve YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ **7**
2.1 Yapılan Kabuller 7
2.2 Kullanılan Malzeme Modelleri 7
2.2.1 DBYBHY 2007 tanımlı olan beton ve çelik modelleri 7
2.2.2 Literatürde kullanılan beton ve çelik modelleri 9
2.3 Algoritmanın Tanımı 10
2.3.1 Kesit alanının matris olarak ifade edilmesi 10
2.3.2 Alan ve genel alan matrislerinin vektör olarak ifade edilmesi 14
2.3.3 Kesitin tarafsız eksenle yaptığı açıya bağlı olarak elde edilen genel alan vektöründen kesitin plastik merkezi ve dilim sayısının belirlenmesi 15
2.3.4 Tarafsız ekseninin yerinin belirlenmesi 16
2.3.5 Tarafsız eksene göre gerilmelerin hesaplanması 20
2.3.6 Momentin hesaplanması 20
2.4 Algoritmanın Akış Şeması 21
2.5 Programın Geliştirilmesinde Kullanılan Yazılım Dilleri 23
3. ÖRNEKLER **25**
3.1 KAP Programının Ürettiği Sonuçların Doğrulamasına Yönelik Uygulamalar 25
3.1.1 Örnek 1 25
3.1.2 Örnek 2 27
3.1.3 Örnek 3 32
3.1.4 Örnek 4 34
3.1.5 Örnek 5 37
4. SONUÇ VE ÖNERİLER **45**
KAYNAKLAR **47**
ÖZGEÇMİŞ **49**

KISALTMALAR

DBYBHY2007 : Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Dikdörtgen kesitin Mx-My değerleri ve göreli hata oranları 34
Çizelge 3.2 : Iki bölmeli kesitin Mx-My değerleri ve göreli hata oranları ....….....36

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Plastik ve Geometrik Merkez [2] ……..……..…….2

Şekil 1.2 : Kompozit Kesit [2] ……..……..……...….....3

Şekil 1.3 : Belirli bir eğrilik durumu için gerilme ve şekildeğiştirme ilişkileri [3] 3

Şekil 1.4 : Pixellerden oluşan kesitler: (a) kompozit kesit, (b) kompozit kesit, (b) büyütülmüş detay, ve (c) yüksek çözünürlükle büyütülmüş detay [3] 4

Şekil 1.5 : Genel Kompozit Kesit [9] .....…...…….....….5

Şekil 2.1 : Sargılı ve sargısız beton modeli [11] ……..……...……...8

Şekil 2.2 : Donatı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme grafiği [11] …..…...…….....9

Şekil 2.3 : Sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme grafiği [6] ……..…...……...10

Şekil 2.4 : Donatı ve yapı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme grafiği [6] ..…...…...10

Şekil 2.5 : Kesit alanını oluşturan birim kare alanlar ……..….....11

Şekil 2.6 : Kesit alanının matris olarak ifadesi …….…....11

Şekil 2.7 : Kesitin beton, çelik profil ve donatı olarak ayrıklaştırılmış hali ….....12

Şekil 2.8 : 4 adet aynı çaptaki donatıdan meydana gelen kesitin alan matrislerine ayrılmış biçim ...…….....12

Şekil 2.9 : Alan matrislerinde kesit ekleme ve çıkarma işlemi ……...……..…....13

Şekil 2.10 : Tarafsız eksenin X doğrultusu ile yaptığı açının 0° olması durumu için alan ve genel alan matrislerinden vektöre geçiş 14

Şekil 2.11 : Tarafsız eksenin X doğrultusu ile yaptığı açının 45° olması durumu için alan ve genel alan matrislerinden vektöre geçiş .....…….....14

Şekil 2.12 : Tarafsız eksenin x doğrultusu ile yaptığı açıya bağlı olarak dilim sayısı ve dilim sayısı arasındaki uzunluğun değişimi …….....14

Şekil 2.13 : Genel alan vektöründen boşlukların atılması ……....……...……15

Şekil 2.14 : Tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi (1) ……...…….....16

Şekil 2.15 : Tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi (2) ……...……...……...…17

Şekil 2.16 : Tarafsız eksenin yerinin belirlenmesinde denklem (2.14) kullanılarak geliştirilmiş matematiksel modelin kullanılması 17

Şekil 2.17 : Tarafsız eksenin konumu belirlemede klasik yöntemin kullanıldığı durumda M_X - My etkileşim diyagramı ….....…18

Şekil 2.18 : Tarafsız eksenin konumunu belirlemede geliştirilmiş matematiksel modelin kullanıldığı durumda M_X - My etkileşim diyagramı 18

Şekil 2.19 : Çekme eksenel kuvveti etkisindeki bir kesitte kapasite üstü yükleme durumu 19

Şekil 2.20 : Basınç eksenel kuvveti etkisindeki bir kesitte kapasite üstü yükleme durumu 19

Şekil 2.21 : Kesitin şekildeğiştirme-gerilme hesap grafiği 20

Şekil 2.22 : Tarafsız eksene göre hesaplanmış moment 21

Şekil 2.23 : Tarafsız eksene göre hesaplanmış M_X, My momentleri 21

Şekil 2.24 : Program kesit için Mx, My hesaplarken esas aldığı moment yönleri 21

Şekil 2.25 : Programın genel akış şeması 24

Şekil 3.1 : Analizi yapılmış olan kare kesit 25

Şekil 3.2 : Kesitin 570 kN luk eksenel basınç kuvveti etkisindeki M_X- My etkileşim grafiği 26

Şekil 3.3 : Örnek 1 için N-M_X etkileşim diyagramı 26

Şekil 3.4 : Örnek 1 de incelenen kare betonarme kesitte N-M_X-My etkileşim diyagramı 27

Şekil 3.5 : İçine çelik profil yerleştirilmiş kare kesit 28

Şekil 3.6 : Sargılanmış beton modeli 29

Şekil 3.7 : 5000 kN altında kesitin Mx-My grafiği 29

Şekil 3.8 : ε_ust=0.01 için kompozit kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği 30

Şekil 3.9 : Kompozit kesitin normal kuvvet-M_X-My (3d) etkileşim grafiği (ε_*ust* =0.01) 30

Şekil 3.10 : Kompozit kesitin normal kuvvet-M_X-My (3d) etkileşim grafiği (ε_*ust* =0.01) 31

Şekil 3.11 : Kompozit kesitin N-Mx-My (3d) grafiği 31

Şekil 3.12 : Kompozit kesitin normal kuvvet-Mx-My (3d) grafiği 32

Şekil 3.13 : Dikdörtgen kesitli kolon [6] 32

Şekil 3.14 : Dikdörtgen kesitin Mx-My grafiği 33

Şekil 3.15 : Dikdörtgen kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği 33

Şekil 3.16 : İki bölmeli kesit [6] 34

Şekil 3.17 : Farklı alan matrisleri ile modellenmiş kesitin Mx-My grafiği 35

Şekil 3.18 : Kesit için bulunan Mx-My değerlerinin grafiği 36

Şekil 3.19 : Örnek 4, iki bölmeli kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği 37

Şekil 3.20 : Analizi yapılmış olan kare kesit 37

Şekil 3.21 : Kesitte kullanılan sargisiz beton modeli .....……..38

Şekil 3.22 : Kesitte kullanılan pekleşen donatı çeliği modeli .....…..…..38

Şekil 3.23 : Eksenel kuvvetin sıfır olduğu durumda *ε_ust*=0.003 için kesitte Mx-My etkileşim diyagramı .....……39

Şekil 3.24 : Kare kesitin normal kuvvet-Mx-My (3d) grafiği (*ε_ust*=0.003) 39

Şekil 3.25 : ε_ust=0.003 için kare kesitin normal kuvvet-moment grafiği 40

Şekil 3.26 : Betonarme manto ile güçlendirilmiş kesit 40

Şekil 3.27 : Kesitte kullanılan sargili beton modeli 41

Şekil 3.28 : 2500 kN basınç eksenel kuvveti etkisindeki kesitin Mx-My grafiği 41

Şekil 3.29 : Kesitin normal kuvvet-Mx-My (3d) grafiği (ε_ust=0.01) 42

Şekil 3.30 : *ε_ust*=0.01 durumunda kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği 42

Şekil 3.31 : Eksenel kuvvetin sıfır olduğu durumda güçlendirme öncesi ve sonrası Mx-My etkileşim diyagramları 43

Şekil 3.32 : Güçlendirme öncesi ve sonrasında kesitin N-Mx-My etkileşim diyagramı (ε_ust=0.002) 43

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{A_s}$: Boyuna donatı alanı
$\boldsymbol{\alpha_i}$: Kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklık
$\mathbf{b_o}$: Göbek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutu
$\mathbf{E_c}$: Betonun elastisite modülü
$\mathbf{E_s}$: Donatı çeliğinin elastisite modülü
$\mathbf{f_c}$: Sargılı betonda beton basınç gerilmesi
$\mathbf{f_{cc}}$: Sargılı beton dayanımı
$\mathbf{f_{co}}$: Sargısız betonun basınç dayanımı
$\mathbf{f_e}$: Etkili sargılama basıncı
$\mathbf{f_s}$: Donatı çeliğinde gerilme
$\mathbf{f_{sy}}$: Donatı çeliğinin akma dayanımı
$\mathbf{f_{su}}$: Donatı çeliğinin kopma dayanımı
$\mathbf{f_{yw}}$: Enine donatının akma dayanımı
$\mathbf{h_o}$: Göbek betonunu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutu
$\mathbf{k_e}$: Sargılama etkinlik katsayısı
$\mathbf{s}$: Etriye aralığı
$\boldsymbol{\rho_s}$: Toplam enine donatının hacımsal oranı
$\boldsymbol{\rho_x}$, $\boldsymbol{\rho_y}$: İlgili doğrultudaki enine donatının hacimsel oranı
$\boldsymbol{\varepsilon_c}$: Beton basınç birim şekildeğiştirmesi
$\boldsymbol{\varepsilon_{cu}}$: Sargılı betondaki en büyük basınç birim şekildeğiştirmesi
$\boldsymbol{\varepsilon_{sy}}$: Donatı çeliğinin akma birim şekildeğiştirmesi
$\boldsymbol{\varepsilon_s}$: Donatı çeliğinin pekleşme başlangıcındaki birim şekildeğiştirmesi
$\boldsymbol{\varepsilon_{su}}$: Donatı çeliğinin kopma birim şekildeğiştirmesi
$\boldsymbol{\gamma}$: Özgül ağırlık

EĞİK EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ GENEL KESİTLERİN ANALİZİ İÇİN BİR ALGORİTMA

ÖZET

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ve nüfusun hızla artması sonucu, yüksek yapılara olan talep artmıştır. Bunun sonucunda beton ve çelik malzemelerin gelişmesine ve birlikte kullanılmasına yol açmıştır. Betonarme, kompozit ya da çelik profillerden meydana gelen kolonların, yüksek ve farklı yapı ihtiyaçlarına bağlı olarak yatay ve düşey yükler altında iki eksenli eğilme elle hesabı gittikçe zorlaşmaya başlamıştır. Bu sebepten bilgisayar teknolojisi daha fazla kullanılmaya başlamıştır. Eğik eğilme ve eksenel kuvvvet kesitlerin analizi için çeşitli algoritma ve yazılımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu kesit analiz yazılımları zaman zaman mühendislerin ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu durumda üniversiteler ve akademik çevreler kabul edilebilir sürelerde daha karmaşık kesitleri analiz yapabilecek algoritma ve yazılım geliştirmeye devam etmişlerdir. Geçmişten günümüze doğru bakacak olursak en çok bilinen akademik programlar şunlardır:

Yalcin ve Saatcioğlu [1] dairesel ve dikdörtgen şekilli betonarme kolonlarda sargılama ve boyuna burulma etkisini dikkate alarak moment-eğrilik hesabı yapabilecek COLA [1] adlı programı geliştirmişlerdir.

Chen, Teng, ve Chan [2] daha önceden belirli geometrik şekillere göre integrallerle hesaplanmış olan kesitler için belirli bir normal kuvvet altında iki eksenli analizi yapabilen COMCOL [2] adlı programı geliştirmişlerdir.

Sfakianakis [3] belirli bir normal kuvvet altında betonarme, kompozit ve güçlendirilmiş kesitler için iteratif olmayan belirli bir eğrilik için hesap yapabilen BIAX [3] adlı programı geliştirmişlerdir.

Bu programların dışında günümüzde birçok yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılımlar algoritma olarak benzer yöntemler kullanmışlardır. Günümüzdeki birçok çalışma kesitlerin alan kapalı poligonlar ve "*Gauss İntegral Metotu"* ile hesaplamaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen algoritma diğer çalışmalardan farklı olarak kesitleri ilk kez matris olarak tanımlamaktadır. Bu sayede çeşitli geometriye sahip kesitlerin alanları kolaylıkla basit matris işlemleri ile hesaplanabilmektedir.

Çeşitli çalışmalar kapsamında geliştirilmiş bir çok yazılım güçlendirilmiş ve/veya kompozit kesitleri analiz edememektedir. Tez kapsamında geliştirilen bu algoritma ağırlık merkezi hesabını plastik merkeze göre hesaplayabilmektedir. Bu sayede güçlendirilmiş ve/veya kompozit kesitler kolaylıkla analiz edilebilmektedir.

Bu geliştirilen algoritma üzerine kurulan "*Kesit Analiz Programı*" (KAP) kesitin geometrik şeklinden bağımsız, doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışı altında, belirli bir normal kuvvet altında iki eksenli analizi yapabilmesi imkân vermektedir.

KAP programı, çeşitli malzeme modelleri ile hesap yapabilmektedir. Sınırlı ve maksimum eğrilik şekil değiştirmelere hesaplayabilmektedir. Yazılımın iteratif bir hesap modeli vardır. Geliştirilen KAP programı diğer programlardan farklı olarak

hesap algoritmasındaki birçok parametreleri kullanıcının ayarlanmasına izin vermektedir.

Bu tez kapsamında ele eğik eğilme ve eksenel kuvvet etkisindeki genel kesitler için bir algoritma ortaya konulmuştur.

Dört ana bölümden oluşan çalışmanın birinci bölümünde tez konusunun tanıtılması ve ilgili çalışmaların gözden geçirilmesi, çalışmanın amacı ve kapsamı yer almaktadır.

İkinci bölümde, KAP programının dayandığı kabuller ve kullanılan malzeme modellerinden bahsedilmiştir. KAP programının kesitleri matris olarak tanımlayabilmek için izlediği yol açıklanmaya çalışılmıştır. Tarafsız eksen ve moment hesap yöntemleri anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, geliştirilen algoritma ile ona dayalı olarak üretilen yazılımın doğrulanması amacıyla, çoğu literatürden seçilmiş olan farklı kesitler üzerinde çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde, geliştirilen algoritma ve buna bağlı üretilen yazılım sonucunda elde eldilen sonuçlardan bahsedilmiştir. Elde edilen sonuçlara dayalı olarak öneriler anlatılmıştır.

ULTIMATE STRAIN ANALYSIS OF CONCRETE, REINFORCED AND COMPOSITE SECTIONS BIAXIAL BENDING DEVELOPING ALGORITHMS THAT CAN PERFORM

SUMMARY

Nowadays, the rapid development of technology and as a result of rapid population growth, increased demand for high-rise buildings. As a result, concrete and steel materials has led to the development and use together. Reinforced concrete, composite or steel columns resulting from the high and different structures depending on the needs biaxial bending under horizontal and vertical loads by hand calculation started getting harder , specially, composite column and beams.

Composite columns and beams not only provide many advantages in construction speed and economy, but also result in a substantial improvement of mechanical properties of the member when compared to either steel or reinforced concrete columns. However, there still exist some knowledge gaps in their behavior in areas such as moment-curvature depends on ultimate strain.

In addition to the composite section, reinforced concrete structures are subjected to biaxial bending and axial forces due to the geometry, the shape of the cross-section or the nature of external forces. In edification or civil engineering many examples follow this behaviour such as the columns in the corners of buildings and elements affected by seismic and wind forces.

With the aim of analysing this type of structures, non-linear analysis programs and, particularly, those based on the a lot of mathematical methods, require the computation of the constitutive equation of the cross-section and the evaluation of the internal forces through the integration of the stress fields. These programs perform this operation many times; hence its optimisation leads to an important reduction in the computing time consumed.

Computer programs for designing reinforced concrete structures need to compute the internal forces through the integration of stresses over the concrete cross-section in order to obtain the interaction surface. This action is performed many times, and thus its optimisation represents an important reduction in computing time.

In this case, universities and academia in an acceptable period of time to make cross-sectional analysis tried to develop algorithms and software. If we look into the past to the most well-known academic programs include:

C.Yalcin, M. Saatcioğlu [1] developed COLA[1]. The computer software was developed to establish inelastic force-deformation relationships for reinforced concrete columns. The software, referred to as column Analysis (COLA) [1], provides sectional moment-curvature analysis, anchorage slip analysis, and member analysis. The results are presented graphically in terms of force-deformation relationship for each component, and axial force-moment interaction diagram.

S. F. Chen, J. G. Teng, and S. L. Chan [2] developed COMCOL [2].The computer program with a user-friendly graphics interface called COMCOL [2] has been developed based on the method presented in exact integral expressions. In order to demonstrate the validity and accuracy of the proposed method, the load-carrying capacities of two rectangular cross sections with asymmetrically placed structural

steel under uniaxial loading are first determined using this program and compared with the available test results.

M.G. Sfakianakis [3] developed BIAX [3]. Include capabilities for parametric studies based on the section moment-curvature diagrams.

Generally, the columns of such structures are subjected to axial loads and biaxial bending moments as a result of their geometry, the shape of the cross-section or the type of external forces exerted. In edification many examples follow this behaviour such as the columns in the corners of building and elements affected by seismic and wind forces. For this type of structures the sections are typically rectangular or circular. The classical method of integrating the stresses, etc. in the concrete is usually performedby dividing the section into layers or fibers also called cells. This technique is not numerically efficient due to the huge amount of information that is required to characterise the section and the large number of numerical operations. Moreover, this integration method could produce convergence problems for non-linear structural analysis programs, since the variation of the internal forces is not continuous for different locations of the neutral axis and depends on the fiber mesh size or the layer height. There are a lot of alternative methods to integrate the concrete stresses over the cross-section, some of the most interesting. These authors study the integration of stresses if the constitutive equation is the equivalent rectangular stress block. This also proposed computing such integrals by decomposing the section into many trapezes. In this case the constitutive equation is a parabola-rectangle diagram for the ascending branch and linear for the descending branch. They obtain the solution to the stresses integral analytically. Recently Scientific Studies obtained the stress integral for the rectangular section analytically using the Heaviside functions. This method is valid for ultimate loads, axial load and uniaxial bending and a parabola-rectangle diagram.

Today many of these programs outside the software and algorithms have been developed. Nowadays, many studies are based on closed polygons and Gaussian integral method. Developed algorithm is based on the matrix expression. It was founded on the algorithm developed KAP program regardless of the form of the cross section geometry, linear and nonlinear material behavior under biaxial under a certain normal force gives the opportunity to do analysis. Unlike other programs (concrete, tied concrete, steel, etc.) with various material models are able to calculation. Limited and ultimate strain can be calculated. There is an iterative computational model of the software. Improved KAP program different from other programs as many parameters in the algorithm allows the user to adjust.

KAP program, which can account with a variety of material models. Calculate the maximum curvature and shape change can be limited. The software has an iterative calculation model.

Introducing the subject of the thesis consists of four main sections: the first section

study and review of relevant studies is located in the purpose and scope of the study. In the second part, based on the assumption that the KAP program and materials used in the models are discussed. Sections of the KAP program has tried to explain the path followed to define the matrix. Neutral axis and moment calculation methods are described.

In the third part, the developed algorithm to verify that the software produced on the basis of it, most of which are selected from the literature was studied in different sections.

In the fourth section, the developed algorithm and the results are discussed software produced results obtained accordingly. Recommendations has been described based on the results obtained. This results:

According to the results obtained from samples analyzed, cut edges largest relative angles achieved for intermediate rate grows between size differences may occur in the order of %15. Matrix size used in the field definition can be said to be related to this difference.

The cross-sectional shape error can occur in certain proportions. The ratio between the cross-sectional dimensions can increase the amount of edge grows error. However neutral axis 0°, 90°, 180°, 270° where these errors are reduced to zero.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ve nüfüsun artmasıyla yüksek yapılar günümüzde hızla artmıştır. Bunun sonucunda betonarme ve çelik yapı sistemleri önemli ölçüde gelişmiştir. Yüksek katlı binalarda, endüstriyel yapılarda, köprü ayaklarında vb kullanılan perde, kolon, kiriş gibi yapı elemanları, yeterli rijitliği sahip olmaları ve yapıyı güvenli şekilde ayakta tutmaları açısından büyük öneme sahiptirler.

Yapıyı oluşturan düşey taşıyıcı elemanlarından olan kolonlarda, (rüzgar ve deprem gibi) yatay yük ve düşey yük etkileri nedeniyle eksenel yük ve iki eksenli eğilme momenti etkisi önemli değerlere ulaşabilmektedir. Bu etkilere maruz kalan yapı elemanları değişik geometrik (U, L, T, kanal tipi vb.) şekillerde tasarlanmaktadır. Dikdörtgen kesitli ve donatısı simetrik yerleştirilmiş eksenel basınca maruz kesitlerin iki eksenli eğilme hesapları kolaylıkla yapılabilirken değişik geometriye sahip kesitlerin analizi zahmetli olmaktadır. Üstelik betonarme içine yerleştirilmiş yapı çeliği gibi kompozit ya da sonradan güçlendirilmiş kesitler için analizler gerçekten çok uzun süreler alabilmektedir.

