



YARI RİJİT BAĞLI DÜZLEMSEL ÇERÇEVELERİN NONLİNEER ANALİZİ

(NONLINEAR ANALYSIS OF PLANAR FRAMES WITH SEMI-RIGID CONNECTION)

Hakan ERDEM*

ÖZET/ABSTRACT

Bu çalışmada, düzlemsel çerçevelerin davranışı üzerinde, bağlantıların davranışının ve geometrik nonlineerliklerin etkisi araştırılmaktadır. Bu amaçla FORTRAN77 dilinde bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Eğer sisteme yüklenen yük tanjant rijitlik matrisinin determinantını negatif yapıyorsa, program tarafından kritik yük faktörü hesaplanmaktadır. Bağlantıların nonlinear $M-\theta_r$ bağıntısı için Richard Modeli kullanılmakta ve malzeme davranışının lineer elastik olduğu kabul edilmektedir. İkinci merteye analize ait tanjant rijitlik matrisi, çubuk elemanın moment-eğrilik ilişkisini idare eden lineer diferansiyel denklemin, aksenal kuvvet ve yarı rijit bağlantı etkileri de göz önüne alınarak sınır şartları için çözümünden elde edilmektedir. Bu yöntemde, yükler adım adım uygulanmaktadır. Her yük adımında dengelenmemiş kuvvetler kontrol edilmekte ve bu değer tanımlanan toleranstan küçük olana kadar iterasyon işlemine devam edilmektedir. Bu işlemler neticesinde nonlinear analizin lineerleştirilmesinden doğan hatalar istenilen düzeye indirilmektedir.

In this study, the effects of connections and geometric nonlinearities on the behaviour of planar frames are examined. For this purpose a computer program has been prepared in FORTRAN77 language. If the load on the system renders the determinant of the tangent stiffness matrix negative, the program determines the critical load factor. The Richard Model is used for the nonlinear $M-\theta_r$ relation of the connections and the behaviour of the material is assumed to be linearly elastic. The tangent stiffness matrix of the second order analysis is obtained from the solution of the linear differential equation governing the moment-curvature relation of a one-dimensional member in which the effects of axial force and semi-rigid connections are accounted for. In this method, the loads are applied step by step. The unbalanced forces are checked at every step of loading and the iteration is repeated until they are below a predefined tolerance. By means of these operations the errors due to the linearization of the nonlinear analysis is minimized.

ANAHTAR KELİMELER / KEY WORDS :

Nonlinear, yarı rijit bağlantı, düzlemsel, stabilite, adım adım yükleme
Nonlinear, semi-rigid connection, planar, stability, incremental loading

* Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü, SAMSUN

1. GİRİŞ

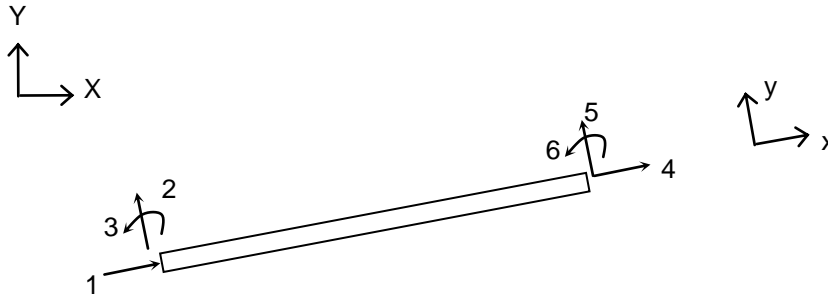
Bu çalışmada, düzlemsel çerçevelerin davranışı üzerinde, bağlantıların davranışının ve geometrik nonlineerliklerin etkisi araştırılmaktadır. Hazırlanan bilgisayar programı ile nonlineer analiz yapılmaktadır. Ancak sistem rijitlik matrisinin determinanı negatif olursa sisteme ait kritik yük faktörü de hesaplanmaktadır. İkinci mertebeye etkiler gözönüne alınırken aksel kuvvetin eğilme ve kesme rijitliklerine etkisi ve eğilme nedeniyle oluşan kısılmanın aksel rijitliğe katkısı göz önüne alınmaktadır. Farklı ara yükleme şekilleri için ankastrelik uç kuvvetleri, aksel kuvvet ve bağlantı davranışı da göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Yükler sisteme adım adım uygulanmaktadır. Her adımda çubuk uçlarında oluşan dengelenmemiş kuvvetler kontrol edilmekte ve dengelenmemiş kuvvetin olması durumunda sisteme uygulanmaktadır. Dengelenmemiş kuvvetler belirli bir tolerans değerinden küçük oluncaya kadar iterasyon işlemine devam edilmektedir.

