

## UZAY ÇERÇEVE SİSTEMLERİN ELASTİK-PLASTİK ANALİZİ İÇİN BİR YÖNTEM

**Erdem Damcı, Turgay Çoşgun, Tuncer Çelik, Namık K. Öztoran**

*İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
İstanbul 34850, Türkiye*

**ÖZET :** Uzak çerçeve yapıların gerçeğe yakın davranışlarının incelenbilmesi ve göçme mekanizmalarının belirlenebilmesi amacıyla bir yöntem sunulmuştur. Eksenel kuvvetin rijitliğe etkisi dikkate alınarak, doğrusal olmayan eleman lokal rijitlik matrisi elde edilmiş, daha sonra global koordinatlarda yapısal sistem rijitlik matrisi elde edilmiştir. Kesitlerin maksimum yük taşıma ve plastik moment kapasiteleri gözönüne alınmıştır. Söz konusu matris ve çalışmada sunulan algoritma kullanılarak artan dış yükler altında doğrusal olmayan elastik-plastik analizler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Elastik-plastik analiz; doğrusal olmayan analiz; ikinci mertebeye etkiler; sonlu elemanlar; uzay çerçeve

**ABSTRACT:** A method and an algorithm for the analysis of actual behaviour and for determination of yielding and collapsing mechanism of the space frames is presented in this study. Variation of the rigidities of the space frame elements depending on axial loads are taken into consideration and the stiffness matrix, considering the non-linear behaviour, is evaluated in local coordinate system. Then the global system stiffness matrix is assembled. Ultimate load carrying and plastic moment capacities of the sections are taken into consideration. Three dimensional non-linear elastic-plastic analysis of the space frames under increasing loads are performed by using presented algorithm.

### Giriş

Halen günümüzde, yapı davranışına ait analiz ve tasarımlar, geleneksel bir hal almış olan elastik teoriye göre yapılmaktadır. Bu teori ile yapılan analizlerde ikinci mertebeye etkiler göz ardı edilmektedir. Gerçekte yapısal elemanların büyük bir kısmı hesaplanan değerlere kıyasla daha düşük gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu durum özellikle çelik yapılarda gereksiz malzeme kullanımına neden olmaktadır. Birçok eleman ise, gerçekte, hesaplanan kesit tesirlerine kıyasla daha büyük tesirlere maruz kalmakta, çoğu zaman bu tür analiz ve tasarım hataları yapısal uyum sayesinde yapı tarafından af edilmektedir.

Yapıları oluşturan elemanların davranışlarını gözardı ederek yapılan analizler gerçekçi değildir. Yapı sistemi içinde, daha rijit elemanlar ve birleşimler, zayıf kısımları destekleyeceklerdir. Yapının genel davranışı tüm elemanlarının etkileşimiyle (yapısal uyum) gerçekleşecektir. Ancak gerçek yapısal davranışa mümkün olduğunca yaklaşılması durumunda, yapılar hem daha ekonomik, hem de daha emniyetli olacaktır. Bu amaçla doğrusal olmayan analiz yöntemleri daha sık kullanılmaktadır. Bu tür analizleri yapabilen programların çoğu yabancı kaynaklıdır. Ülkemizde de, bağımsız olarak, gerekli bilginin yaygınlaştırılmasına, korunmasına, kullanıma sunulmasına ihtiyaç vardır.