1.1 Tezin Amacı

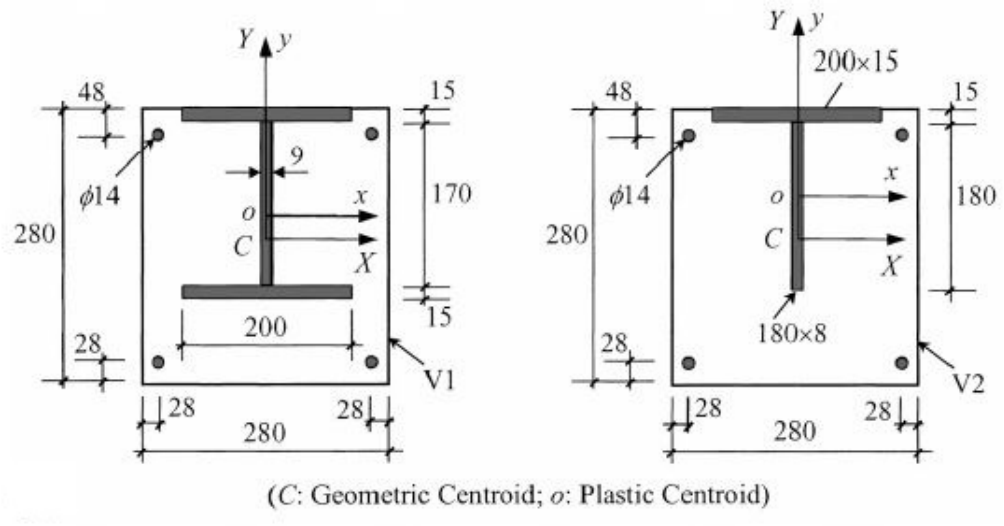
Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen algoritma ve yazılımın aşağıdaki özelliklere sahip olması amaçlanmıştır;

- Her türlü kesit geometrisi için, doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışı dikkate alınarak, belirli bir normal kuvvet etkisinde iki eksenli eğilme analizi yapabilmesi
- Sargılı ve sargısız beton, çelik vb. farklı malzeme modelleri için hesap yapabilmesi
- Sınırlı ve en büyük eğrilik-şekildeğiştirme durumlarına göre hesap yapabilmesi
- Betonarme, çelik, kompozit ve güçlendirilmiş kesit durumlarında analiz yapabilmesi
- Algoritma ve yazılımın geliştirilmeye açık olması

1.2 Literatür Araştırması

Yalcin ve Saatcioglu [1] dairesel ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda sargılama ve boyuna donatı burkulmasını da dikkate alarak moment-eğrilik hesabı yapan COLA isimli programı geliştirmişlerdir. COLA belirli normal kuvvet altında kesitin tek eksenli eğilme hesabını gerçekleştirmektedir.

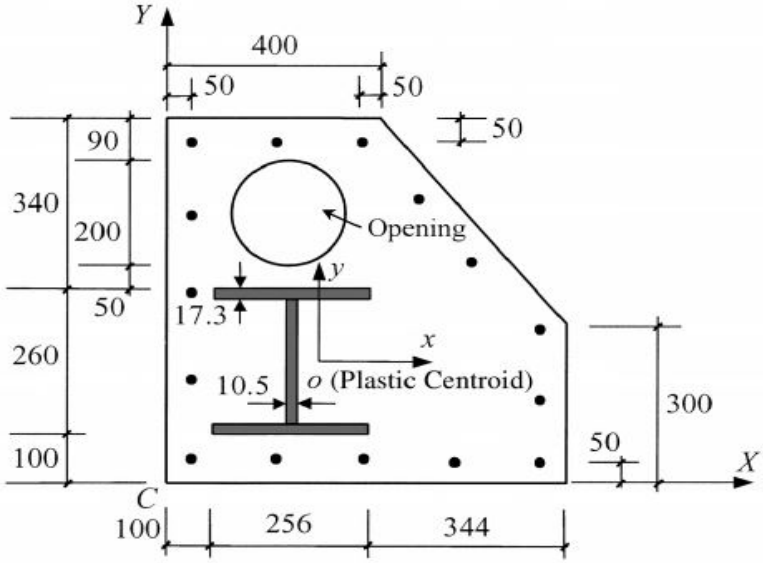
Chen vd. [2] tanımlanan geometrik şekillere göre integrallerle hesaplanan kesitler için normal kuvvet ve iki eksenli eğilme etkisinde analiz yapabilen COMCOL yazılımını geliştirmişlerdir. İçine çelik profil yerleştirilmiş betonarme kesitler için plastik merkez ve geometrik merkezi dikkate alarak analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Plastik merkez tanımıyla analiz edilen kompozit kesitin ağırlık merkezinin geometrik merkezinden farklı olduğu ifade edilmektedir. Chen vd. çalışması plastik merkez ve geometrik merkezi dikkate alabilen örnek çalışmalardandır, Şekil 1.1.



Şekil 1.1: Plastik ve Geometrik Merkez [2].

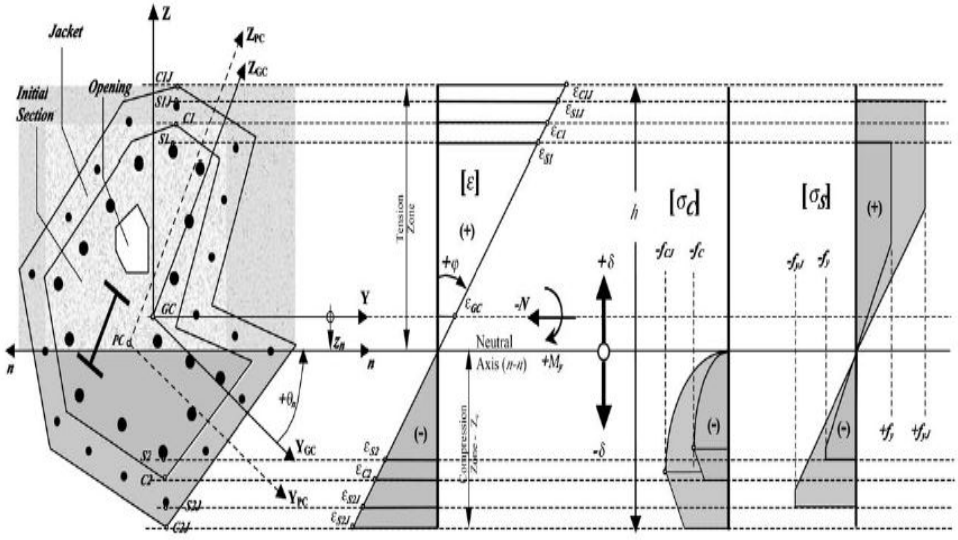
Tanımlanmış geometriye sahip kompozit kolon kesitler için belirli bir normal kuvvet altında iki eksenli analiz yapabilen COMCOL adlı program bu alandaki en güçlü yazılımlardan birisidir. İçerisinde boşluk bulunan bir kesit için COMCOL [2] yazılımı kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu özellikteki bir kesit için eğik eğilme ve eksenel kuvvetin birlikte dikkate alınabiliyor olması durumuna literatürde ender rastlanmaktadır, Şekil 1.2.

Sfakianakis [3] belirli bir eksenel kuvvet etkisindeki betonarme, kompozit ve güçlendirilmiş kesitlerde iteratif olmayan ve belirli bir eğrilik değeri için hesap



Şekil 1.2: Kompozit Kesit [2].

yapabilen BIAX [3] adlı programı geliştirmiştir. BIAX en büyük eğrilik-şekildeğiştirme durumu için hesap yapamamaktadır, Şekil 1.3.

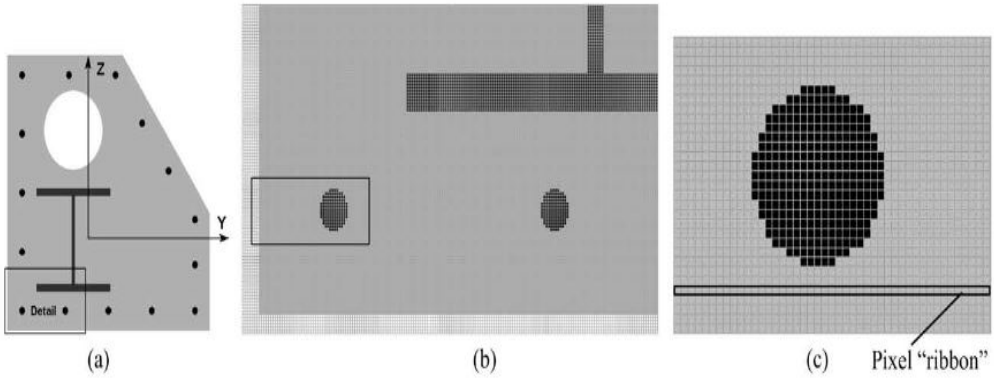


Şekil 1.3: Belirli bir eğrilik durumu için gerilme ve şekildeğiştirme ilişkileri [3].

Sfakianakis [3] kesitleri daha küçük parçalara ayırarak, fiber modellemenin nasıl yapılabileceğini de göstermiştir, Şekil 1.4.

Y ve Z eksenlerine paralel olan pixeller toplanarak kesit tanımlanmaya çalışılmıştır. Ancak ara açılar için analiz doğrusal bağıntılar kullanılarak yapılabilmektedir. Tanımlanmış geometriye sahip kesitlerin ağırlık merkezi, malzeme vektörü gibi bileşenleri önceden tanımlanmış olmalıdır. BIAX [3] programı seçilmiş kesitler için

hesap yapmaktadır. Ancak fiber modele uygun matris hesap sisteminin ilk örneklerinden biri olarak görülebilir.



Şekil 1.4: Pixellerden oluşan kesitler: (a) kompozit kesit, (b) büyütülmüş detay, ve (c) yüksek çözünürlükle büyütülmüş detay [3].

Bonet vd. [4] betonarme kesitlerde hızlı analiz yapabilmek için fiber metoda uygun genelleştirilmiş diferansiyel "*Gauss Quadrature Metodu"*nu önermiştir. Tarafsız eksenin açı değişimi kesit alanı hesabında dikkate alınmaktadır. Kompozit ya da boşluk içeren kesitler bu yazılım ile analiz edilememektedir.

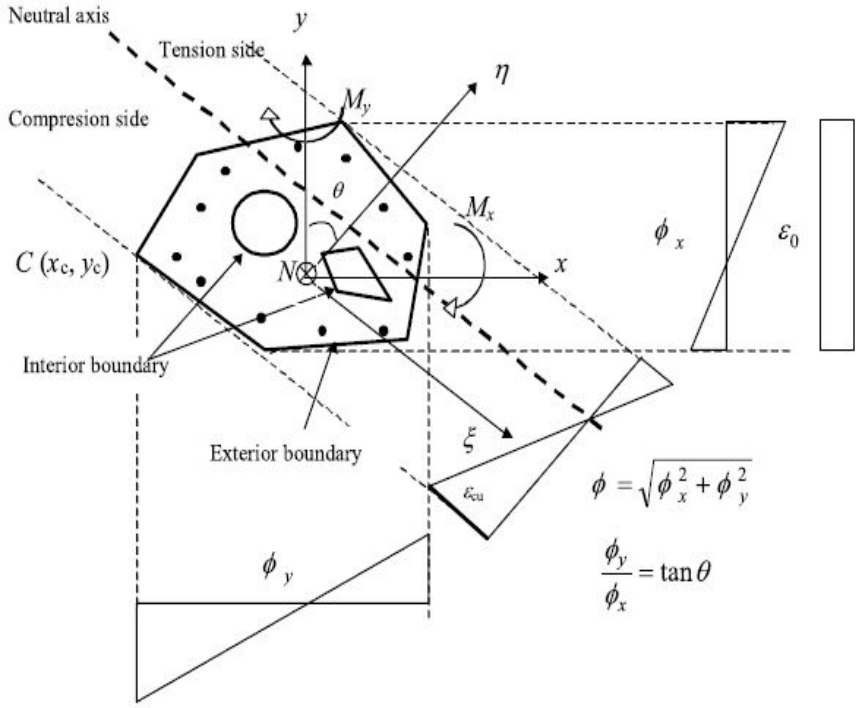
Bonet vd. [5] betonarme kesitlerin hızlı analizi için, fiber metoda uygun sayısal ve analitik integral metodları önermiş ve sonuçlarını daha önceki çalışması ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmalarda, analitik integral metodunun daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Rosati vd. [6] betonarme, betonarme içine yerleştirmiş çelik ve/veya boşluklu kompozit kesitler için belirli bir normal kuvvet etkisinde iki eksenli eğilme analizi yapabilen algoritma ve yazılım geliştirmiştir. Ancak seçilmiş olan kesit tiplerine göre analiz yapılabilmektedir. Kesitin geometrisinden bağımsız bir yöntem değildir. Kesitin birçok özelliği yazılımın içinde tanımlanmıştır. Kullanılan beton malzeme modeli, sargılanmış beton durumunu desteklememektedir. Kesite özel integral yöntemi olarak Bonet [4] ve [5] metodlarını kullanmıştır. Bu hesap yöntemlerini fiber metoduna uygun, kesite özel matris sistemine dönüştürerek bir algoritma ve yazılım geliştirmiştir.

Charalampakis ve Koumousis [7] tarafından geliştirilen algoritma, en büyük eğrilik-şekildeğiştirme durumunda daha önceden tanımlanmış kesitler için analiz yapabilmektedir. Kesitler, alt kesitlere ayrılarak integrasyon işlemleri yapılmaktadır. Kesitler kapalı poligonlar ile, kesit kenarları ise düz doğrular ya da eğriler ile ifade

edilebilmektedir. Analizde sargılı ve sargısız beton malzeme modelleri kullanılabilmektedir. Yazılımda günümüzde de güncelliğini koruyan iteratif bir hesap modeli kullanılmıştır.

Pallares vd. [8] en büyük eğrilik-şekildeğiştirme durumuna göre hesap yapabilen, [7] nolu çalışmada önerilen hesap yönteminin geliştirilmesi ile yeni bir sayısal yöntem ortaya koymuştur. Bu yeni sayısal yöntem deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Chiorean [9] ve Papanikolaou [10] kesitlerin alanlarını hesaplamak için kapalı poligonlar kullanılmaktadır, Şekil 1.5. Betonarme, betonarme içinde çelik profil ve/veya boşluk içeren kesitlerin geometrileri düzlemsel koordinaatlar kullanılarak tanımlanmaktadır. Birçok farklı kesit tipi için hesap yapılabilmektedir. Malzeme modelleri arasında sargılı beton modeli yoktur. Analiz en büyük eğrilik-şekildeğiştirme durumu için yapılabilmektedir.



Şekil 1.5: Genel Kompozit Kesit [9].

Fiber model ve moment-eğrilik ile ilgili en güncel çalışmalardandır. En büyük eğrilik-şekildeğiştirme durumuna göre mantolanmış betonarme kesitleri analiz edebilecek bir algoritma ve yazılım mevcut değildir. Sargılı beton modelini destekleyen yazılım sayısı sınırlıdır.

2. EĞİK EĞİLME VE EKSENEL KUVVET ETKİSİNDEKİ GENEL KESİTLERİN ANALİZİ İÇİN BİR ALGORİTMA ve YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

2.1 Yapılan Kabuller

KAP (Kesit Analiz Programı) olarak adlandırılan yazılımın geliştirilmesinde yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonrada düzlem kalırlar, *Bernoulli-Navier Hipotezi*.
- Kesiti oluşturan beton, çelik profil, donatı gibi malzemeler arasındaki aderans tamdır.
- Donatı çeliğinin bulunduğu kesitte beton devam etmektedir.

2.2 Kullanılan Malzeme Modelleri

2.2.1 DBYBHY 2007 tanımlı olan beton ve çelik modelleri

DBYBHY 2007 [11] de verilen ve Mander vd. [12] tarafından önerilen sargılı ve sargısız beton modeli aşağıda tanımlanmıştır.

Sargılı betonda beton basınç dayanımı f_c, birim şekildeğiştirme ε_c nin fonksiyonu olarak aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir.

$$f_c = \frac{f_{cc}\ x\ r}{r-1+x^r} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Sargılı beton dayanımı f_{cc} ile sargısız beton dayanımı f_{co} arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

$$f_{cc} = \lambda_c\, f_{co} \quad ; \qquad \lambda_c = 2.254\sqrt{1+7.94\frac{f_e}{f_{co}}} - 2\frac{f_e}{f_{co}} - 1.254 \qquad \textbf{(2.2)}$$

Bu bağıntıdaki f_e etkili sargılama basıncı, dikdörtgen kesitlerde birbirine dik iki doğrultu için aşağıda verilen değerlerin ortalaması olarak alınabilir.

$$f_{ex} = k_e\, \rho_x\, f_{yw} \quad ; \qquad f_{ey} = k_e\, \rho_y\, f_{yw} \qquad \textbf{(2.3)}$$

Bu bağıntılarda f_{yw} enine donatının akma dayanımını, ρ_x ve ρ_y ilgili doğrultulardaki enine donatıların hacimsal oranlarını, k_e ise aşağıdaki sargılama etkinlik katsayısını göstermektedir.

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum \alpha_i^2}{6\, b_0\, h_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2\, b_0}\right)\left(1 - \frac{s}{2\, h_0}\right)\left(1 - \frac{A_s}{b_0\, h_0}\right)^{-1} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Burada α_i kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı, b_0 ve h_0 çekirdek betonu sargılayan etriyelerin eksenleri arasında kalan kesit boyutlarını, s düşey doğrultuda etriye eksenleri arasındaki aralığı, A_s ise boyuna donatı alanını göstermektedir. Denklem (2.1) deki normalize edilmiş beton birim şekildeğiştirmesi x ile r değişkenine ilişkin bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad ; \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0}\,(1 + 5\,[\lambda_c - 1]\,) \;\; ; \;\; \varepsilon_{c0} \cong 0.002 \qquad \textbf{(2.5)}$$

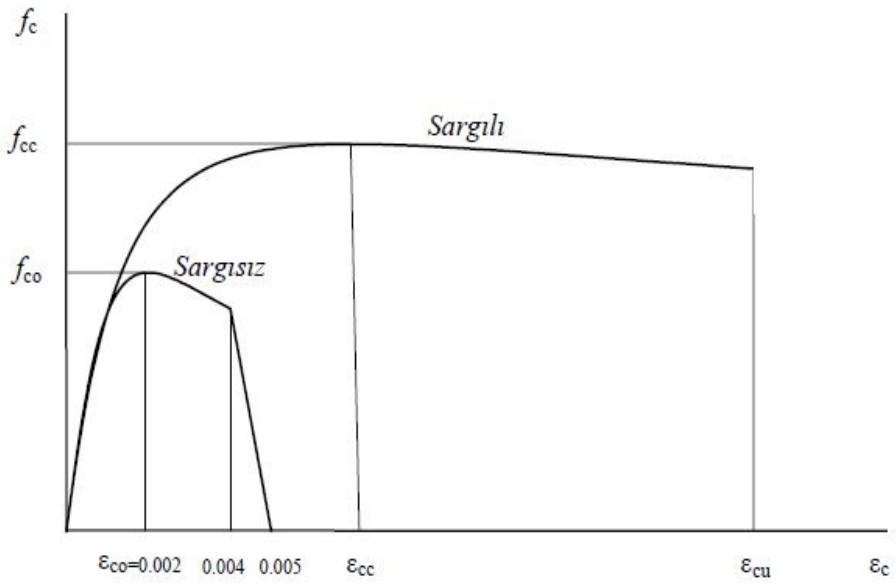
$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad ; \quad E_c \cong 5000\sqrt{f_{co}} \;\; [Mpa] \;\; ; \;\; E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \qquad \textbf{(2.6)}$$

Sargılı betondaki en büyük basınç birim şekildeğiştirmesi ε_{cu} aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\,\rho_s\,f_{yw}\,\varepsilon_{su}}{f_{cc}} \qquad \textbf{(2.7)}$$

Burada ρ_s toplam enine donatının hacimsel oranını (dikdörtgen kesitlerde $\rho_s = \rho_x + \rho_y$), ε_{su} enine donatı çeliğinde en büyük gerilme altındaki birim şekildeğiştirmesini göstermektedir.

Sargılı beton için verilen Denklem (2.1), ε = 0.004 e kadar olan bölgede sargısız beton için de geçerlidir. Sargısız betonda etkin sargılama basıncı $f_e = 0$ ve buna bağlı olarak Denklem (2.2) den $\lambda_c = 2$ alınarak, Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) de $f_{cc} = f_{co}$ ve $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}$ olacaktır. $\varepsilon_c = 0.005$ de $f_c = 0$ olarak tanımlanır. Gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi $0.004 < \varepsilon_c \leq 0.005$ aralığında doğrusaldır.



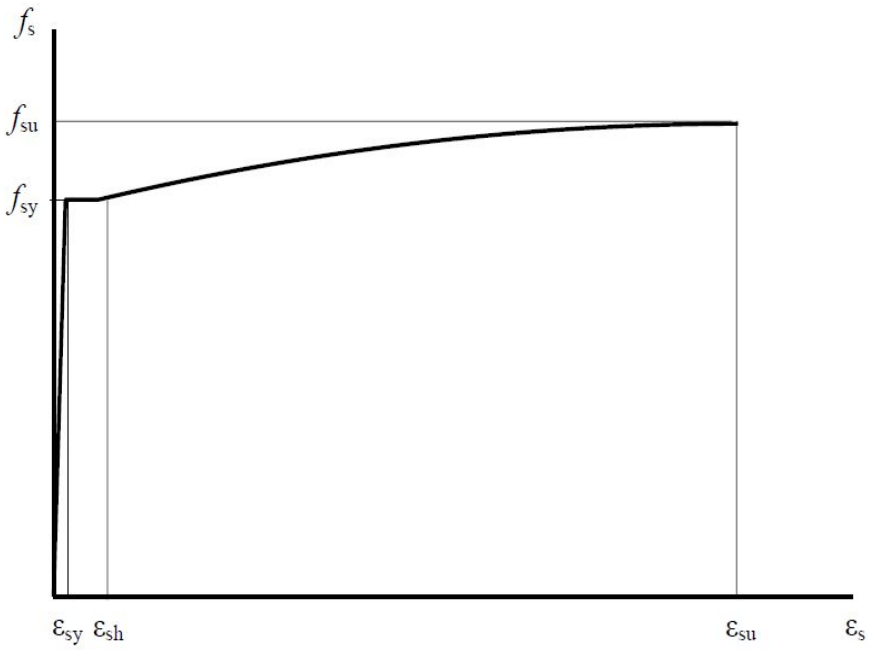
Şekil 2.1: Sargılı ve sargısız beton modeli [11].