Yapıların elastik analizinde, yapı elemanlarının rijitlik ve fleksibilitelerinin sabit olduğu kabul edilmekte ve yük–deplasman grafiği doğrusal davranış göstermektedir. Bu varsayım yalnızca çubuklar üzerinde aksel kuvvet olmaması halinde geçerlidir. Gerçekte, bir yapısal eleman üzerine etkiyen normal kuvvet, elemanın rijitlik matrisini ve dolayısıyla fleksibilite matrisini değiştirmektedir. Bu olay ikinci mertebeli etkilerinin, yani denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş sistem üzerinde değil, şekil değiştirmiş sistem üzerinde yazılması gereğinden ortaya çıkmaktadır. Çoğu kez düşük yükleme kademelerinde yapısal deplasmanların yapının boyutlarına kıyasla çok küçük olmaları nedeniyle, denge denklemlerinin şekil değiştirmemiş sistem üzerinden yazılması, büyük hatalara neden olmamaktadır. Ancak ileri yükleme aşamalarında yapı elemanlarının üzerine etkiyen normal kuvvet, burkulma yüküne yaklaştığında, eleman zaten belirli deformasyonlara maruz kaldığı için deplasmanlar çok artmakta ve hata yüzdesi ihmal edilemez düzeylere çıkmaktadır. Eleman rijitliklerinin değişimi, üzerine etkiyen aksel kuvvetin değerine bağlı olarak, stabilite fonksiyonları (Livesley fonksiyonları) adı verilen boyutsuz fonksiyonlar ile göz önüne alınmıştır. Bu durumda eleman rijitlik matrislerini,  $p/P_{cr}$  oranına bağlı olarak, stabilite fonksiyonları yardımı ile değişken olarak ifade edilmiştir.

Livesley fonksiyonları adı verilen düzlem stabilite fonksiyonları, uzay çerçeve yapı elemanlarında, lokal kesit eksenleri için ayrı ayrı göz önüne alınarak, aksel kuvvet etkisinde değişken lokal rijitlik matrisi çıkartılmıştır.

Doğrusal olmayan analizlerin yapılabilmesi için, bu tür analizleri yapabilen bilgisayar programlarının, gerek yazılımının gerekse kullanımının ülkemizde yaygınlaştırılması, geliştirilmesi ve bu amaçla konuda uzman personelin yetişmesi, bilgilerin eleştirilerle ve desteklerle güçlenmesi hedeflenmiş ve bu amaçla mevcut çalışma hazırlanmıştır. Mevcut çalışmada sunulan ve Çelik, T. tarafından önerilen yöntem, Damcı, E. tarafından yüksek lisans tezi kapsamında bilgisayara uyarlanmış (Damcı, 2002) ve Öztoran, N. K. tarafından geliştirilmiş olan TUNAL adlı genel amaçlı sonlu elemanlar programına (Öztoran, 1994) ilave edilmiştir.

### **Matris Deplasman Yönteminde Kullanılan Stabilite Fonksiyonları**

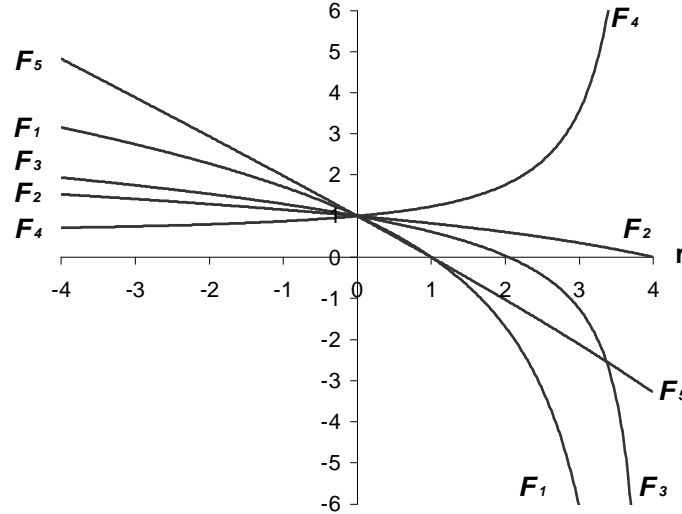
Aksel kuvvetlerin rijitlik üzerine etkisi, Livesley tarafından geliştirilmiş stabilite fonksiyonları ile göz önüne alınmıştır. Euler kritik yükü, iki ucu mafsallı rijitliği sabit bir çubuk için  $P_E = p^2 EI/L^2$  olduğuna göre,

$$r = \frac{p}{P_E} = \frac{pL^2}{p^2 EI} \quad ; \quad a = \frac{p\sqrt{r}}{2} \quad (1)$$

olarak tanımlanırsa,

$$\begin{aligned}
 f_1 &= a \cot a \\
 f_2 &= \frac{a^2}{3(1-f_1)} \\
 f_3 &= \frac{3f_2 + f_1}{4} \\
 f_4 &= \frac{3f_2 + f_1}{2} \\
 f_5 &= f_1 f_2
 \end{aligned} \tag{2}$$

şeklinde yazılabilir. Verilen stabilite fonksiyonları (Livesley,1956), çubuk elemanların açı deplasman denklemlerini elde etmek amacıyla kullanılabilirler. Şekil 3’de bu fonksiyonların  $r$  ya bağlı değişim grafiği verilmiştir. Görüldüğü gibi aksenal kuvvetin olmadığı hallerde  $r =0$  durumunda  $f$  fonksiyonları tek bir değer olarak bire eşit olmaktadır.