DBYBHY 2007 [11] tanımlı olan donatı çeliği malzeme modeli üç farklı bölge için tanımlanmıştır, Şekil 2.2.

$$f_s = E_s\,\varepsilon_s \qquad (\varepsilon_s \le \varepsilon_{sy})$$

$$f_s = f_{sy} \qquad (\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \le \varepsilon_{sh})$$

$$f_s = f_{su} - (f_{su} - f_{sy})\,\frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2} \qquad (\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \le \varepsilon_{su}) \qquad \textbf{(2.8)}$$



Şekil 2.2: Donatı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi [11].

Donatı çeliği olarak kullanılan bu malzeme modeli aynı zamanda çelik profillerin malzeme modeli olarak kullanılabilir.

2.2.2 Literatürde kullanılan beton ve çelik modelleri

Sargısız beton modeli aşağıda tanımlanmıştır, [6]. İfadeden anlaşıldığı gibi betonun çekme taşıma kapasitesi terkedilmektedir, Şekil 2.3.

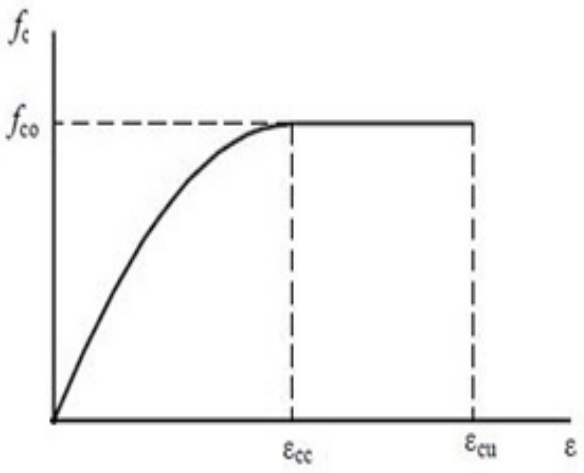
$$f_c = 0 \qquad (0 \le \varepsilon)$$

$$f_c = 1000\,f_{c0}\,(\varepsilon + 250\,\varepsilon) \qquad (\varepsilon_{cc} \le \varepsilon \le 0)$$

$$f_c = f_{c0} \qquad (\varepsilon_{cu} \le \varepsilon \le \varepsilon_{cc}) \qquad \textbf{(2.9)}$$

ε_{cc} parabol kolun bittiği bölgeye, ε_{cu} ise en büyük şekildeğiştirme sınırına karşı gelmektedir.

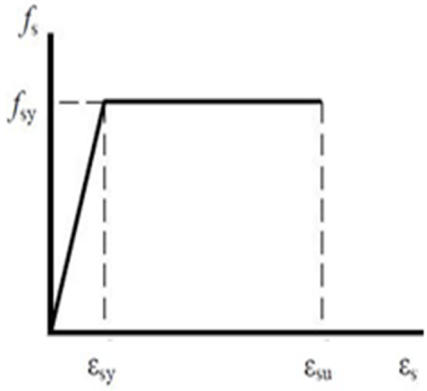
Donatı ve yapı çelikleri için önerilen iki doğrulu ideal elastoplastik davranış modeli, Şekil 2.4 de verilmiştir.



Şekil 2.3 : Sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme grafiği [6].

$$f_s = E_s\,\varepsilon_s \qquad (\varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy})$$

$$f_s = f_{sy} \qquad (\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}) \qquad \textbf{(2.10)}$$

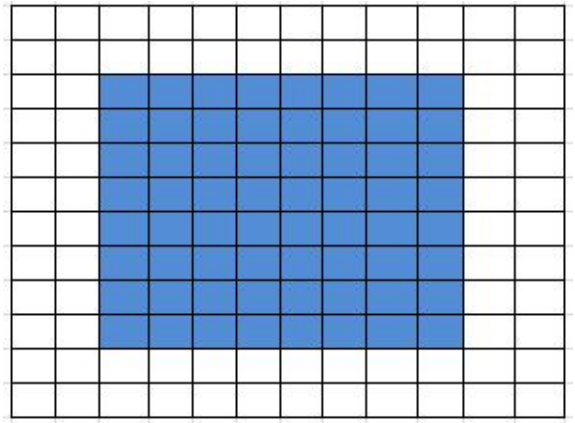


Şekil 2.4: Donatı ve yapı çeliği için gerilme-şekildeğiştirme grafiği [6].

2.3 Algoritmanın Tanımı

2.3.1 Kesit alanının matris olarak ifade edilmesi

Genel şekil özelliklerine sahip olan bir kesit, Sfakianakis'in [3] ifade ettiği gibi, birim kare alt alanlara dönüştürülmektedir. Sfakianakis [3] bu alt alanları "*ribbon*" olarak tanımlamıştır. Bu tez çalışmasında Sfakianakis'in tanımladığı "*ribbon*" yaklaşımından farklı olarak, kesit bir matris olarak tanımlanmaktadır. Bu durum literatürde yer alan diğer yöntemlerle farklılık oluşturmaktadır, Şekil 2.5. Kesit geometrisinin tanımlanması için kullanılan matrise *alan matrisi* adı verilmektedir, Şekil 2.6.



Şekil 2.5: Kesit alanını oluşturan birim kare alanlar.

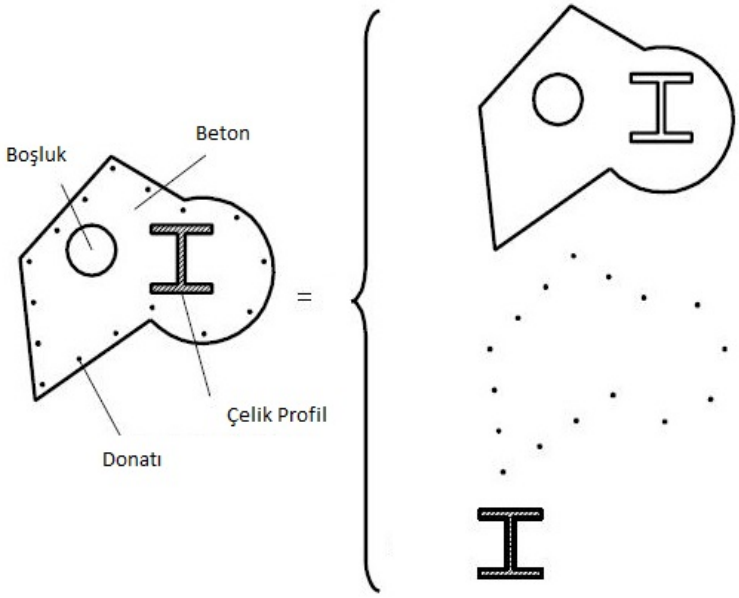
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 2.6: Kesit alanının matris olarak ifadesi.

Şekil 2.5 te verilen büyük siyah karolaj ekranda tanımlanmış çözünürlüğü göstermektedir. İçine yerleştirilen mavi dikdörtgen ise fiziksel olarak kesitin oluşturulacağı bölgeye karşı gelmektedir. Kesit *alan matrisi* içinde boş bölümler "0" ile dolu bölümler de "1" ile işaretlenmiştir. KAP programı 800 x 800 lük karolaj kullanmaktadır.

$$KesitAlan = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2.11)}$$

Örneğin Şekil 2.7 de tanımlanan kesitin içindeki dairesel boşluk ilgili matris hücrelerine "0" girilerek temsil edilmektedir.



Şekil 2.7: Kesitin beton, çelik profil ve donatı olarak ayrıklaştırılmış hali.

Şekil 2.7 deki gibi karmaşık bir kesitte, ayrıklaştırma işlemi uygulandıktan sonra *alan matrisleri* kesitte yer alan her sargılı ve/veya sargısız beton, donatı yada çelik profil gibi tüm farklı malzemeler için ayrı ayrı oluşturulur. Donatı çeliği hariç beton, çelik profil ve boşluklar tümü birim kare alanlar ile ifade edilir. Donatı çeliği ise geometrik merkezden geçtiği varsayılan, birim kare alandan bağımsız var (1) bilgisi ile ifade edilir. Donatı çeliğinin bulunduğu kesitte betonun devam ettiği varsayılır.

İçinde 4 adet boyuna donatı bulunan bir betonarme kesitte beton ve donatı çeliği matrislerinin tanımlanması Şekil 2.8 de yapılmıştır.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Kesit

=

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Beton

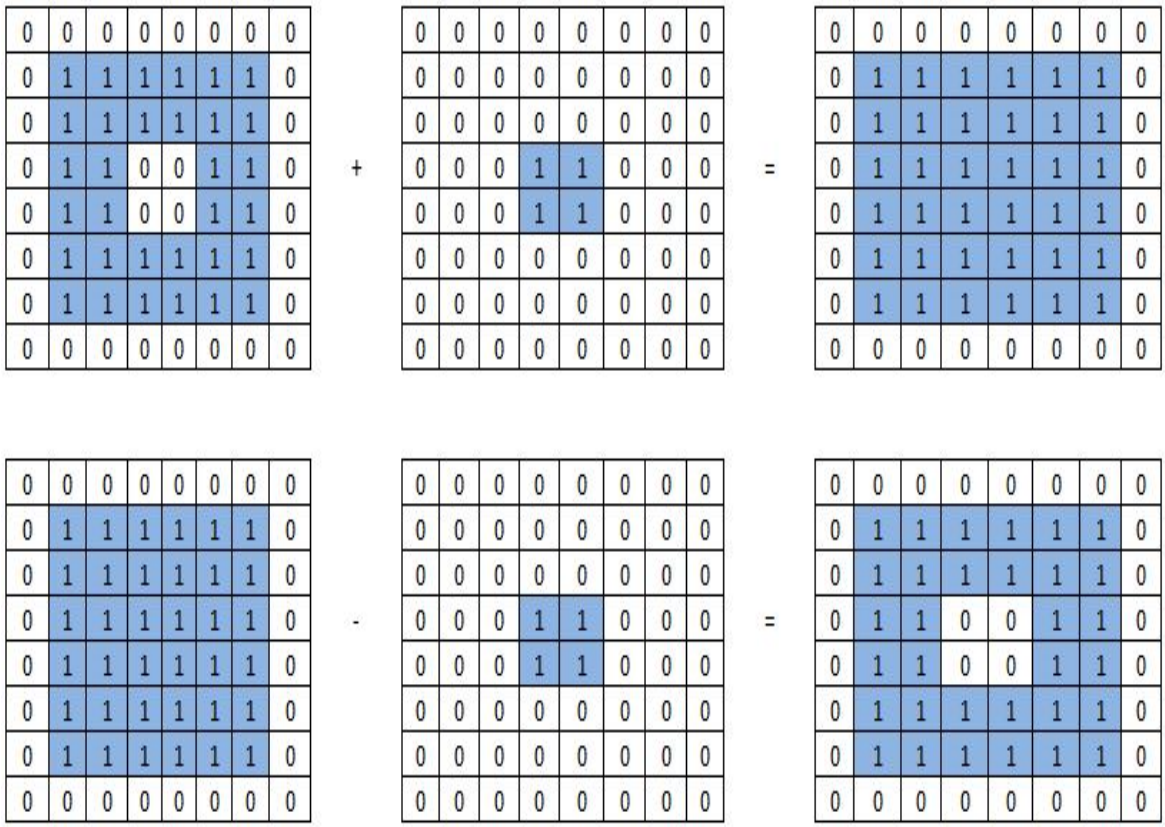
+

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Donatı çeliği

Şekil 2.8: 4 adet aynı çaptaki donatıdan meydana gelen kesitin alan matrislerine ayrılmış biçimi.

Bu *alan matrislerine* alan ekleme ya da alan çıkarma işlemleri diğer yöntemlere göre kolaylıkla yapılabilmektedir, Şekil 2.9.



Şekil 2.9: Alan matrislerinde kesit ekleme ve çıkarma işlemi.

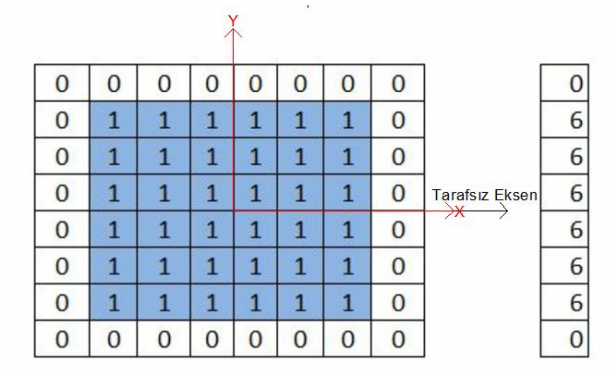
Birim alan vektörü, her bir *alan matrisinin* içinde var (1) ile temsil edilen alan değerlerini m^2 cinsinden tutan vektördür. Birim alan vektörünün eleman sayısı, kesitte ayrıklaştırılmış *alan matrisi* sayısı kadardır.

Kesiti oluşturan tüm *alan matrislerinde* birim alan ve ilgili malzemenin özgül ağırlığı (ɣ) çarpılarak toplanır. Donatı çeliği için, ilgili *alan matrisiyle* donatı alanı ve özgül ağırlık çarpılarak toplanır. Ortaya çıkan bu yeni matrise *genel alan matrisi* adı verilir. *Genel alan matrisinin* terimleri Denklem (2.12) tanımlandığı gibi hesaplanır.

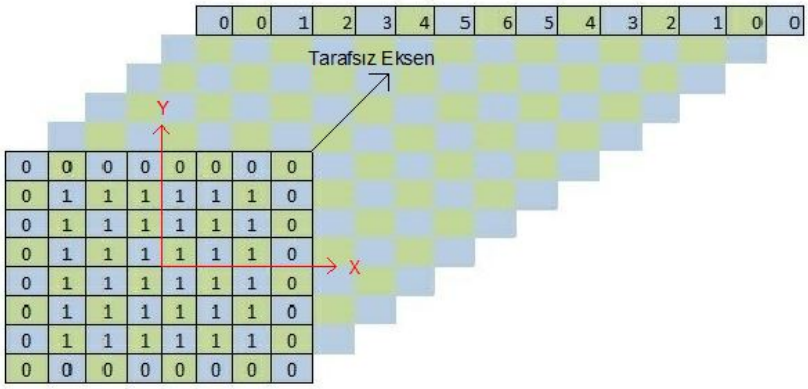
$$
\begin{aligned}
Genel\ Alan\ Matrisi = \\
&\left(BirimAlan(1)\ x\ ɣ_1\ x\ AlanMatrisi1\right) + \\
&\left(BirimAlan\ (2)\ x\ ɣ_2\ \ x\ AlanMatrisi2\right) \quad + \\
&\left(BirimAlan\ (3)\ x\ ɣ_3\ x\ AlanMatrisi3\right) \quad + \ \ldots \qquad \textbf{(2.12)}
\end{aligned}
$$

2.3.2 Alan ve genel alan matrislerinin vektör olarak ifade edilmesi

Alan matrisi ve *genel alan matrisinin* aynı hizadaki terimleri tarafsız eksenin konumuna bağlı olarak toplanarak *alan vektörüne* ya da *genel alan vektörüne* geçilir, Şekil 2.10.

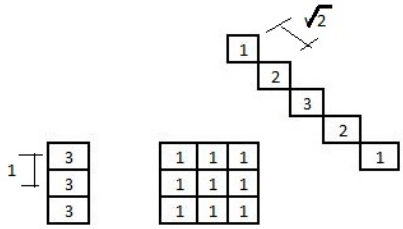


Şekil 2.10: Tarafsız eksenin X doğrultusu ile yaptığı açının 0° olması durumu için alan ve genel alan matrislerinden vektöre geçiş.



Şekil 2.11: Tarafsız eksenin X doğrultusu ile yaptığı açının 45° olması durumu için alan ve genel alan matrislerinden vektöre geçiş.

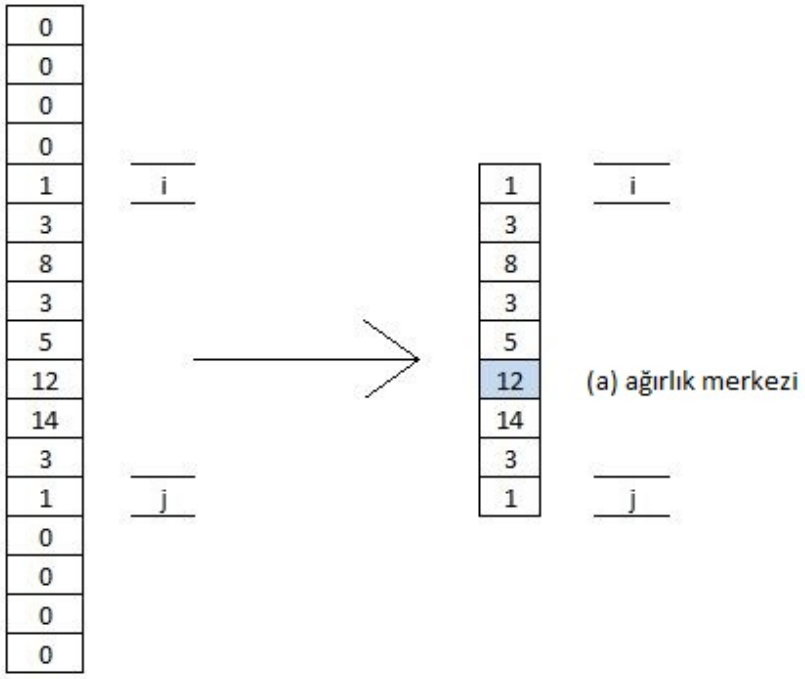
Tarafsız eksenin X doğrultusu ile yaptığı açıya bağlı olarak dilim sayısı ve elde edilen vektör dilimlerinin arasındaki uzaklık değişmektedir. Bununla ilgili olarak Şekil 2.12 de verilmiştir.



Şekil 2.12: Tarafsız eksenin X doğrultusu ile yaptığı açıya bağlı olarak dilim sayısı ve dilimler arasındaki uzaklığın değişimi.

2.3.3 Kesitin tarafsız eksenle yaptığı açıya bağlı olarak elde edilen genel alan vektöründen kesitin plastik merkezi ve dilim sayısının belirlenmesi

Genel alan vektöründe üst ve altta yer alan sıfır bölümler çıkarılarak vektördeki sırası (i ve j) kaydedilir. Kaydedilmiş olan vektör sırası (i ve j) malzemelerden (beton, çelik vb.) elde edilmiş alan vektörlerine uygulanır. Böylelikle kesit için fiber yöntemde kullanılacak gerçek dilim sayılarına ulaşılır.



Şekil 2.13: Genel alan vektöründen boşlukların atılması.

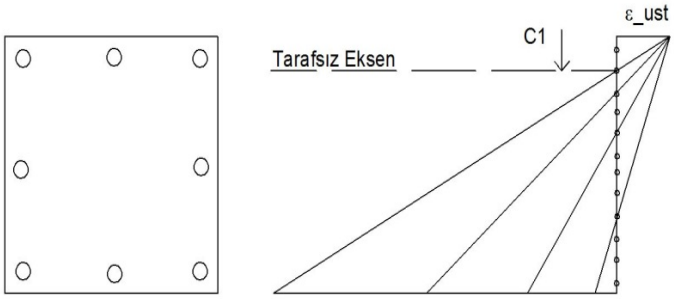
Plastik merkez, kesitte farklı özgül ağırlığa sahip malzemeler (beton, çelik vb) nedeniyle ağırlık merkezinin, geometrik merkezden farklı olması durumuna karşı gelmektedir. *Genel alan vektöründen* elde edilen ağırlık merkezi, *plastik merkeze* karşı gelmektedir.

Genel alan vektörü, kesitin tarafsız ekseninin X doğrultusu ile yaptığı açıya bağlı olarak dilimlenerek tanımlanmaktadır. Aşağıdaki formülde ağırlık merkezinin hangi dilimde bulunduğu ya da vektördeki sırası hesaplanmaktadır.

$$Ağırlık\ Merkezinin\ Vektördeki\ Sırası\ = \frac{(Vektör\ Sırası)\ x\ (Vektör\ Degeri)}{\sum_{k=1}^{n}(Vektör\ Değeri)_k} \tag{2.13}$$

2.3.4 Tarafsız ekseninin yerinin belirlenmesi

Kesitte en uç basınç lifinin şekildeğiştirmesi ε_ust olarak tanımlanır. Tarafsız eksenin basınç lifinden uzaklığı C_1 indisiyle gösterilir, Şekil 2.14.



Şekil 2.14: Tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi.

Bir ε_ust değeri için izlenen hesap yönteminin adımları söyledir.

1. C_1 için bir değer şeçilir. Şeçilen bu eksen derinliği için, tüm beton dilimleri ve donatı merkezleri hizasındaki şekildeğiştirme miktarları hesaplanır, [13].
2. İlgili mazeme modellerine gidilerek bu şekildeğiştirmelere karşı gelen gerilmeler belirlenir. Gerilme değerleri ilgili elemanların alanlarıyla çarpılarak kuvvetlere geçilir, [13].
3. Kesitte oluşan basınç ve çekme kuvvetlerinin farkıyla, dış normal kuvvetin dengesi aranır.