Şekil 3. Livesley fonksiyonları

### Doğrusal Olmayan Lokal Rijitlik Matrisinin Elde Edilmesi

Deplasman metoduyla yapılan analizlerde, aksenal kuvvetin ihmal edilip, çubuk rijitlik matrisinin sabit olduğu varsayımı ile hareket edilmesi gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Stabilite fonksiyonlarını incelediğimizde çubuk rijitliğinin  $r = P/P_{cr}$  oranına bağlı olarak, aksenal kuvvetin etkisi ile değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla rijitlik matrislerinin bu fonksiyonlar cinsinden ifade edilmesi gerekir.

$$b = \frac{12E}{L^3} \quad , \quad d = \frac{6E}{L^2} \quad , \quad e = \frac{4E}{L} \quad , \quad f = \frac{2E}{L}$$

olmak üzere, uzay çerçeve çubuk elemanın lokal rijitlik matrisi,

$$\begin{pmatrix}
\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & bl_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & dl_2f_{22} & 0 & -bl_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & dl_2f_{22} \\
0 & 0 & bl_1f_{51} & 0 & -dl_1f_{21} & 0 & 0 & 0 & -bl_1f_{51} & 0 & -dl_1f_{21} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -dl_1f_{21} & 0 & el_1f_{31} & 0 & 0 & 0 & dl_1f_{21} & 0 & fl_1f_{41} & 0 \\
0 & dl_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & el_2f_{32} & 0 & -dl_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & fl_2f_{42} \\
-\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -bl_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & -dl_2f_{22} & 0 & bl_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & -dl_2f_{22} \\
0 & 0 & -bl_1f_{51} & 0 & dl_1f_{21} & 0 & 0 & 0 & bl_1f_{51} & 0 & dl_1f_{21} & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\
0 & 0 & -dl_1f_{21} & 0 & fl_1f_{41} & 0 & 0 & 0 & dl_1f_{21} & 0 & el_1f_{31} & 0 \\
0 & dl_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & fl_2f_{42} & 0 & -dl_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & el_2f_{32}
\end{pmatrix}$$

olarak çıkartılır. Burada, stabilite fonksiyonlarının alt indislerindeki birinci rakam, stabilite fonksiyonunu, ikinci rakam ise fonksiyonun etkili olduğu kesit eksenini göstermektedir.

Görüldüğü gibi, matriste  $r = 0$  olduğunda  $f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 1$  olacaktır ve rijitlik matrisi 1. mertebe matrisine dönüşecektir. Bu da esasta, doğrusal olmayan analiz yönteminin, doğrusal analiz yönteminin bir devamı olduğunun göstergesidir. Rijitlik matrisin ilk oluşturulma aşamasında aksenal kuvvetlerin bilinmemesi işlemi güçleştirmektedir. Bu sorunun aşılması için aksenal yük sıfır kabul edilir ve ilk adımda doğrusal analiz yapılır. İkinci adımda, bulunan aksenal kuvvetler ile stabilite fonksiyonları hesaplanır ve matrisler yeniden oluşturulur. Uç kuvvetler yeniden hesaplanarak bir önceki uç kuvvetler ile karşılaştırılır. İki sonuç arasındaki fark istenilen hata oranını sağlayıncaya kadar iterasyona devam edilir.