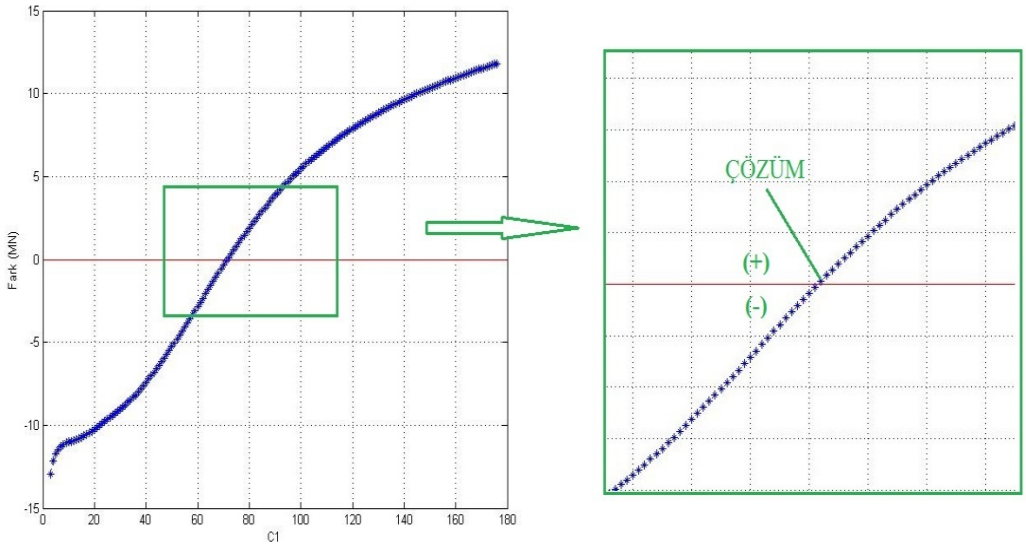
$$Fark = \sum Basınç - \sum Çekme \ - Normal\ kuvvet \text{ [13]} \qquad \textbf{(2.14)}$$

   Denklem (2.14) için öngörülen doğruluk sağlanana kadar 1-3 arası adımlar tekrarlanır, [13].

4. Denge yeter doğrulukta sağlandıktan sonra çekme ve basınç kuvvetlerinin kesit ağırlık merkezine göre momentleri alınarak, verilmiş normal kuvvet ve şekildeğiştirme etkisinde kesitte oluşan moment belirlenir, [13].

Bir ε_ust değeri için şeçilmiş farklı C_1 değerleri arasından (2.14) bağıntısını minimum yapan çözüm sonuç olarak kullanılır.

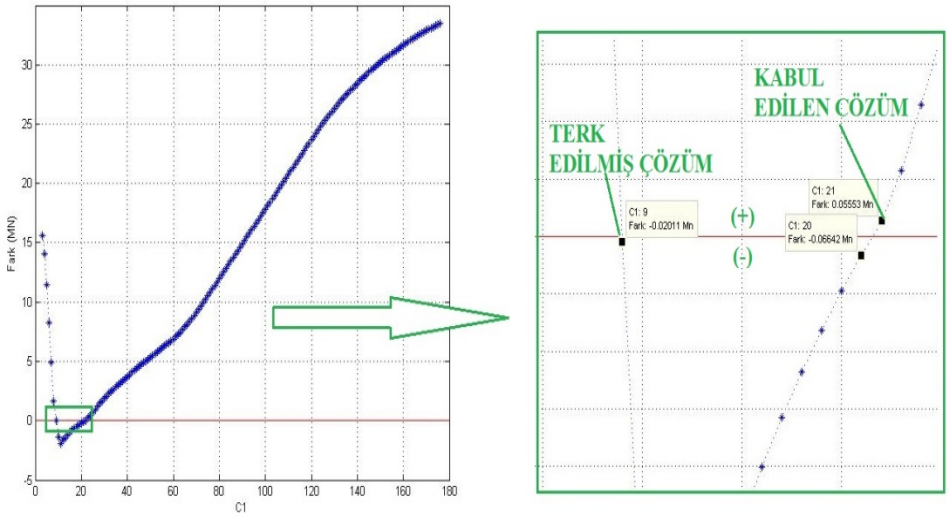
Tarafsız eksenin yeri belirlenirken Denklem (2.3.4) için minimum olduğu *Fark* değeri poziften (+), negatife (-) geçilen C_1 derinliğidir. C_1 derinliği kesin tanımlanabilseydi teorik olarak *Fark* değerinin sıfır olması gerekirdi. Ancak kullanılan dilim sayıları dolasıyla bu mümkün olamamaktadır.



Şekil 2.15: Tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi.

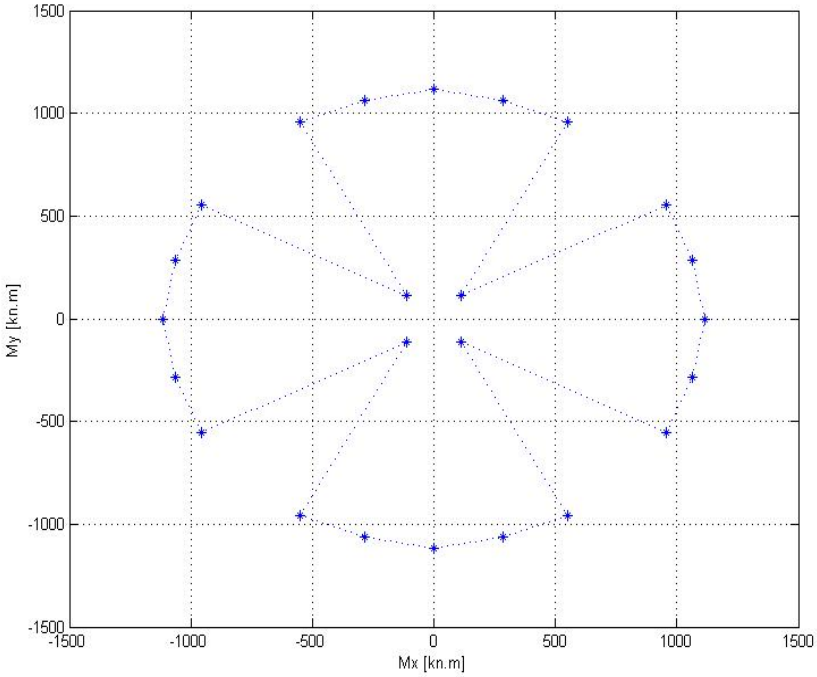
Denklem (2.14) kullanılarak belirlenen miminum *Fark* değerinin bazen gerçek çözüm olamadığı görülmüştür. Bu durumda özellikle çekme kuvveti taşıyan kesitlerde karşılaşılabilmektedir. Bu durumla ilgili aşağıdaki iyileştirmeler yapılmıştır.

Tarafsız eksen konumu belirlenirken poziften (+) negatife (-) geçilen tüm C_1 derinlikleri belirlenir. Eğer birden fazla poziften negatife geçiş var ise daha sürekli olan duruma ait büyüklük C_1 olarak alınır, Şekil 2.16.

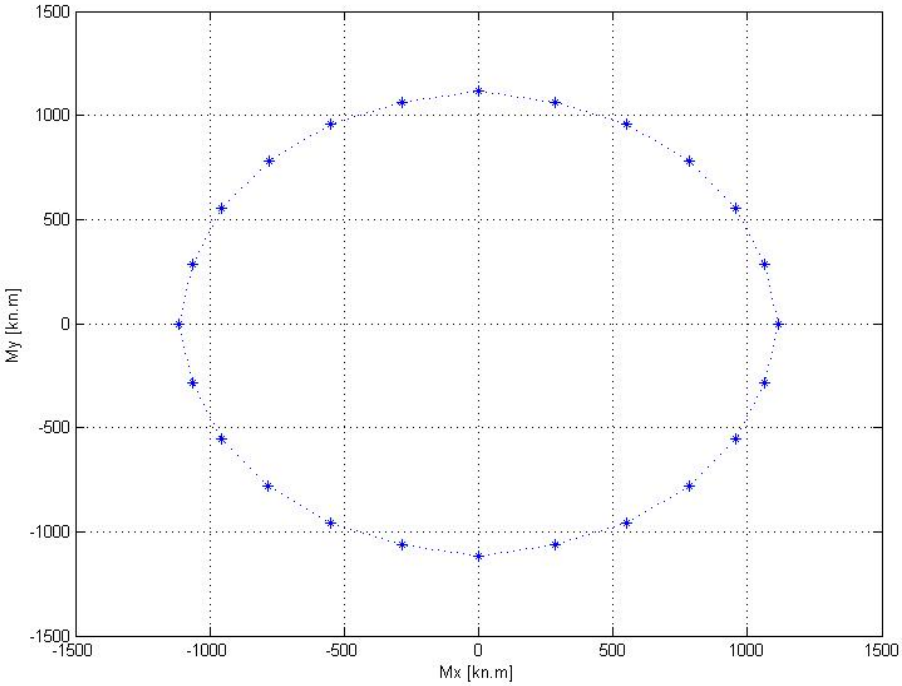


Şekil 2.16: Tarafsız eksenin yerinin belirlenmesinde denklem (2.14) kullanılarak geliştirilmiş matematiksel modelin kullanılması.

Kare kompozit kesit (Örnek 2) için elde edilen Şekil 2.17 tarafsız eksenin 45° lik durumları için çözüm üretilemezken Şekil 2.18 de çözüm elde edilmiştir.

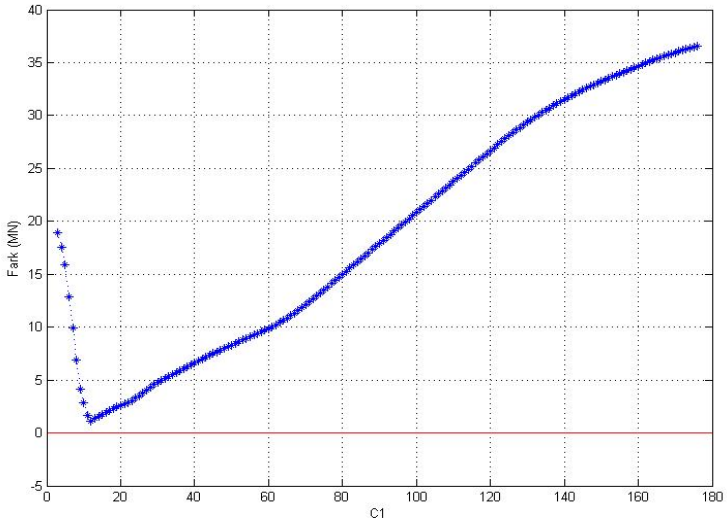


Şekil 2.17: Tarafsız eksenin konumu belirlemede klasik yöntemin kullanıldığı durumda M_X - M_Y etkileşim diyagramı.



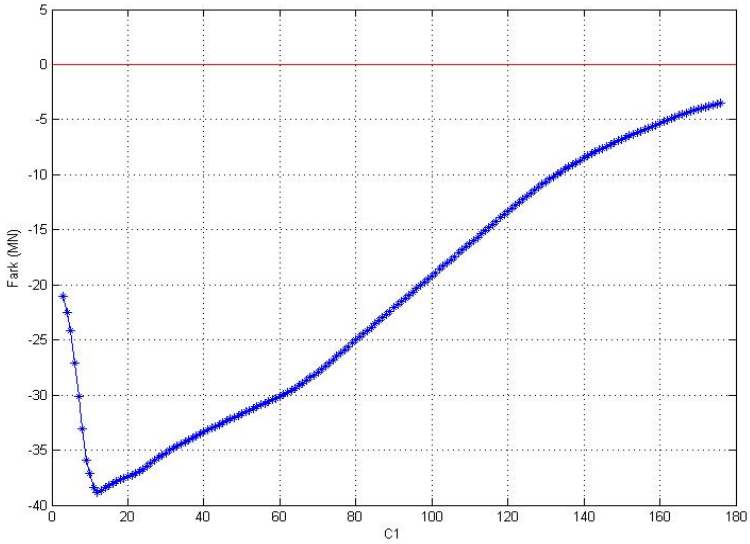
Şekil 2.18: Tarafsız eksenin konumunu belirlemede geliştirilmiş matematiksel modelin kullanıldığı durumda M_X - M_Y etkileşim diyagramı.

Çekme eksenel kuvveti etkisindeki bir kesitte kapasite üstü yükleme söz konusu ise, minimum *Fark* a dayalı bir çözüm gerçek çözüm olamayacaktır, Şekil 2.19. Geliştirilmiş derinlik bulma yöntemi uygulandığında bir *Fark* değeri bulunamayacağı için çözüm olmadığı yakalanacaktır.



Şekil 2.19: Çekme eksenel kuvveti etkisindeki bir kesitte kapasite üstü yükleme durumu.

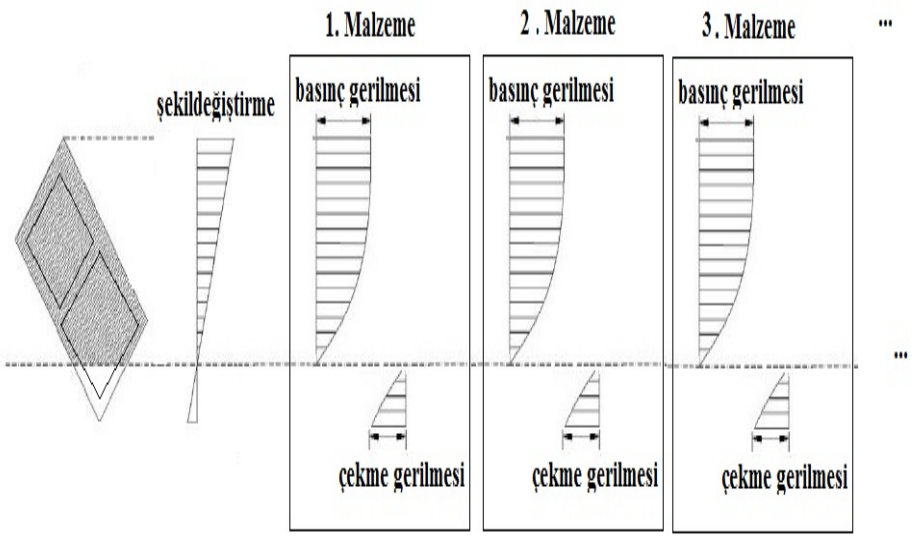
Basınç eksenel kuvveti etkisindeki bir kesitte kapasite üstü yükleme söz konusu ise minimum *Fark* a dayalı bir çözüm gerçek çözüm olamayacaktır, Şekil 2.21. Geliştirilmiş derinlik belirleme yöntemine göre, *Fark* için poziften (+), negatife (-) geçiş bulunmadığı için problemin çözümsüz olduğu yakalanabilecektir.



Şekil 2.20: Basınç eksenel kuvveti etkisindeki bir kesitte kapasite üstü yükleme durumu.

2.3.5 Tarafsız eksene göre gerilmelerin hesaplanması

Şeçilen bir ε_ust değeri için kesitin tüm dilimlerindeki şekildeğiştirme değerleri *Bernoulli-Navier Hipotezine* göre belirlenir. Hesaplanan bu değerlere göre ilgili malzeme modellerinden basınç ve çekme gerilmeleri ayrı ayrı hesaplanır, Şekil 2.21. Hesaplanan gerilmeler, ilgili alan vektörleri ve birim alan ile çarpılır. Donatı için birim alan değeri, kullanılan donatının çapı olarak girilirken beton ve yapı çeliği için gerçek birim alanlar kullanılır. Gerçek birim alan, kesit alanının matrise dönüştürerek bir hücreye karşı gelen alandır.



Şekil 2.21: Kesitin şekildeğiştirme-gerilme hesap grafiği.

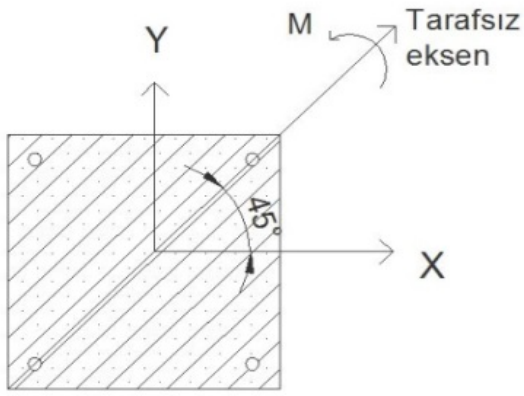
2.3.6 Momentin hesaplanması

Kesitte hesaplanan çekme ve basınç kuvvetleri ağırlık merkezine olan uzaklıkları ile çarpılarak moment değeri hesaplanır. Bu moment X ve Y dik eksenlerine dönüştürülerek M_X ve M_Y momentlerine geçilir. Dönüşüm için (2.15) de verilen bağıntılar kullanılır. Bu bağıntılarda θ tarafsız eksenin X ekseniyle yaptığı açıyı göstermektedir.

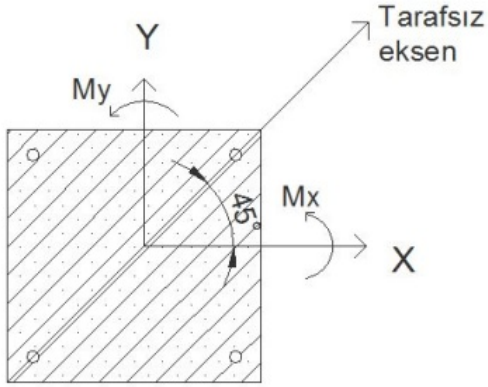
$$M_X = M \times Cos\ \theta$$

$$M_Y = M \times Sin\ \theta \qquad \textbf{(2.15)}$$

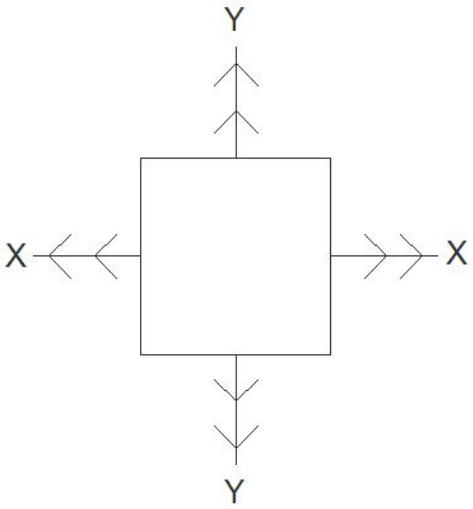
KAP programının moment hesabında pozitif kabul ettiği yönler Şekil 2.24 de gösterilmiştir.



Şekil 2.22: Tarafsız eksene göre hesaplanmış moment.



Şekil 2.23: Tarafsız eksene göre hesaplanmış M_X, M_Y momentleri.



Şekil 2.24: Program kesit için M_X, M_Y hesaplarken esas aldığı moment yönleri.

2.4 Algoritmanın Akış Şeması

Geliştirilen algoritmaya ait genel akış diyagramı Şekil 2.25 de verilmiştir. Hesabın önemli adımları şunlardır:

1) Kesiti oluşturan beton, donatı ve/veya çelik profil kısımları ayrıklaştırılır. Ayrıklaştırılma işleminde 50×50 veya 800×800 boyutlarda matris kullanılabilir. *Alan matrisi*, *genel alan matrisi*, *birim alan vektörü* hazırlanır.

2) Kesiti oluşturan ve "*2.2 Kullanılan Malzeme Modelleri*" başlığında tanımlanan malzeme modelleri girilir.

3) Kesitin en uç basınç lifindeki en büyük şekildeğiştirme ve şekildeğiştirme artım miktarı kullanıcı tarafından tanımlanır. İki eksenli moment hesabında istenilen hassasiyette hesap yapılabilmesi için, tarafsız eksenin kesitin X ekseni ile yapacağı açı artım miktarı girilir.

4) Tarafsız eksenin kesitin X ekseni ile yaptığı açı artım miktarı kadar artırılarak, 0° den 360° ye kadar döngü gerçekleştirilir. Hesap yapılan açı değeri, *alan matrisi*, *genel alan matrisi*, *birim alan vektörü* değişkenleri *KesitveAlanAnalizi* alt fonksiyonuna gönderilir.

5) *KesitveAlanAnalizi* alt fonksiyonu, tarafsız eksenin kesitin X ekseni ile yaptığı açıya göre dilimleme yaparak varsa kesitteki boşluklar çıkartır. Dilim sayısı ve kesitin ağırlık merkezi, "*2.3.2 Alan matrislerinin ve genel alan matrislerinin vektör olarak ifade edilmesi*" ve "*2.3.3 Kesitin tarafsız eksenle yaptığı açıya bağlı olarak elde edilen genel alan vektöründen kesitin plastik merkezi ve dilim sayısının belirlenmesi*" başlıklarında anlatıldığı gibi hesaplanır.

6) Dilimlere ayrılmış kesitin, en uç basınç lifinde bir şekildeğiştirme miktarı seçilir. Amaç, bu şekildeğiştirme miktarı için kesitte denge denklemlerini sağlayacak tarafsız eksen pozisyonunun bulunmasıdır, [13].

7) Seçilen bir tarafsız eksen derinliği için, tüm beton ve/veya çelik profil dilimlerindeki şekildeğiştirme miktarları hesaplanır. Donatılar ise geometrik merkezlerindeki şekildeğiştirme miktarı belirlenir. İlgili malzeme modeline gidilerek bu şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilme, "*2.3.5 Tarafsız eksene göre gerilmelerin hesaplanması*" başlığında anlatıldığı gibi belirlenir. Gerilme değerleri ilgili elemanların alanlarıyla çarpılarak kuvvetlere geçilir.

8) Kesitte oluşan basınç ve çekme kuvvetlerinin farkıyla normal kuvvet dengesi, "*2.3.4 Tarafsız ekseninin yerinin belirlenmesi*" başlığında anlatıldığı gibi aranır. Bu amaçla *TarafsızEksenAnalizi* alt fonksiyonu kullanılır.

Bu denge yeter doğrulukta sağlanana kadar 6-8 arası adımlar tekrarlanır.

9) Denge yeter doğrulukta sağlandıktan sonra çekme ve basınç kuvvetlerinin kesit ağırlık merkezine göre momentleri, "*2.3.6 Momentin hesaplanması*" başlığında anlatıldığı gibi alınır. Hesaplanan momentler, kesitin en uç basınç lifindeki şekildeğiştirme miktarı, tarafsız eksen derinliği gibi büyüklükler kaydedilir. Madde 6 ya gidilerek yeni bir şekildeğiştirme durumu için hesap tekrarlanır.

10) Madde 5 gidilerek başka açı değeri için işlem tekrarlanır.