## Uzay Çerçevesinin Elastik-Plastik Analizi

Yapıların yük-deplasman bağıntılarının doğrusal olmaması, ikinci mertebe etkilerine ve yapı elemanlarının şekildeğiştirme bağıntılarının doğrusal davranış göstermemesine bağlıdır. Yapı elemanlarının şekildeğiştirme davranışında, malzemeyi rijit plastik kabul ederek, rijit plastik teori ile yapı analizi, küçük düzlem çerçevelerin boyutlandırılmasında pratik bir yöntem olmasına rağmen uzay yapı sistemlerinde pek kullanışlı ve pratik bir yöntem değildir. Çerçeve sistemlerde, yapı elemanlarının ideal elasto-plastik malzemelerden oluştuğu kabulü yapılarak, elastik-plastik analiz yöntemi uygulamak daha gerçeğe yakın bir yaklaşım olacaktır. Yük-deplasman ilişkisine ait doğrusal olmayan davranışın belirlenmesi açısından, doğrudan doğruya yapı elemanlarındaki plastik deformasyonların ve kalıcı şekildeğiştirmelerin bilinmesi gerekmektedir.

$$K_1 \left( \frac{M_x}{M_{xp} \sqrt{1 - \left( \frac{M_b}{M_{bp}} \right)^2}}, \frac{M_y}{M_{yp} \sqrt{1 - \left( \frac{M_b}{M_{bp}} \right)^2}}, \frac{N}{N_p \sqrt{1 - \left( \frac{M_p}{M_{pb}} \right)^2}} \right) = 0 \quad (3)$$

İleri yükleme kademelerinde yapı elemanlarındaki plastik mafsal oluşumu, yukarıda verilen akma şartının alt sınırını ifade eden bağıntının sağlanması durumunda meydana gelmektedir. Burada,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_b$  ve  $N$  kesit tesirleri olup sırasıyla eğilme momentleri, burulma momenti ve normal kuvveti ifade etmektedir. Kesitin plastik yük kapasiteleri ise,  $M_{xp}$ ,  $M_{yp}$ ,  $M_{bp}$  ve  $N_p$  değerleriyle ifade edilmiştir (Çakıroğlu ve Özer, 1980).

### Plastik Mafsallı Çubuğun Lokal Matrisleri

Herhangi bir yükleme safhasında, plastik mafsallaşma gerçekleşikten sonra, dış yüklerin arttırılmaya devam edilmesiyle birlikte çubuk uç dönmeleri,  $q_{ij} = q_i$  durumundan farklı olarak,

$$q_{ij} = q_i + q_H^1 \quad (4)$$

halini alır. Burada  $q_H^1$  çubuk ucundaki plastik mafsal dönmesidir.  $q_i$  ise düğüm noktası dönmesidir. Görüldüğü gibi, kesitte plastikleşme oluştuğundan sonra çubuk uç dönmeleri çubuğun bağlı olduğu düğüm noktası dönmesiyle plastik mafsal dönmesinin toplamına

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & bI_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & dI_2f_{22} & 0 & -bI_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & dI_2f_{22} & 0 & 0 & dI_2f_{22} \\ 0 & 0 & bI_1f_{31} & 0 & -dI_1f_{21} & 0 & 0 & 0 & -bI_1f_{31} & 0 & -dI_1f_{21} & 0 & 0 & -dI_1f_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -dI_1f_{21} & 0 & eI_1f_{31} & 0 & 0 & 0 & dI_1f_{21} & 0 & fI_1f_{41} & 0 & 0 & eI_1f_{31} & 0 \\ 0 & dI_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & eI_2f_{32} & 0 & -dI_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & fI_2f_{42} & 0 & 0 & eI_2f_{32} \\ \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -bI_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & -dI_2f_{22} & 0 & bI_2f_{32} & 0 & 0 & 0 & -dI_2f_{22} & 0 & 0 & -dI_2f_{22} \\ 0 & 0 & -bI_1f_{31} & 0 & dI_1f_{21} & 0 & 0 & 0 & bI_1f_{31} & 0 & dI_1f_{21} & 0 & 0 & dI_1f_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -dI_1f_{21} & 0 & fI_1f_{41} & 0 & 0 & 0 & dI_1f_{21} & 0 & eI_1f_{31} & 0 & 0 & fI_1f_{41} & 0 \\ 0 & dI_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & fI_2f_{42} & 0 & dI_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & eI_2f_{32} & 0 & 0 & fI_2f_{42} \\ \hline 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -dI_1f_{21} & 0 & eI_1f_{31} & 0 & 0 & 0 & dI_1f_{21} & 0 & fI_1f_{41} & 0 & 0 & eI_1f_{31} & 0 \\ 0 & dI_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & eI_2f_{32} & 0 & -dI_2f_{22} & 0 & 0 & 0 & fI_2f_{42} & 0 & 0 & eI_2f_{32} \end{bmatrix}$$