2.5 Programın Geliştirilmesinde Kullanılan Yazılım Dilleri

Kesit analiz programı KAP, bir kesit için 10 farklı malzeme tanımlamaya imkan vermektedir. Her malzeme için 800×800 matris kullanılmaktadır. Program girdi olarak 1×800×800=640.000 ile 10×800×800=6.400.000 adet değişkeni tanımlamaya ve analiz etmeye imkân verecek güçlü bir yazılım desteğine sahiptir. Aynı zamanda, tarafsız eksenin konumu belirlenirken kullanılan iteratif algoritmada yaklaşık 100.000 ile 10.000.0000.000 arasında işlem yapabilmektedir. Programın koşturulduğu bilgisayarın özellikleri 64 bit, i5, 2.50 ghz, 4 gb ram olmak üzere;

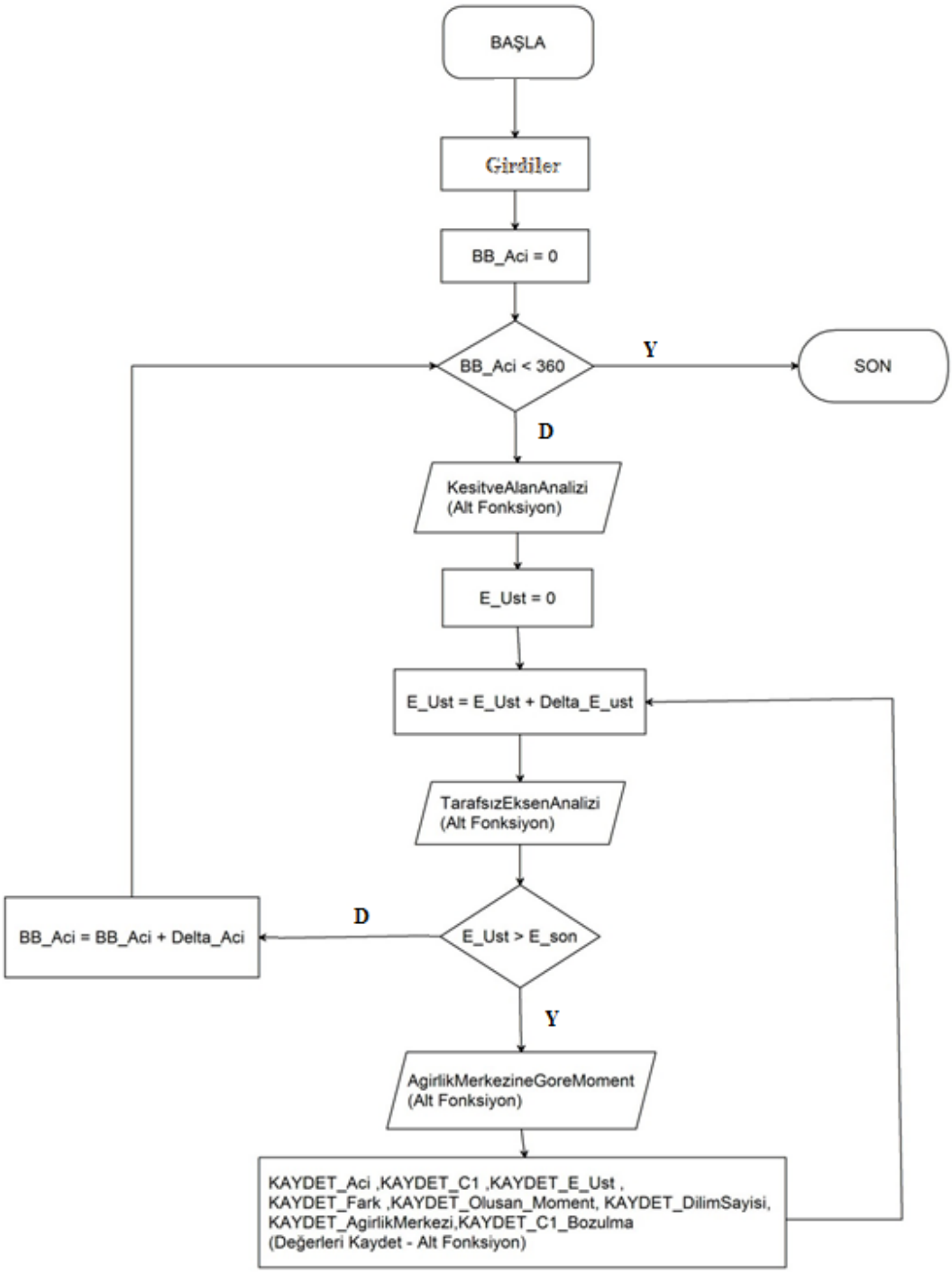
- Sargısız beton malzeme modeli kullanılan betonarme dikdörtgen bir kesit,
- Tarafsız eksenin kesitin X ekseni ile yaptığı açı artım miktarı 15°,
- *Delta_ε_ust* 0,0005 olması durumunda 8,5 sn gibi bir sürede analizi tamamlamaktadır.

Kesit analiz programı KAP, şu önemli özelliklere sahiptir.

- Programın benzer programların gerçekleştirdiği işlem sayısı ve performans bakımından daha hızlı ve daha güçlüdür,
- Programın olabildiğince esnek olması, tüm girdi ve hesap kısımlarının kullanıcı tarafından tanımlanabilmesi,
- Programın modüler ve geliştirilebilir olması,
- 2 gb ram e sahip bir bilgisayarda (windows xp, windows me) hariçinde tüm windows işletim sistemlerinde çalışabilmektedir.

Kesit analiz programı KAP oluşturulurken yaklaşık %70 oranında Matlab, %20 oranında C++, %10 oranında Java yazılım dilleri kullanılmıştır. Yazılımın

matematiksel işlemleri gerçekleştiren bölümleri, Matlab ve C++ ile yazılmıştır. Grafiksel bölümler ise Matlab ve Java kullanılarak yazılmıştır.



Şekil 2.25: Programın genel akış şeması.

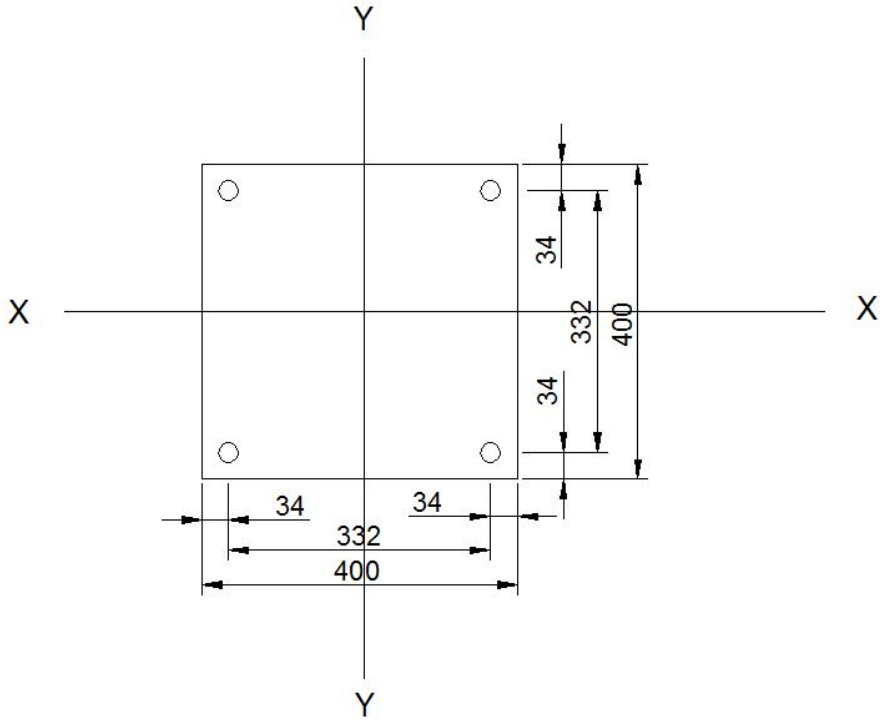
3. ÖRNEKLER

3.1 KAP Programının Ürettiği Sonuçların Doğrulamasına Yönelik Uygulamalar

Geliştirilen algoritma ile ona dayalı olarak üretilen yazılımın doğrulanması amacıyla, çoğu literatürden seçilmiş olan farklı kesitler üzerinde çalışılmıştır.

3.1.1 Örnek 1

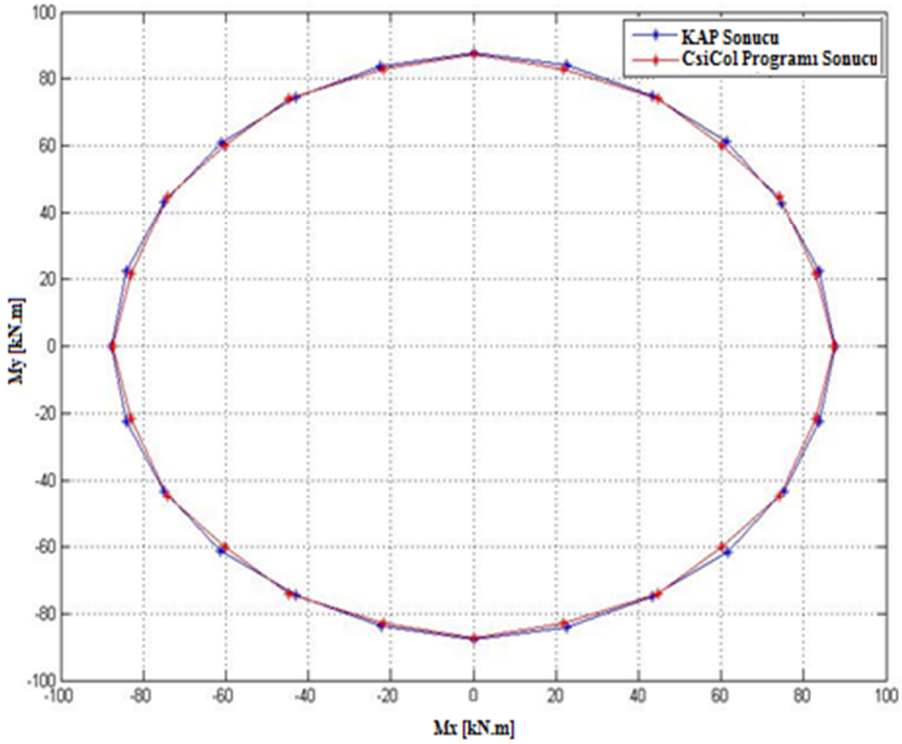
Geometrik özellikleri Şekil 3.1 de verilen betonarme kolon geliştirilen KAP ve uygulamada yaygın olarak kullanılan CSICOL [14] yazılımları ile analiz edilmiştir. Kesit boyutları 400×400 mm dir. Beton basınç dayanımı 20 MPa dır. Kesitte 4 adet Φ28 boyuna donatı bulunmaktadır. DBYBHY2007 de tanımlanan sargısız beton modeli ve donatı modeli kullanılmıştır. Betonun taşıdığı çekme ihmal edilmiştir. Hesapta 200×200 boyutlarındaki *alan matrisi* kullanılmıştır.



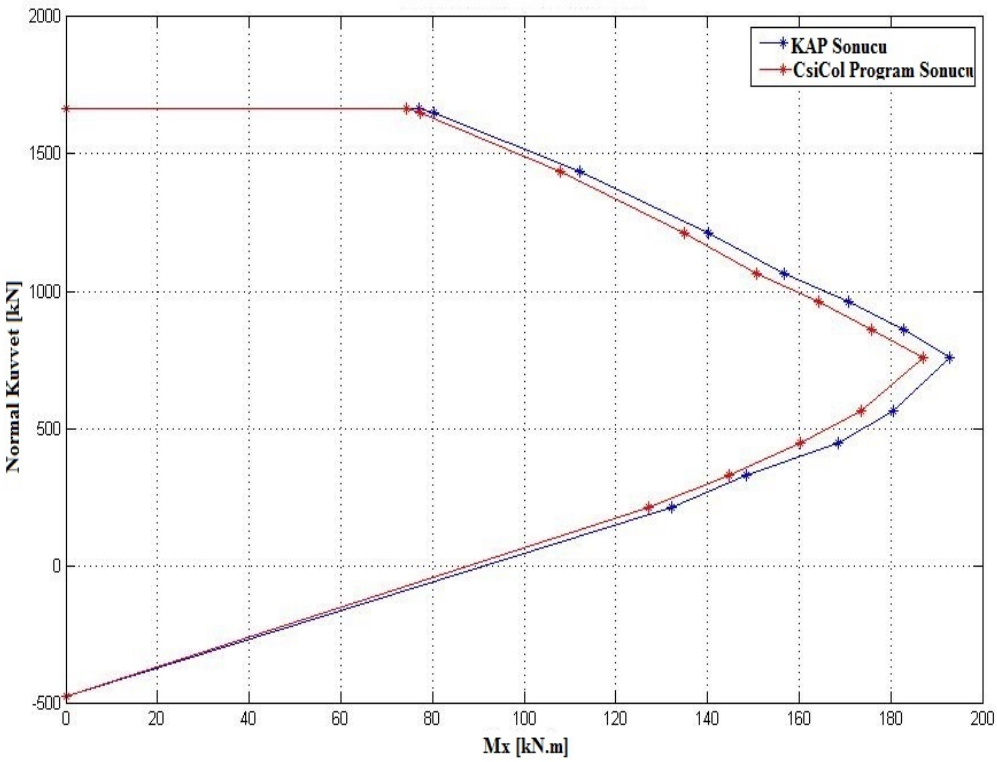
Şekil 3.1: Analizi yapılmış olan kare kesit.

570 kN basınç eksenel kuvveti etkisinde, ε_ust=0.002 basınç şekildeğiştirme durumu için kesitin çizilmiş olan M_X-M_Y grafiği Şekil 3.2 de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi her iki ürettiği eğri üst üste düşmektedir.

Tarafsız eksenin, kesitin X ekseni ile yaptığı açının "0°" olması özel durumunda elde edilen normal kuvvet moment etkileşim ilişkisi Şekil 3.3 de verilmiştir.



Şekil 3.2: Kesitin 570 kN luk eksenel basınç kuvveti etkisindeki M_X-M_Y etkileşim grafiği.



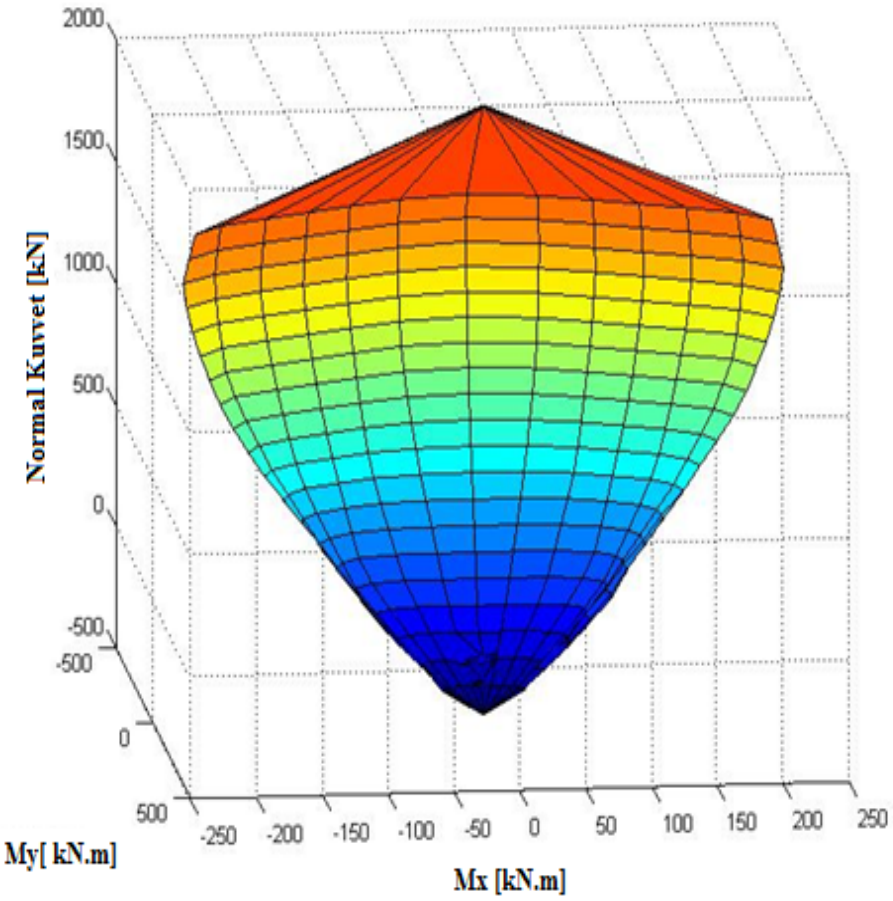
Şekil 3.3: Örnek 1 için N-M_X etkileşim diyagramı.

Kesitin ε_ust =0.005 basınç şekildeğiştirme durumu için oluşturulan normal kuvvet-M_X-M_Y (3d) etkileşim grafiği Şekil 3.4 de verilmiştir. CSICOL [14] yazılımında en fazla 0.003 şekildeğiştirme durumuna kadar hesap yapılabildiği halde, KAP yazılımında değeri ε_ust=0.005 en büyük beton şekildeğiştirmesi içinde hesap yapılmıştır. Şekil 3.4 den de izlendiği gibi farklı eksenel kuvvet aralıkları farklı renklerle ifade edilmiştir.

3.1.2 Örnek 2

Örnek 1 de çalışan betonarme kesitin içerisine Şekil 3.5 de görüldüğü gibi bir çelik yapma kesit yerleştirilmiştir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan yazılımlar, iki temel sebepten dolayı bu örnek için yetersiz kalabilmektedir. Bunlar:

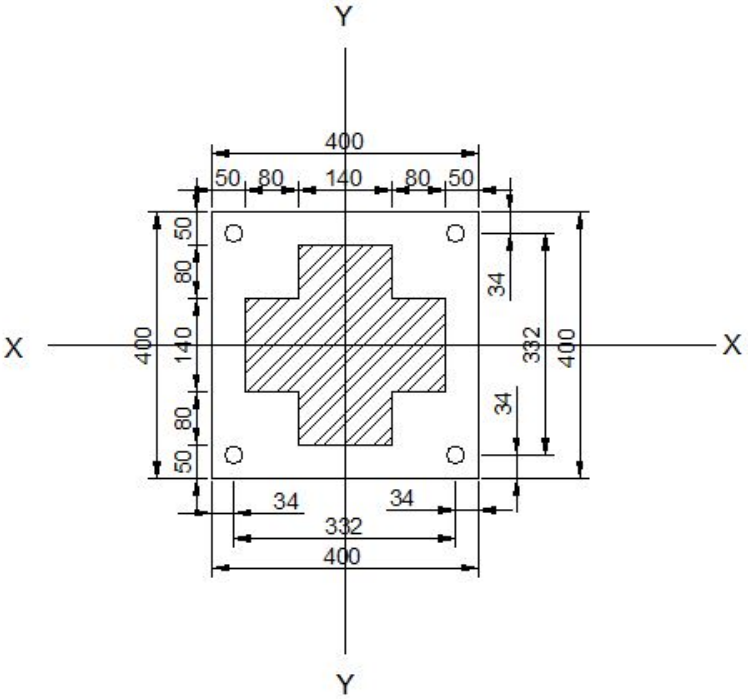
1) Betonarme kesitin içinde kullanılan çelik yapma profilin bu programlarda yer alan standart şekillerden farklı olması



Şekil 3.4: Örnek 1 de incelenen kare betonarme kesitte N-M_X-M_Y etkileşim diyagramı.

2) Bu çalışmada kullanılan ve DBYBHY2007 de verilen sargısız beton ve donatı çelik modellerinin bu yazılımlarda bulunmaması

3) Betonarme kesitte kullanılan sargılı betonun birim şekildeğiştirmesi üst sınırı olan ε_{cu} = 0.01 için yakınsama sağlanamaması.



Şekil 3.5: İçine çelik profil yerleştirilmiş kare kesit.

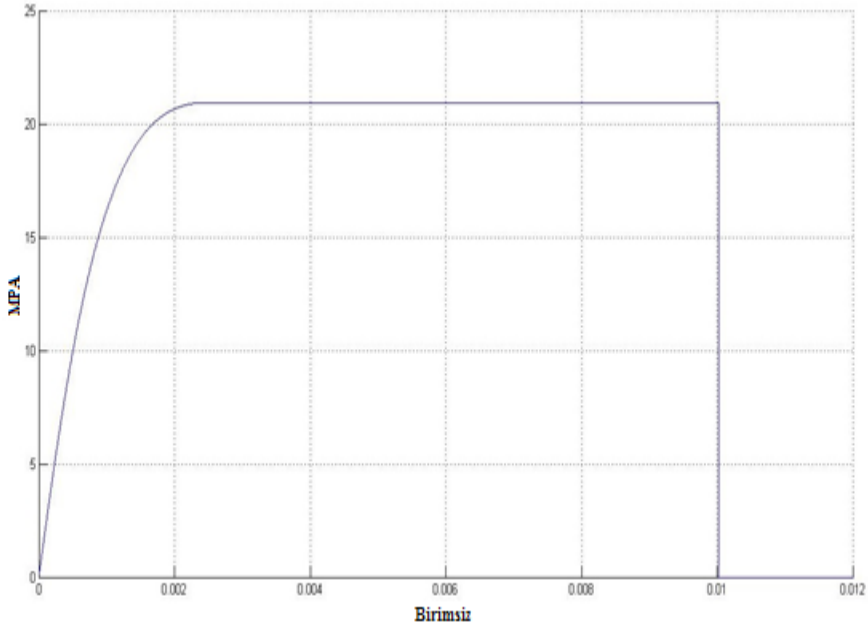
Kesit boyutları 400×400 mm dir, Şekil 3.5. Kesitte 4 adet Φ28 boyuna donatı kulanılmıştır. Beton basınç dayanımı 20 MPa, çelik akma dayanımı da 420 MPa dır. DBYBHY2007 de tanımlanan sargılı beton ve donatı malzeme modelleri kullanılmıştır. Betonun çekme dayanımı ihmal edilmiştir. Kesit 200×200 *alan matrisi* kullanılarak modellenmiştir.