eşittir. Mafsal dönmesi sisteme ilave bir serbestlik derecesi daha kazandırmaktadır.  $i$  ucu mafsallı çerçeve çubuk elemanın ilave serbestlik dereceleri ile büyütülmüş lokal rijitlik matrisi, yukarıda verildiği şekilde çıkartılır. Görüldüğü gibi plastik mafsal oluşan uçtaki eğilme rijitliğine ait ilave terimler 3 satır ve 3 sütun olmak üzere matris sonuna eklenmiştir. Kesitte Plastikleşmenin oluşmasından itibaren mafsallı uçtaki moment değerleri plastik mafsal momentlerine eşit olacağından, uç momentlerine ait stabilize fonksiyonları ile geliştirilmiş birim deplasman sabitleri, plastik mafsal momentleri için de kullanılmıştır. Aynı şekilde,  $i$  ucu plastik mafsallı bir çubuk eleman için büyütülmüş lokal deplasman matrisi ise,

$$\left[ \begin{array}{cccccc|cccccc} x_i & y_i & z_i & q_{xi} & q_{yi} & q_{zi} & x_j & y_j & z_j & q_{xj} & q_{yj} & q_{zj} & q_{h_i,x} & q_{h_i,y} & q_{h_i,z} \end{array} \right]$$

formundadır. Burada da, deplasman vektöründeki ilave üç bilinmeyen plastik mafsala ait dönmeleri temsil etmektedir.

Çubuğun yalnız  $j$  ucunda plastik mafsala oluşması halinde de aynı işlemler takip edilerek  $j$  ucuna ait dönme rijitlikleri kullanılır ve yeni matrisler oluşturulur. Her iki uçta plastik mafsala olması halinde ise, aynı şekilde lokal rijitlik matrisi  $18 \times 18$ , deplasman vektörü ise  $1 \times 18$  boyutlarında olacaktır. Büyütülmüş eleman rijitlik matrislerinin sistem rijitlik matrisine yerleştirilmesi sırasında, yük vektörü de büyütülmekte ve ilave serbestliklere karşılık gelen satırlara, kesitte akma şartını sağlayan eğilme momentleri yerleştirilmektedir. Bu sayede çubuk uç kuvvetleri, bir önceki yüklemeye ki akma şartını sağlayan kesit tesirlerini taşımaya devam etmektedir.

### İşlem Adımları

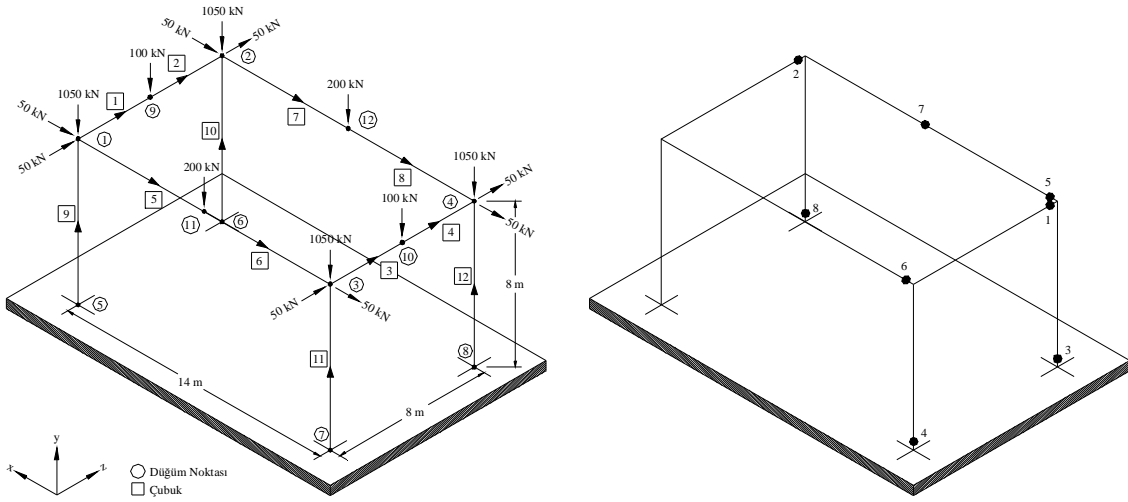
Yukarıda verilen yöntem, orantılı yük arttırımı uygulayacak ve her yük arttırımında yapı sisteminde oluşabilecek plastik mafsallar kontrol ederek, yapı stabilitesini kaybedip göçme durumuna gelene kadar yük arttırımına devam edecek şekilde, TUNAL adlı genel amaçlı sonlu elemanlar programına uyarlanmıştır. Program, uzay çerçevelerin elastik-plastik analizinde aşağıda verilen temel adımları takip etmektedir:

1. Giriş verileri okunur,
2. Yük faktörü belirlenen aralıkta arttırılır,
3. Eksenel kuvvetler sıfır kabul edilir (lineer çözüm aşaması),
4. Eksenel kuvvete göre stabilite fonksiyonları  $f_1 - f_5$  hesaplanır.  $N=0$  için tüm stabilite fonksiyonları sabit 1 değerinin alır,
5. Her eleman için global rijitlik matrisleri kullanılarak sistem rijitlik matrisi oluşturulur. Eğer çubuk uçlarında plastik mafsala varsa her mafsala için 3 satır ve sütun sistem rijitlik matrisine ilave edilir,
6. Sistem rijitlik matrisinin determinantı alınarak yapı sisteminin stabilitesi kontrol edilir, negatif ise işlem durdurulur, değilse işleme devam edilir,
7. Tüm dış yük vektörü  $I$  yük faktörüyle çarpılır,
8. Akma şartını sağlamış ve uçlarında plastik mafsala oluşmuş çubukların saklanmış uç momentleri, mafsala adedi kadar sırasıyla dış yük vektörüne eklenir,
9.  $L=K.X$  denklemini çözülerek düğüm noktası deplasmanları ve mafsala dönmeleri  $X$  hesaplanır,
10. Bulunan deplasmanlarla çubuk uç kuvvetleri ve plastik mafsala momentleri hesaplanır,
11. Çubuk eksenel kuvvetleri saklanır,
12. Bir önceki adımdaki çubuk eksenel kuvvetleri ile son bulunan eksenel kuvvetler arasındaki fark her çubuk için belirlenir. Tüm çubuklarda, eksenel kuvvet farkı, müsaade edilen tolerans sınırının altına düşüncüye kadar iterasyon 4. adımdan itibaren tekrar edilir.
13. Son iterasyon neticesinde doğrusal olmayan çubuk uç kuvvetleri bulunmuştur. Eksenel kuvvet ve uç momentleri saklanır,
14. Son iterasyondaki uç kuvvetler kullanılarak, her çubuk için çubuk uçlarında akma şartı kontrol edilir. Uçlarında plastik mafsala oluşmuş çubukların numaraları ve uç momentleri saklanır,
15. Analize arttırılmış dış yük vektörüyle devam etmek için işlemler 2. adımdan itibaren tekrarlanır.

Yapılan ardışık analizlerde uzay çerçeve yapıların doğrusal olmayan elastik-plastik analizinde şu kabuller yapılmıştır :

1. Malzeme doğrusal elastik tam plastiktir.
2. Çubuk eksenine dik gerilmeler ihmal edilmiştir. Dolayısıyla akma şartı denklem (3) de verildiği gibidir.
3. Çubuk eksenine dik kesitler, şekildeğıştirmeden sonrada çubuk eksenine dik ve düzlem kalırlar.
4. Plastik mafsalların düğüm noktalarında oluştuğu kabul edilerek idealleştirilmiştir.
5. İkinci merteye etkilerinde, kesme kuvvetlerinin burulmaya olan etkileri ihmal edilmiştir.