Kesitte iyi bir sargılama sağlanarak betonun ε_{cu} = 0.01 şekildeğiştirme sınırına kadar çalışması sağlanmıştır.

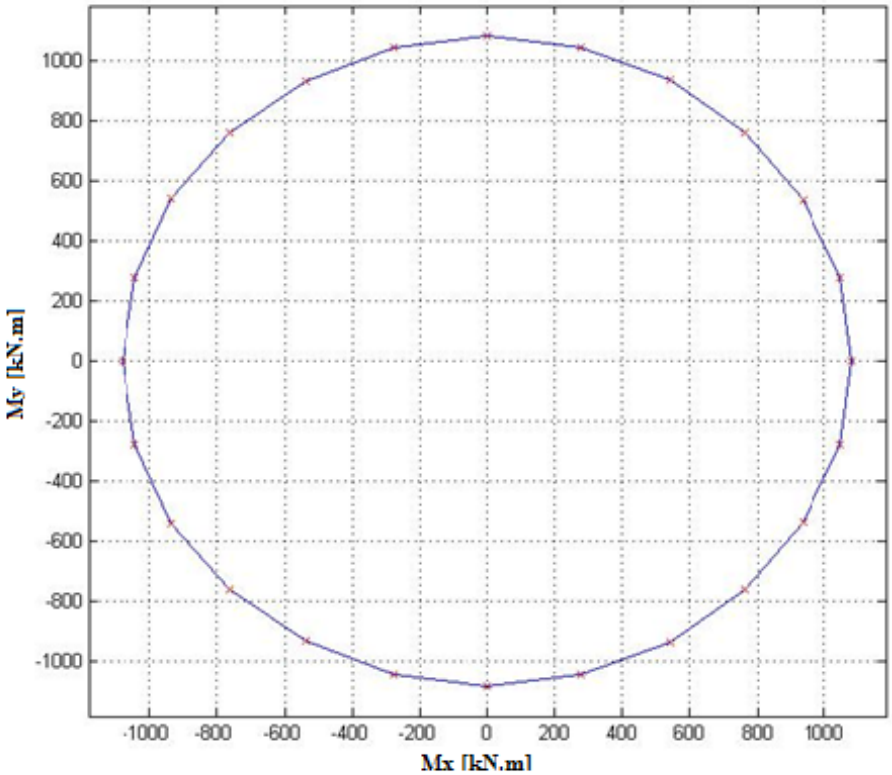
5000 kN luk eksenel basınç kuvveti etkisinde, ε_ust =0.01 basınç şekildeğiştirme durumu için oluşturulan M_X-M_Y etkileşim diyagramı Şekil 3.7 de verilmiştir.

ε_ust =0.01 şekildeğiştirme durumunda, tarafsız eksenin, kesitin X ekseni ile yaptığı açının 0° ve 90° olması özel halleri için hesap yapılmış ve elde edilen iki eğri üst üste çizilmiştir. Beklendiği gibi kesitteki dönel simetri dolasıyla sonuçlar üst üste

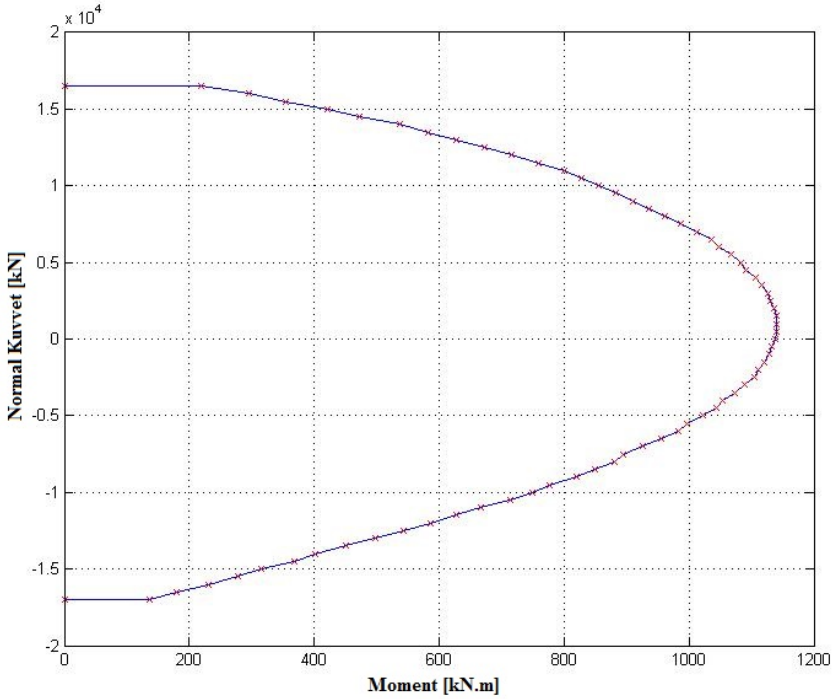
çıkmaktadır. Böylelikle programda farklı açı verilmesiyle ilgili bölümleri doğrulanmış olmaktadır.



Şekil 3.6: Sargılanmış beton modeli.

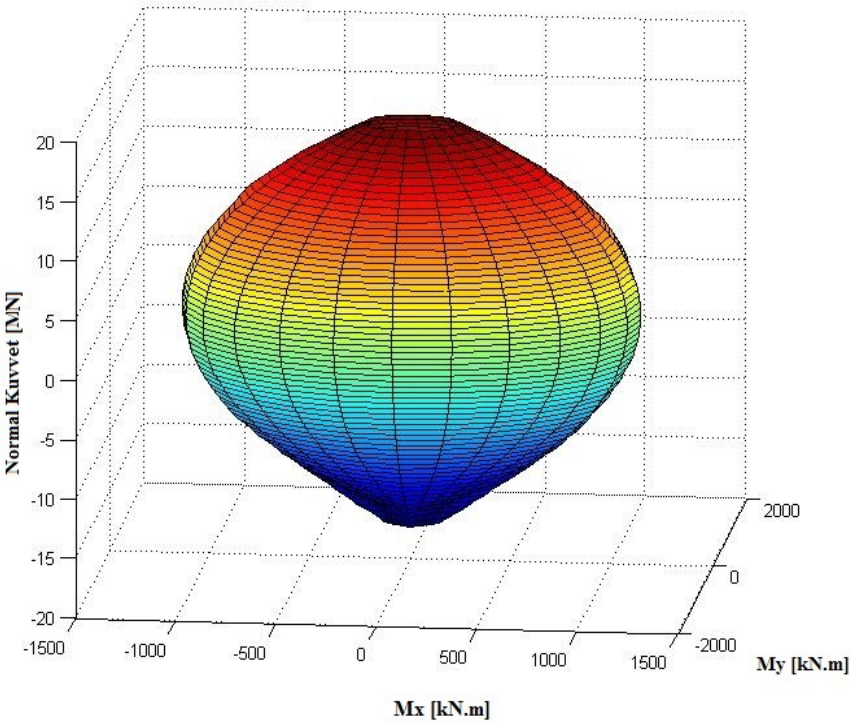


Şekil 3.7: 5000 kN altında kesitin M_X-M_Y grafiği.

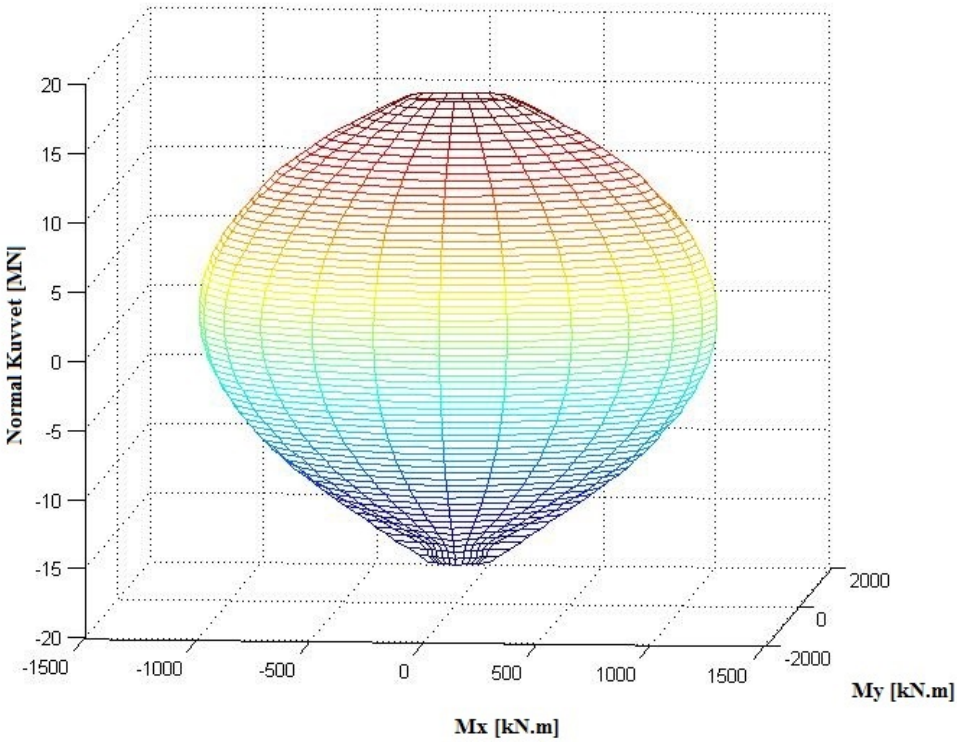


Şekil 3.8: ε_ust=0.01 için kompozit kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği

ε_*ust* =0.01 için N-M_X-M_Y (3d) grafikleri iki ayrı biçimde çizdirilerek, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10. da verilmiştir.

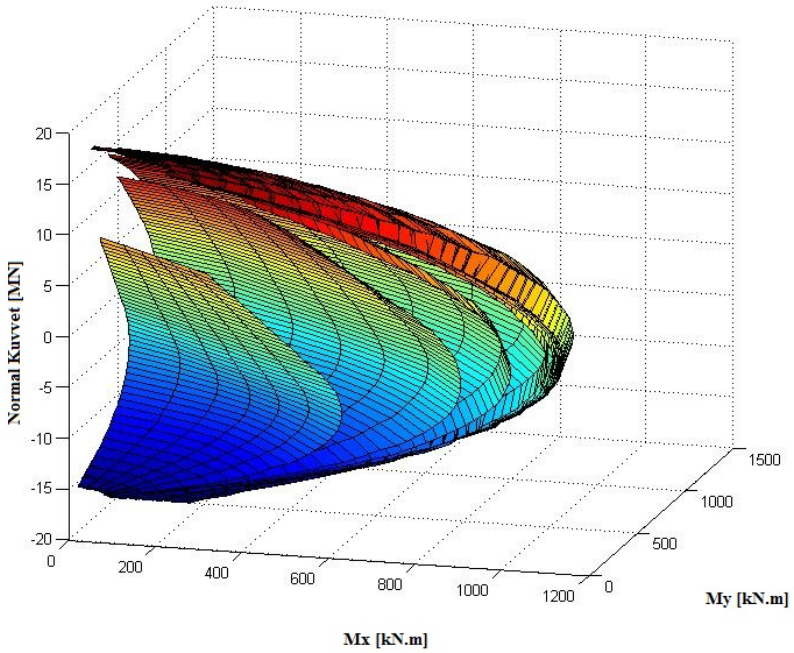


Şekil 3.9: Kompozit kesitin normal kuvvet-M_X-M_Y (3d) etkileşim grafiği (ε_*ust* =0.01).



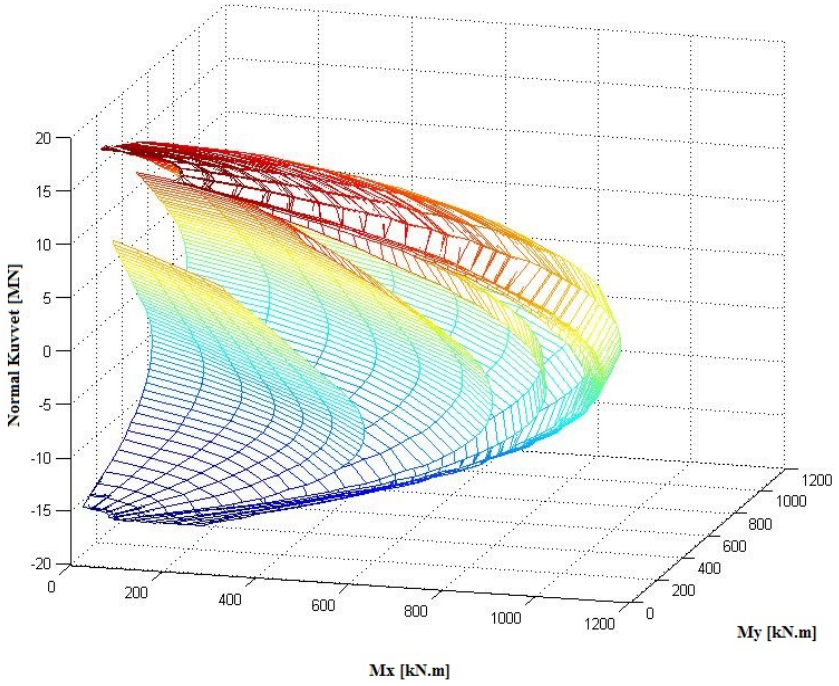
Şekil 3.10: Kompozit kesitin normal kuvvet-M_X-M_Y (3d) etkileşim grafiği (ε_ust =0.01).

Kompozit kesitte ε_ust=0.001 ε_ust=0.01 e kadar $\Delta\varepsilon$ =0.001 artımlarla elde edilen normal kuvvet-M_X-M_Y (3d) etkileşim grafikleri 2 ayrı biçimde Şekil 3.11 ve 3.12 de verilmiştir.



Şekil 3.11: Kompozit kesitin N-M_X-M_Y (3d) grafiği.

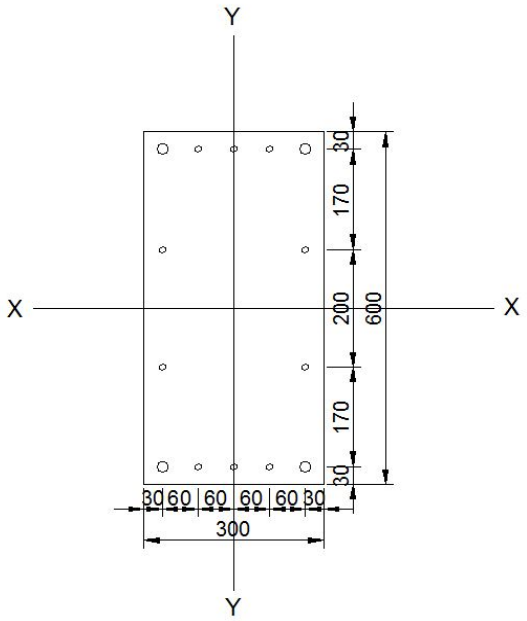
Şekil 3.11 de, ε_ust=0.004 den sonra değerler birbirine çok yaklaştığı için ayrım zorlaşmaktadır. Şekil 3.12 de verilen eğride ise ayrım daha net izlenmektedir.



Şekil 3.12: Kompozit kesitin normal kuvvet-M_X-M_Y (3d) grafiği.

3.1.3 Örnek 3

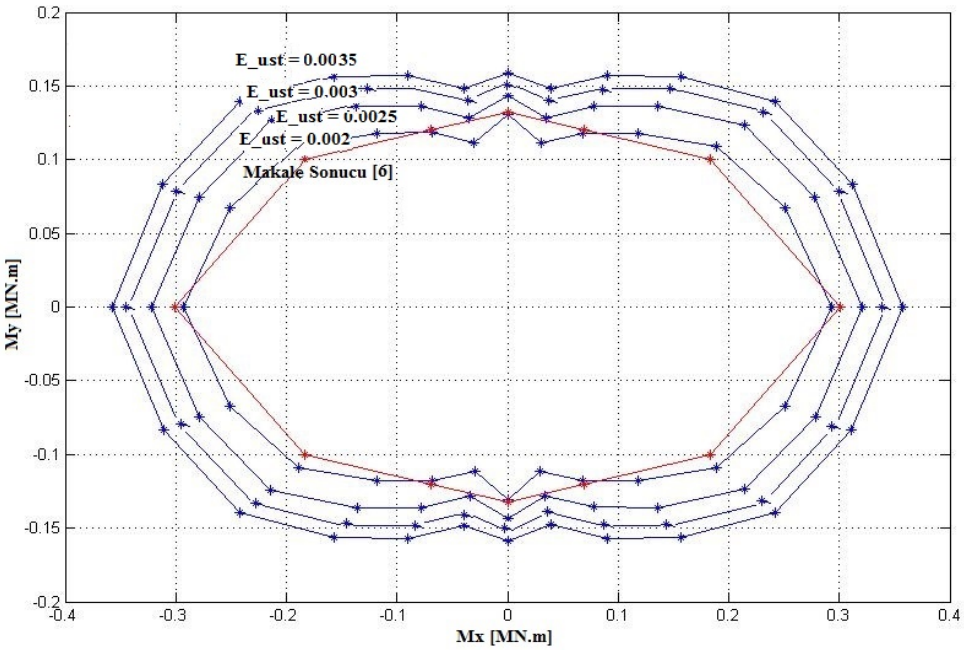
Rosati vd. [6] çalışmasında yer alan bir dikdörtgen betonarme kolon incelenmiştir, Şekil 3.13.



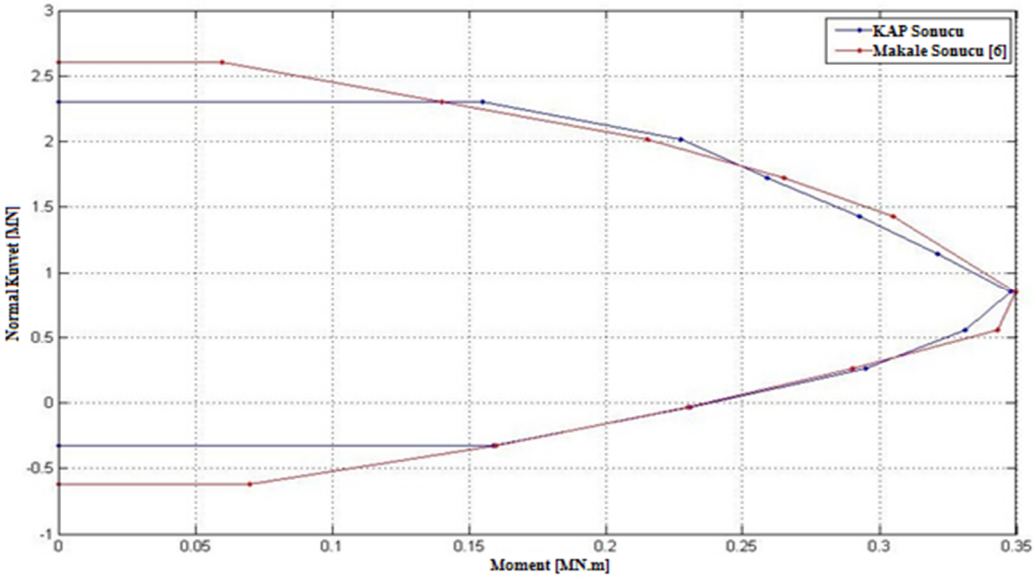
Şekil 3.13: Dikdörtgen kesitli kolon [6].

Betondaki en büyük basınç şekildeğiştirmesinin ε_ust =0.002 olduğu durumda 1.432 MN luk basınç kuvveti etkisindeki kesitte KAP yazılımı ile elde edilen sonuçlar Rosati vd. [6] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tarafsız eksenin, kesitin X ekseni ile yaptığı açının "0°" olması durumunda, ε_ust =0.002 şekildeğiştirme durumu için elde edilen normal kuvvet-moment etkileşim grafikleri Şekil 3.15 de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.14: Dikdörtgen kesitin M_X-M_Y grafiği.



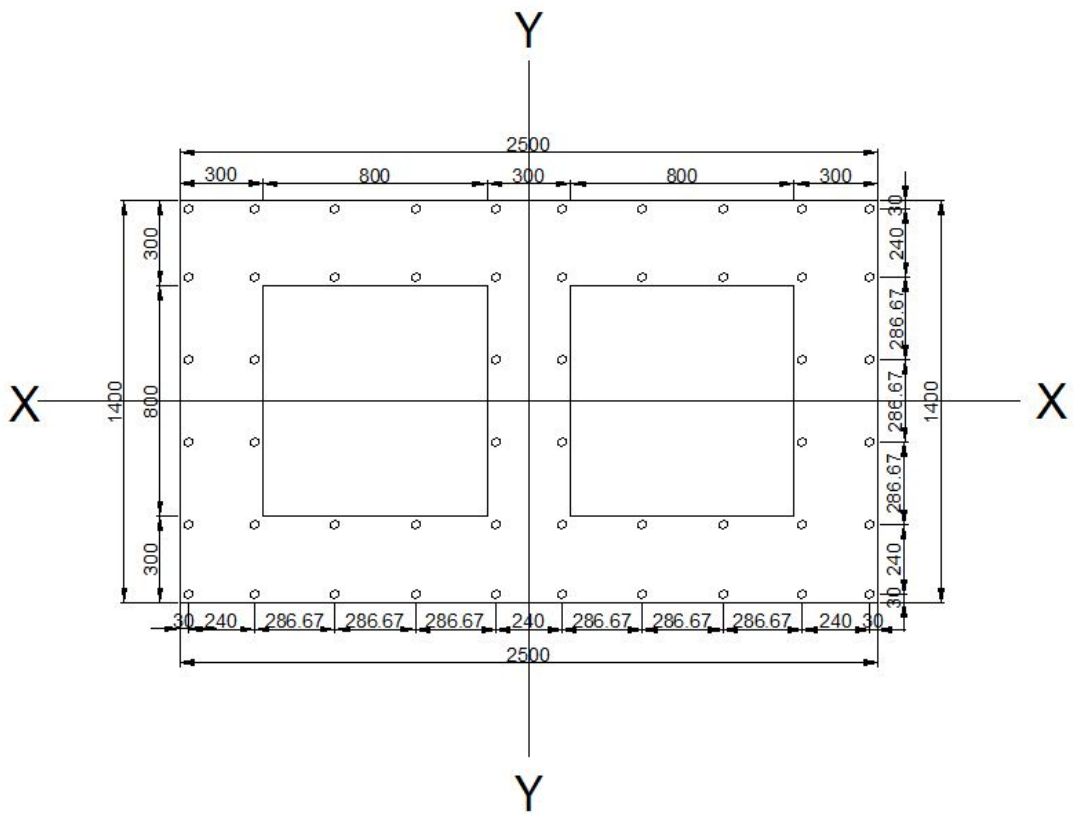
Şekil 3.15: Dikdörtgen kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği.