Orantılı artan dış yüklerin etkisi altındaki yapılarda, dış yükün küçük olduğu aşamalarda yapı tamamen elastik durumdadır ve herhangi bir düğüm noktası için yük-deplasman bağıntısı lineerdir. Plastik mafsalların oluşumuyla elastik davranış biter. İlk plastik mafsalin oluştuğu noktaya karşılık gelen yük faktörüne de  $I_e$  elastik limit çarpanı denir. Yükn artırılmasıyla birlikte yeni yapı sisteminde plastik mafsal oluşumu devam edecektir. Oluşan plastik mafsallar, çerçeve yapı göçme durumuna gelene kadar dönmeye devam edecektir. Yapı her plastik mafsalda stabilitesini biraz daha kaybedip göçme durumuna gelecektir. Bu durumda yük-deplasman eğrisi ise sonsuza gidecektir.



(a)

(b)

Şekil 4. Tek katlı uzay çerçeve

### Örnek

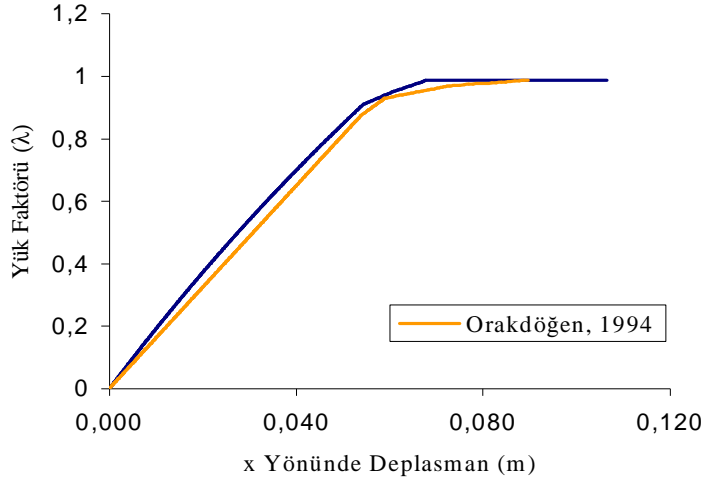
Şekil 4(a)'da verilen örnekte tek katlı uzay çerçeve sistemin, artan düşey ve yatay yükler etkisinde, elastik-plastik analizi yapılmıştır. Sistemin göçme yükü ve göçme mekanizması belirlenmiştir. Kutu kesitlerinden oluşan çubuklarda b/d oranı kirişlerde 1/2, kolonlarda ise 1/1 olarak alınmıştır (Orakdoğan, 1994).

Düğüm noktalarına etkiyen dış yükler, 1/1000 oranında düzgün artan  $I$  yük faktörü ile çarpılarak ardışık analizler yapılmıştır. Her yük artımında çerçeve elemanlarda akma

şartı kontrol edilerek plastik mafsal kontrolü yapılmış ve akma şartını sağlayan uç noktalara plastik mafsallar yerleştirilerek, sistem stabilitesini kaybedene kadar analize devam edilmiştir. Göçme yükü  $I_u=0.99$  olarak bulunmuştur. Göçmeden önce meydana gelen 8 adet plastikleşen kesitin yerleri ve oluşum sırası Şekil 4(b)'de gösterilmiştir. Plastik kesitlerin oluşum sırası, oluştukları çubuk ve yük faktörleri de ayrıca Tablo 1'de sunulmuştur.

Mafsal No	1	2	3	4	5	6	7	8
Çubuk No	4	2	12	11	8	6	7	10
Çubuk Ucu	j	j	i	i	j	j	j	i
$I$	0.88	0.88	0.91	0.952	0.986	0.99	0.99	0.99

**Tablo 1.** Plastik kesitlerin oluşum sırası, eleman numaraları ve yük faktörleri



**Şekil 5.** Yük-deplasman grafiği

Analiz sonucu elde edilen 4 numaralı düğüm noktasındaki yük-deplasman ( $I-d$ ) grafiği Şekil 5'de görülmektedir. Sisteminde plastikleşen ilk kesit, yük faktörünün  $I_e= 0.88$  değeri için 2- 4 numaralı çubukların  $j$  uçlarında oluşmaktadır. Bu değer sistemin elastik sınırındır.