Çizelge 3.1: Dikdörtgen kesitin M_X, M_Y değerleri ve göreli hata oranları

	Rosati vd. [6]		KAP (E_ust=0.002)			
Açı	Mx	My	Mx	My	M_X Göreli Hata (%)	M_Y Göreli Hata (%)
0	0.301	0.000	0.293	0.000	2.7	0.0
30	0.183	0.100	0.189	0.107	3.1	7.0
60	0.069	0.120	0.068	0.118	1.4	1.6
90	0.000	0.132	0.000	0.131	0.0	0.7
120	-0.069	0.120	-0.068	0.118	1.4	1.6
150	-0.183	0.100	-0.189	0.107	3.1	7.0
180	-0.301	0.000	-0.293	0.000	2.7	0.0
210	-0.183	-0.100	-0.189	-0.107	3.1	7.0
240	-0.069	-0.120	-0.068	-0.118	1.4	1.6
270	0.000	-0.132	0.000	-0.131	0.0	0.7
300	0.069	-0.120	0.068	-0.118	1.4	1.6
330	0.183	-0.100	0.189	-0.107	3.1	7.0

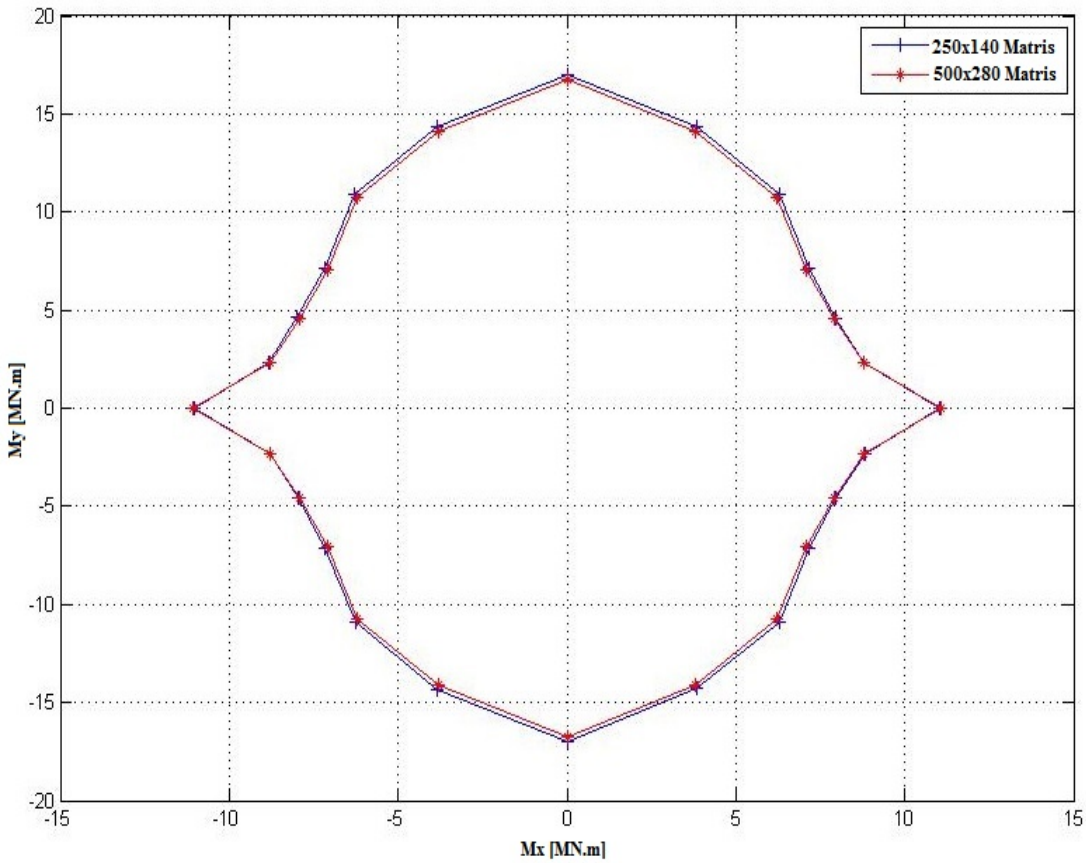
3.1.4 Örnek 4

Rosati vd. [6] nın kullandıkları iki bölmeli kolon kesiti burada incelenmiştir, Şekil 3.16.



Şekil 3.16: İki bölmeli kesit [6].

Kesit dış boyutları 1400×2500 mm dir. 300 mm kalınlığındaki duvarlar iki odacığı oluşturmaktadır. Kullanılan tüm boyuna donatılar Φ32 dir. Beton ve çelik kalitesi sırasıyla 20.75 MPa ve 375 MPa dır. Betonun çekme dayanımı ihmal edilmiştir.

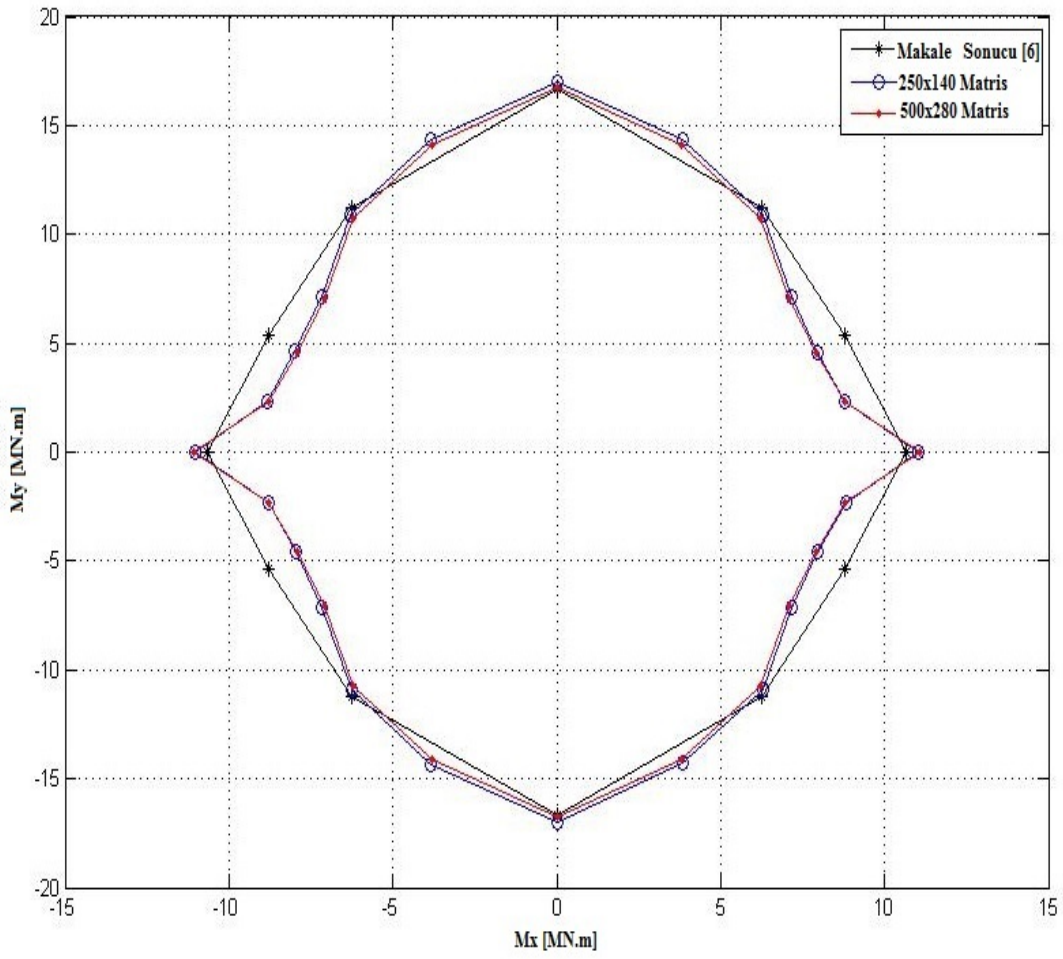


Şekil 3.17: Farklı *alan matrisleri ile* modellenmiş kesitin M_X-M_Y grafiği.

ε_*ust* =0.002 durumunda 10.246 MN luk eksenel basınç kuvveti etkisinde 250×140 ve 500×280 *alan matrisleri* kullanılarak elde edilen sonuçlar, Rosati vd. [6] lerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır, Şekil 3.18.

250×140 *alan matrisleri* kullanıldığı durumda, ε_*ust* =0.002 beton basınç şekildeğiştirmesi hali için KAP programı ile elde edilen sonuçlar Rosati vd. [6] lerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Θ açısının küçük olduğu durumlarda programların sonuçları arasındaki fark daha büyüktür.

Tarafsız eksenin, kesitin X ekseni ile yaptığı açının "0°" olması durumunda, ε_*ust* =0.02 icin elde edilmiş normal kuvvet-moment etkileşim grafiği aşağıda çizilmiştir. Her iki programın dengeli kesit ve çevresinde yakın sonuç verdikleri gözlenmektedir. Büyük basınç ve çekmenin söz konusu olduğu bölgelerde fark büyümektedir.



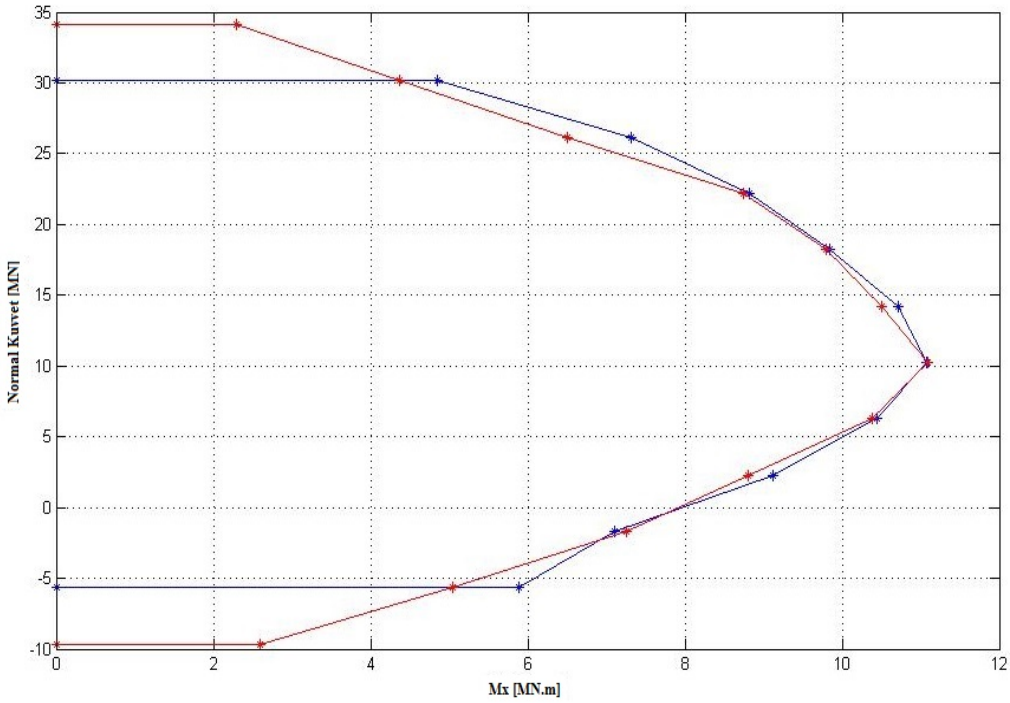
Şekil 3.18: Kesit için bulunan M_X, M_Y değerlerinin grafiği.

Çizelge 3.2: İki bölmeli kesitin M_X-M_Y değerleri ve göreli hata oranları

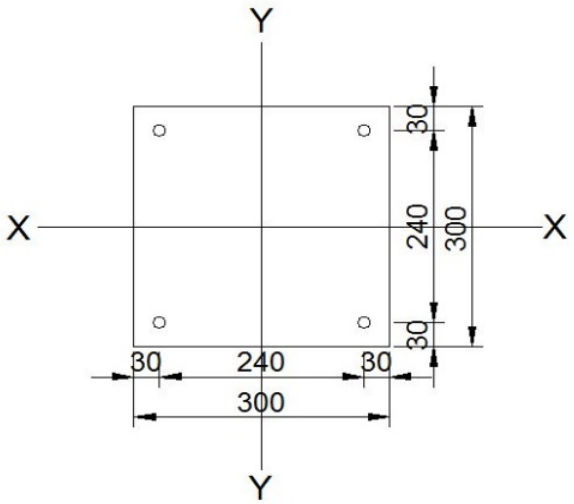
	Rosati vd. [6]		KAP (E_ust=0.002)			
Açı	Mx	My	Mx	My	M_X Göreli Hata (%)	M_Y Göreli Hata (%)
0	10.670	0.000	11.03	0.000	3.3	0.0
30	8.800	5.400	7.795	4.604	11.4	14.7
60	6.250	11.200	6.286	10.89	0.5	2.7
90	0.000	16.670	0.000	17.01	0.0	2.0
120	-6.250	11.200	-6.284	10.88	0.5	2.8
150	-8.800	5.400	-7.989	4.613	9.2	14.5
180	-10.670	0.000	-11.03	0.000	3.3	0.0
210	-8.800	-5.400	-7.953	-4.592	9.6	14.9
240	-6.250	-11.200	-6.272	-10.86	0.3	3.0
270	0.000	-16.670	0.000	-16.99	0.0	1.9
300	6.250	-11.200	6.276	-10.87	0.4	2.9
330	8.800	-5.400	7.942	-4.585	9.7	15.0

3.1.5 Örnek 5

Geometrik özellikleri Şekil 3.20 de verilen betonarme bir kolonun mevcut haliyle ve manto ile güçlendirildikten sonra KAP programı ile analiz edilerek eksenel kuvvet-moment karşılıklı etkileşim diyagramları oluşturulmuştur.



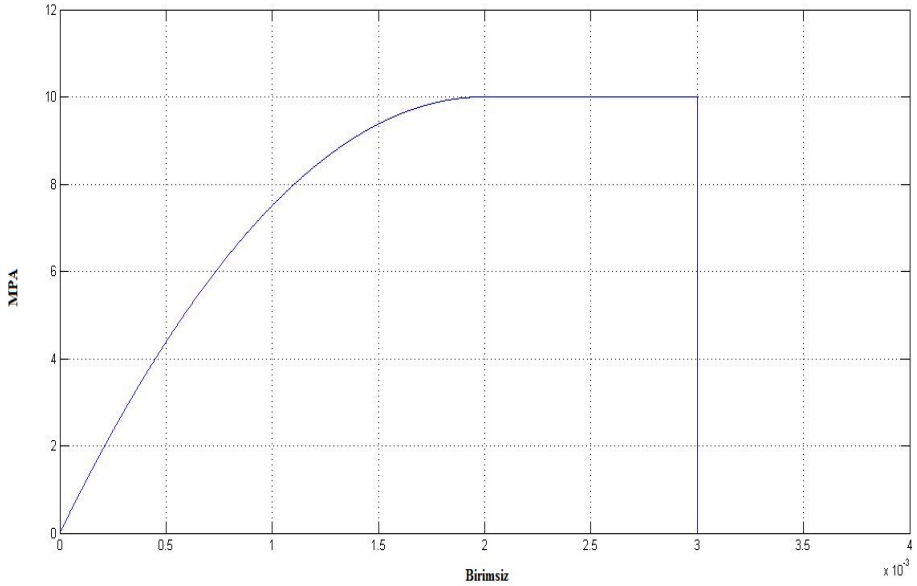
Şekil 3.19: Örnek 4, iki bölmeli kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği.



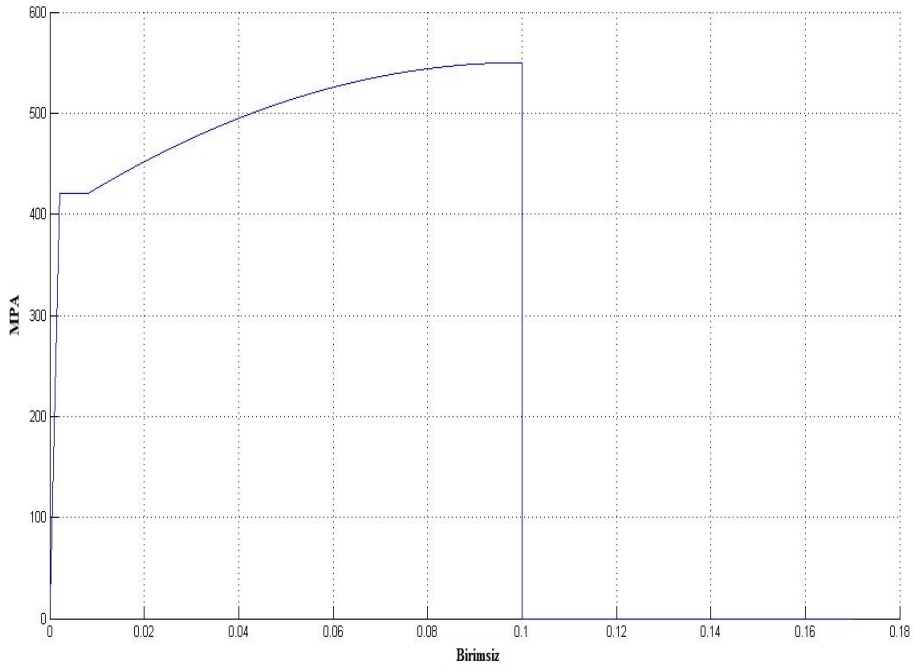
Şekil 3.20: Analizi yapılmış olan kare kesit.

Kolon Kesit boyutları 300×300 mm dir. Kesitte 4 adet BÇI kalitesinde Φ16 boyuna donatı mevcuttur. Malzeme dayanımları beton için 10 MPa, boyuan donatı için 220 MPa dır. Betonun çekme dayanımı ihmal edilmiştir. Kesit 300x300 *alan matrisi* kullanılarak modellenmiştir.

ε_ust=0.003 beton basınç şekildeğiştirme durumunda, eksenel kuvvetin sıfır olduğu durum için oluşturulan M_X-M_Y etkileşim diyagramı Şekil 3.23 de verilmiştir. Kesitte dönel simetri olduğundan sonuçlarda bu durum gözlenmektedir.



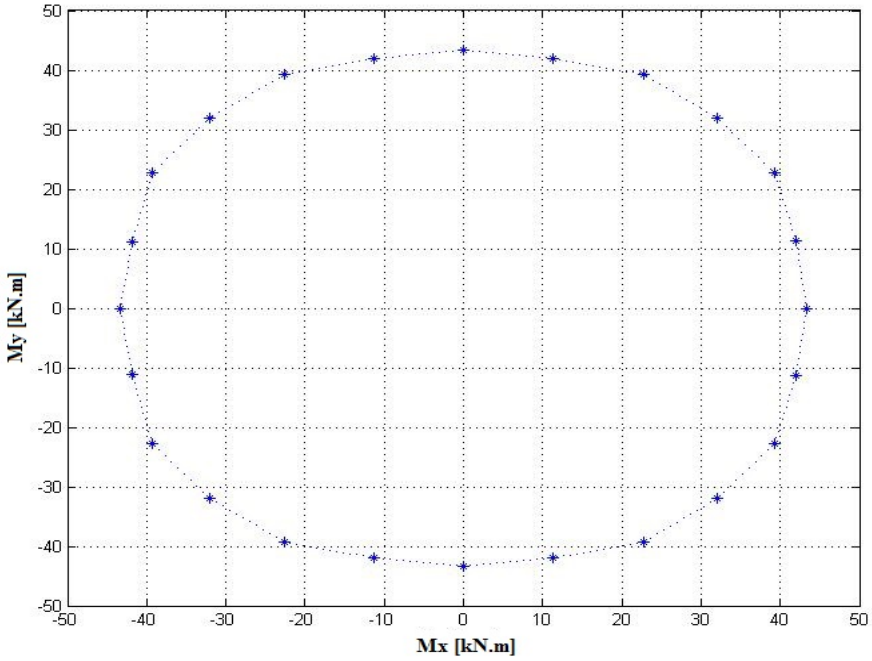
Şekil 3.21: Kesitte kullanılan sargisiz beton modeli.



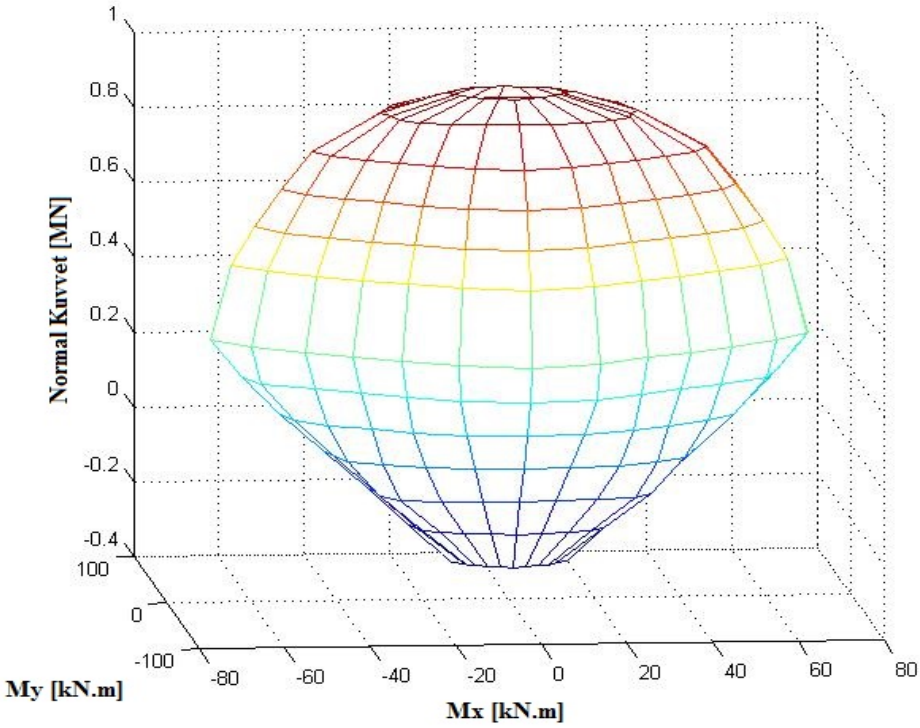
Şekil 3.22: Kesitte kullanılan pekleşen donatı çeliği modeli.

Aynı durum için oluşturulan N-M_X-M_Y etkileşim diyagramı da Şekil 3.24 te verilmiştir.

Tarafsız eksenin, kesitin X ekseni ile yaptığı açının "0°" olması özel durumunda normal kuvvetle moment arasındaki etkileşim diyagramı Şekil 3.25 de verilmiştir.



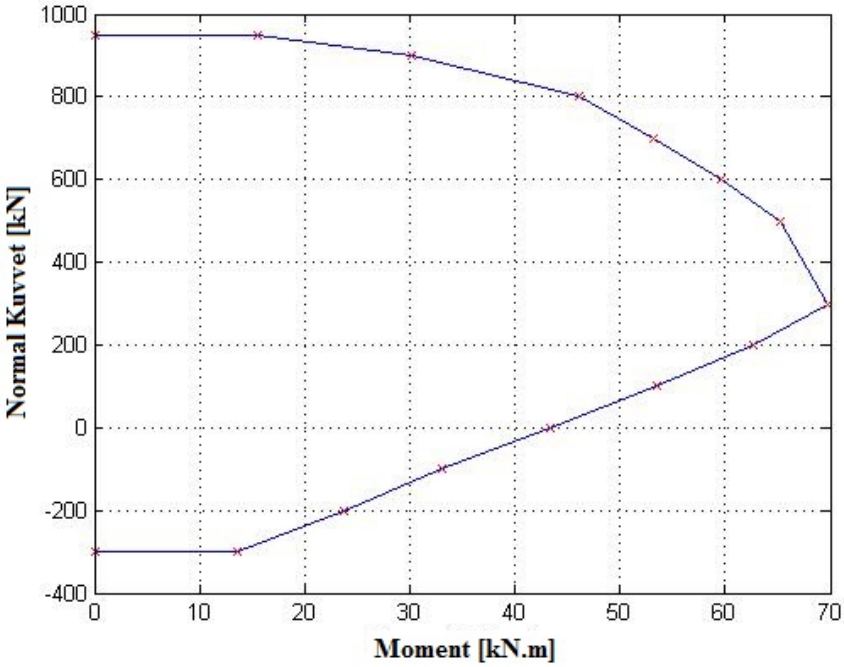
Şekil 3.23: Eksenel kuvvetin sıfır olduğu durumda ε_ust =0.003 için kesitte M_X-M_Y etkileşim diyagramı.



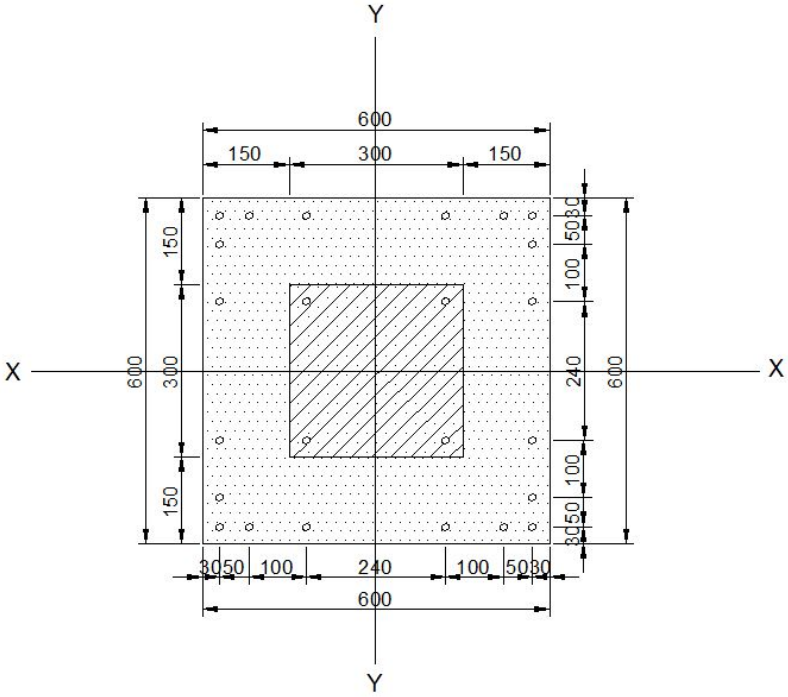
Şekil 3.24: Kare kesitin normal kuvvet-Mx-M_Y (3d) grafiği (ε_{ust} =0.003).

Yukarıda incelenen betonarme kolon 150 mm kalınlığındaki manto ile güçlendirilmiştir. Bu duruma ait geometri Şekil 3.26 da verilmektedir.

Manto uygulamasından sonra kesit dış boyutları 600×600 mm olmuştur. Şekil 3.26 da gösterildiği gibi şekilde Φ16 manto boyuna donatıları kullanılmıştır. Manto

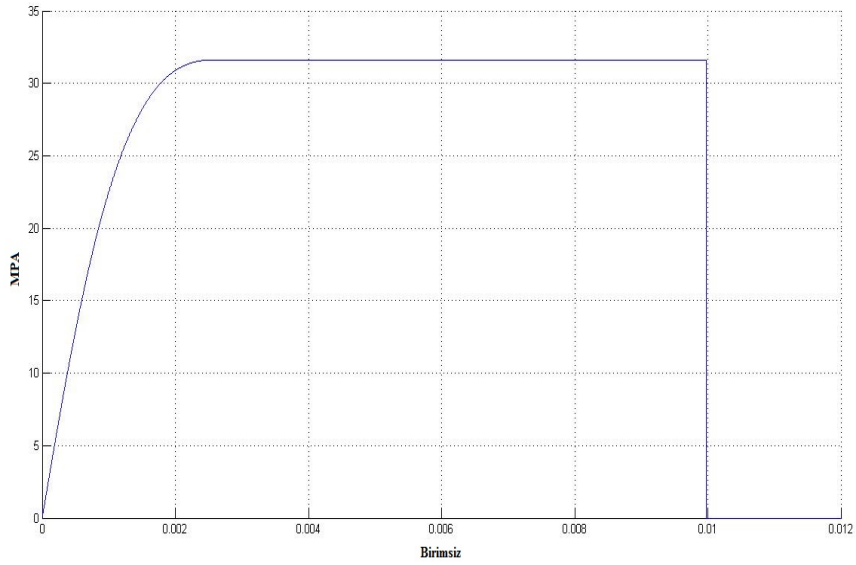


Şekil 3.25: ε_ust=0.003 için kare kesitin normal kuvvet-moment grafiği.



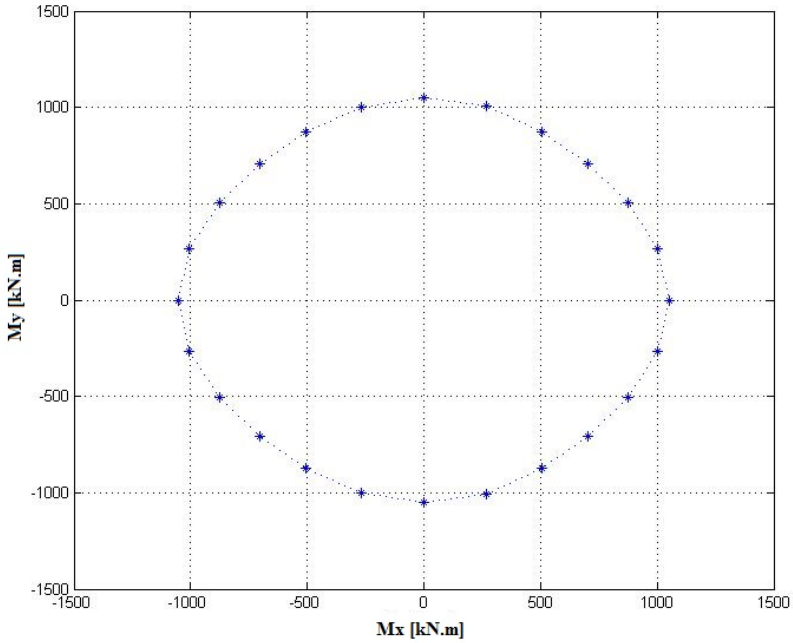
Şekil 3.26: Betonarme manto ile güçlendirilmiş kesit.

betonu olarak kullanılan beton 30 MPa basınç dayanımına sahiptir. Mantoda kullanılan donatılar BÇIIIa kalitesindedir. Kesit 600×600 matrisler kullanılarak modellenmiştir.



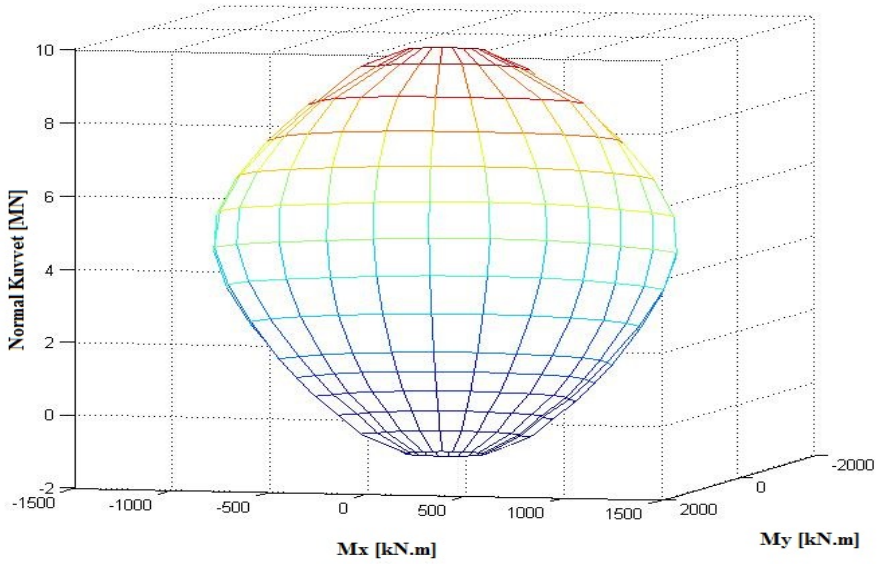
Şekil 3.27: Kesitte kullanılan sargili beton modeli.

ε_ust=0.01 beton basınç şekildeğiştirme durumunda için 2500 kN luk eksenel basınç kuvveti etkisinde elde edilen M_X-M_Y etkileşimi Şekil 3.28 de gösterilmiştir. Beklendiği gibi kesit davranışı dönel simetriktir.



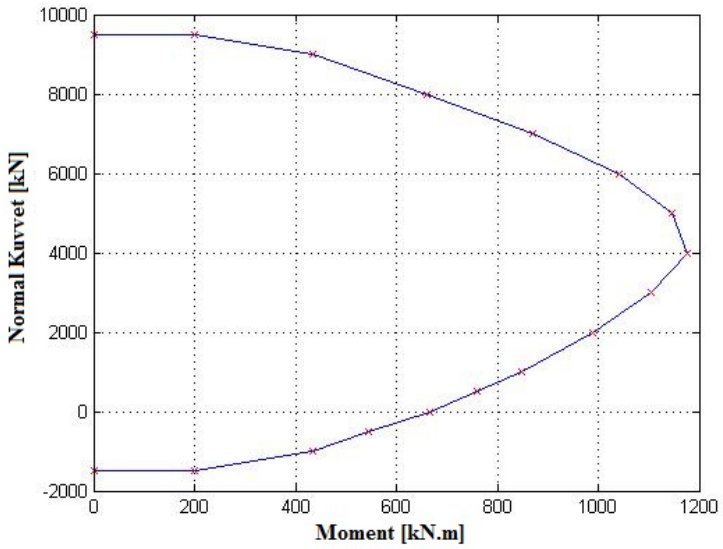
Şekil 3.28: 2500 kN basınç eksenel kuvveti etkisindeki kesitin M_X-M_Y grafiği.

Kesitte ε_ust =0.01 durumunda elde edilen normal kuvvet-M_X-M_Y (3d) grafiği Şekil 3.29 da verilmiştir.



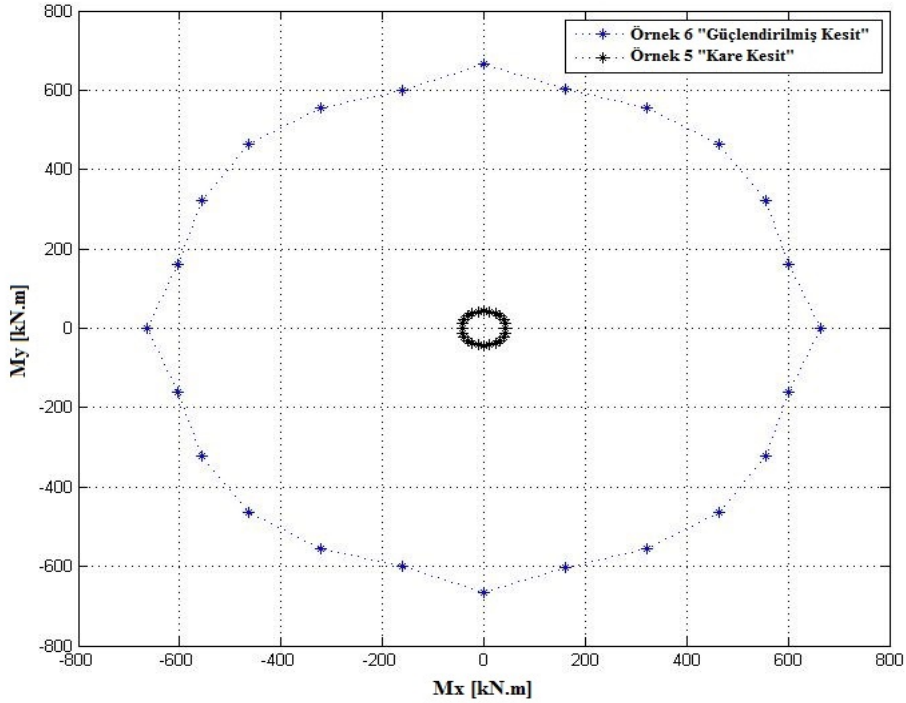
Şekil 3.29: Kesitin normal kuvvet-M_X-M_Y (3d) grafiği (ε_Ust =0.01).

Tarafsız eksenin, kesitin X ekseni ile yaptığı açının "0°" olması durumunda üretilmiş normal kuvvet-moment etkileşim ilişkisi Şekil 3.30 da verilmiştir.



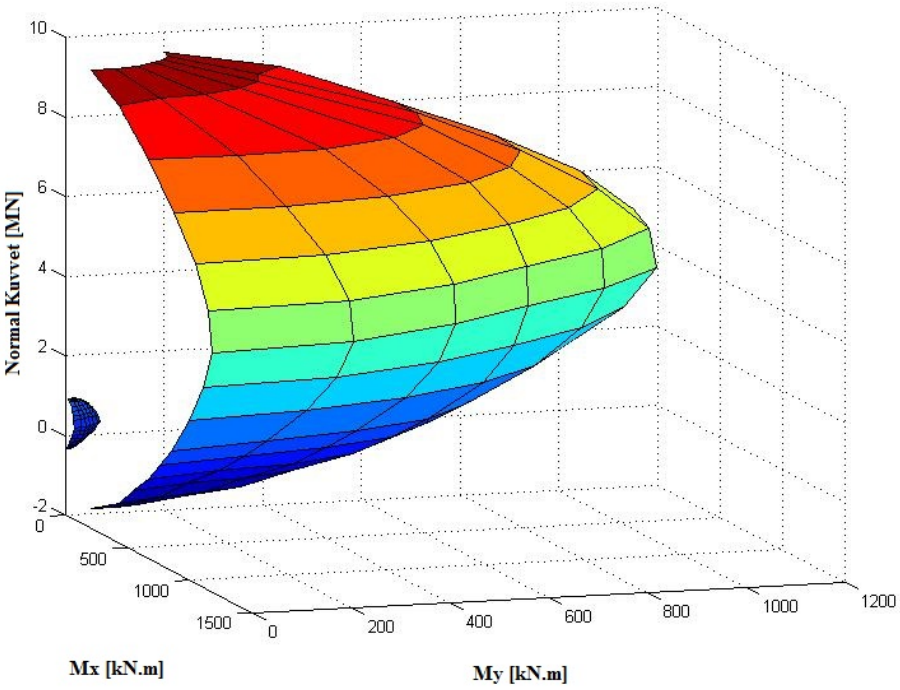
Şekil 3.30: ε_Ust=0.01 durumunda kesitin normal kuvvet-moment etkileşim grafiği.

İncelenen kesitin güçlendirme öncesi ve sonrasında normal kuvvetin sıfır olduğu durumda M_X-M_Y momentleri karşılıklı etkileşim diyagramları Şekil 3.31 de verilmiştir. Güçlendirme sonucu kesit kapasitesinin önemli ölçüde büyüdüğü görülmektedir.



Şekil 3.31: Eksenel kuvvetin sıfır olduğu durumda güçlendirme öncesi ve sonrası M_X-M_Y etkileşim diyagramları.

Güçlendirme öncesi ve sonrasında, ε_ust=0.002 şekil değiştirme durumu için elde edilen karşılıklı etkileşim diyagramları 0°-90° aralığı için Şekil 3.32 de verilmiştir.



Şekil 3.32: Güçlendirme öncesi ve sonrasında kesitin N-M_X-M_Y etkileşim diyagramı (ε_Ust =0.002).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kapsamında elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- KAP programı betonarme, boşluklu betonarme kompozit, çelik profil vb. genel şekilli kesitlerin analizini yapabilmektedir.
- KAP programı kesitleri en az 50×50 en çok 800×800 matrisler ile modelleyebilmektedir.
- Hesap yapabilen şekildeğiştirme artımları ($\Delta\varepsilon$) ve açı artımları ($\Delta\Theta$) istenildiği gibi şeçilebilir.
- Geliştirilen program plastik merkeze göre hesap yapabilmektedir.
- Kesit şekline bağlı olarak elde edilen sonuçlarda belli oranlarda hatalar oluşabilmektedir. Kesit kenar boyutları arasındaki oran büyüdükçe hata miktarı artabilmektedir. Ancak tarafsız eksenin 0°, 90°, 180°, 270° olduğu durumlarda bu hatalar sıfıra inmektedir.
- İncelenen örneklerden elde edilen sonuçlara göre, kesit kenar boyutları arasındaki oran büyüdükçe ara açılar için ulaşılan en büyük göreli farklar %15 mertebesinde oluşabilmektedir. Bu farkın alan tanımında kullanılan matris boyutları ilgili olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Yalcin, C. ve Saatcioglu, M.** (1998). Inelastic analysis of reinforced concrete columns, Computer & Structures, 77(2000), 539-555.

[2] **Chen, S. F. ve Teng, J.G ve Chan S. L.** (2001). Design biaxially loaded short composite columns of arbitrary section, Journal of Structural Engineering, 127(6), 678-685.

[3] **Sfakianakis, M.G.** (2001). Biaxial bending with axial force of reinforced, composite and repaired concrete sections of arbitrary shape by fiber model and computer graphics, Advances in Engineering Software, 33(2002), 227-242.

[4] **Bonet, J.L. ve Romero, M.L. ve Miguel, P.F. ve Fernandez, M.A.** (2002). A fast stress integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending, Computers & Structures, 82(2004), 213-225.

[5] **Bonet, J. L. ve Barros, M. H. F. M. ve Romero, M. L.** (2006). Comparative study of analytical and numerical algorithms for designing reinforced concrete sections under biaxial bending, ScienceDirect, 84(2006), 2184-2193.

[6] **Rosati, Luciano ve Marmo, Francesco ve Serpieri, Roberto** (2006). Enhanced solution strategies for ultimate strength analysis of composite steel-concrete sections subject to axial force and biaxial bending, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 197(2008), 1033-1055.

[7] **Charalampakis, A.E. ve Koumousis, V.K.** (2007). Ultimate strength analysis of composite sections under biaxial bending and axial load, Advances in Engineering Software, xxx(2008), xxx-xxx.

[8] **Pallares, L. ve Miguel, Pedro F. ve Fernandez-Prada, Miguel A.** (2009). A numerical method to design reinforced concrete sections subjected to axial forces and biaxial bending based on ultimate strain limits, Engineering Structures, 31(2009), 3065-3071.

[9] **Chiorean, C. G.** (2009). Computerised interaction diagrams and moment capacity contours for composite steel-concrete cross-sections, Engineering Structures, 32(2010), 3734-3757.

[10] **Papanikolaou, Vassilis K.** (2011). Analysis of arbitrary composite sections in biaxial bending and axial load, Computer & Structures, 98-99(2012), 33-54.

[11] **DBYBHY2007**, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007

[12] **Mander, J.B. ve Priestley, M.J.N. ve Park, R**. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Division (ASCE), 114(8), 1804-1826.

[13] **Yüksel, Ercan** (1998) Bazı Düzensizlikler İçeren Üç Boyutlu Büyük Yapı Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Çözümlemesi, Doktora Tezi., İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği.

[14] **CSICOL** (2003) Version 8.4.0, Computers and Structures, Inc.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Abdulkadir GÜNGÖR

Doğum Yeri ve Tarihi: Kartal / İSTANBUL 07.0.4.1986

Adres: Kaynarca/ İSTANBUL

E-Posta: abdulkadirgungor@outlook.com

Lisans: Balıkesir Üniversitesi