## Sonuç

Ülkemizde yaygınlaşmakta olan doğrusal olmayan hesap yönteminin benimsenmesi ve ileriki çalışmalarda temel oluşturması amacıyla, geliştirilmeye açık bir yöntem sunulmuştur. İkinci mertbe etkiler göz önüne alınarak, malzeme davranışının ideal elasto-plastik olduğu kabulüyle, uzay çerçeve yapı sistemlerinin, geometrik doğrusal olmayan elastik-plastik analizlerini yapmak amacıyla, çeşitli dış etkenlere maruz çerçeve yapı sistemlerini göçmeye götüren plastik mafsal oluşumları ve yapı davranışının incelenmesi hedeflenmiştir.

Plastik mafsalların çubuk üzerinde oluştuğu yerler ve akma bölgelerinin uzunluğu bu çalışma kapsamına alınmamıştır. Mafsalların düğüm noktalarında oluştuğu kabul



edilmiş böylece analiz kolaylığı getirilmiştir. Ancak, gerçekte, plastikleşmenin belirli bir boya yayıldığı ve plastikleşmenin mafsallarda idealizasyonundan ziyade, sınırlı bir bölge olarak gözönüne alınması gerçeği ayrı bir çalışmada sunulacaktır. Geliştirilen matris-deplasman yöntemi ile, deforme olmuş çubuk elemanlar üzerinde aksiyel kuvvetin çubuk rijitliğine etkisi hesaba katılmış, düğüm noktalarına bağlı çubuklarda oluşacak plastik mafsalların tüm yapı rijitliğine etkisi kolaylıkla incelenebilmiştir. Her düğüm noktasının dönmesi ve düğüm noktalarında oluşan plastik mafsalların dönmeleri ayrı ayrı hesaplanabilmiştir. İkinci merteye etkilerde, deforme olmuş sistem üzerinde kesme kuvvetlerinin burulma rijitliklerine etkisi ihmal edilmiştir.

Verilen açı-deplasman denklemleri ile öncelikle, uzay çerçeve yapı sistemleri incelenmiş ve diğer yapı sistemlerinin de incelenebilmesi için alt yapı oluşturulmuştur. Artan dış yükler altında çerçeve yapıların elastik-plastik analizleri yapılarak, elastik limitleri ( $I_e$ ) ile göçme yükleri ( $I_u$ ) belirlenmiştir. Yapı sisteminde, akma şartını sağlayan kesitlerin uç noktalarına plastik mafsallar yerleştirilerek, plastik mafsalların tüm yapı davranışına etkileri ve yapıların mekanizma durumları detaylı bir şekilde incelenebilmiştir.

## Referanslar

- Çakıroğlu, A. ve Özer, E., 1980, *Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Çelik, T., *Elastik Stabilité Ders Notları* (yayınlanmamış), İstanbul.
- Damcı, E., 2002, *Uzay Çerçeve Sistemlerin Elastik-Plastik Analizi*, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Livesley, R. K., 1956, The Application of Electron Digital Computer to Some Problems of Structural Analysis, *Struct. Engr.* 34, 1-12.
- Majid, K.I., 1972, *Non-Linear Structures*, Butterworths, London.
- Orakdoğen, E., Nisan 1994, *Uzay Çubuk Sistemlerde İkinci Merteye Limit Yük İçin Yapı Ağırlığını Minimum Yapan Bir Boyutlandırma Yöntemi*, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Öztorun N. K., 1994, *Computer Analysis of Multi-Storey Building Structures*, *Ph.D. Thesis in Civil Engineering*, M.E.T.U., Ankara.
- Öztorun, N.K., Çıtıptıoğlu, E. and Akkaş, N., 1995, Mesh Generation and Data Structures for the Finite Element Analysis of Shear Wall Buildings, *Developments in Computational Techniques For Structural Engineering*, *Civil-Comp Press*, 367-382, Edinburgh, UK.
- Öztorun, N.K., Çıtıptıoğlu, E. and Akkaş, N., 1998, Three- Dimensional Finite Element Analysis of Shear Wall Buildings, *Computers & Structures*, Vol. 68 No.1-3, pp. 41-45.