Sisteme etkiyen yüklerin sırası, birlikte etkiyip etkimemeleri, aksel kuvvetlerin eğilmeye katkısının alınıp alınmaması ve diğer durumlar literatürde mevcut olan örnekler üzerinde incelenmiştir.

2. YÖNTEM

2.1 Düzlemsel Elemanlar İçin Kuvvet Deplasman İlişkileri

Düzlemsel çubuk elemanların her bir ucunda yerel eksenler yönünde iki kuvvet ve bu eksenlere dik olan eksen etrafında bir moment etki etmektedir (Şekil 1). Her bir uca eksenler yönünde deplasmanlar ve bu eksenlere dik olan eksen etrafında ise dönme mevcuttur.



Şekil 1. Düzlemsel çubuk eleman için işaret kabulü

Düzlemsel çubuk elemanın uç kuvvetleri $\{p\}$, uç deplasmanları $\{d\}$ ve ankastrelik uç kuvvetlerinin $\{f\}$ her biri 6×1 boyutlu birer vektör olarak verilebilirler.

$$\begin{aligned} \{p\}^T &= [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad p_5 \quad p_6] \\ \{d\}^T &= [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad d_4 \quad d_5 \quad d_6] \\ \{f\}^T &= [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4 \quad f_5 \quad f_6] \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 Rijitlik Matrisi

(1) vektörleri arasında

$$\begin{aligned}
 p_1 &= k_{1,1}d_1 + k_{1,2}d_2 + k_{1,3}d_3 + k_{1,4}d_4 + k_{1,5}d_5 + k_{1,6}d_6 + f_1 \\
 p_2 &= k_{2,1}d_1 + k_{2,2}d_2 + k_{2,3}d_3 + k_{2,4}d_4 + k_{2,5}d_5 + k_{2,6}d_6 + f_2 \\
 p_3 &= k_{3,1}d_1 + k_{3,2}d_2 + k_{3,3}d_3 + k_{3,4}d_4 + k_{3,5}d_5 + k_{3,6}d_6 + f_3 \\
 p_4 &= k_{4,1}d_1 + k_{4,2}d_2 + k_{4,3}d_3 + k_{4,4}d_4 + k_{4,5}d_5 + k_{4,6}d_6 + f_4 \\
 p_5 &= k_{5,1}d_1 + k_{5,2}d_2 + k_{5,3}d_3 + k_{5,4}d_4 + k_{5,5}d_5 + k_{5,6}d_6 + f_5 \\
 p_6 &= k_{6,1}d_1 + k_{6,2}d_2 + k_{6,3}d_3 + k_{6,4}d_4 + k_{6,5}d_5 + k_{6,6}d_6 + f_6
 \end{aligned} \tag{2}$$

şeklinde bir bağıntı vardır.

Matris gösterimi kullanılacak olursa (2) bağıntıları aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} & k_{1,4} & k_{1,5} & k_{1,6} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} & k_{2,4} & k_{2,5} & k_{2,6} \\ k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} & k_{3,4} & k_{3,5} & k_{3,6} \\ k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} & k_{4,4} & k_{4,5} & k_{4,6} \\ k_{5,1} & k_{5,2} & k_{5,3} & k_{5,4} & k_{5,5} & k_{5,6} \\ k_{6,1} & k_{6,2} & k_{6,3} & k_{6,4} & k_{6,5} & k_{6,6} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{Bmatrix} \tag{3}$$

Kapalı olarak bu ifade aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\{p\} = [k]\{d\} + \{f\} \tag{4}$$

Burada [k] 6×6 boyutlu eleman rijitlik matrisidir. (3) ifadesinde, çubuk yerel eksen takımında tanımlanan [k] matrisinin, sisteme ait düğüm deplasmanlarının bulunması için sistem eksen takımında tanımlanması lazımdır. Bu şekilde çubuklara ait bulunan [k'] matrisleri kodlama tekniği ile toplanarak [K] elde edilir. Sistem eksen takımında oluşturulan {P} ve [K] kullanılarak

$$\{P\} = [K]\{D\} \tag{5}$$

ifadesinden, sistem deplasmanları {D} elde edilir.

Burada {P} sistem yük vektörünü, [K] sistem rijitlik matrisini, {D} ise sistem deplasman vektörünü göstermektedir.

Sistem eksen takımında bir kuvveti bulabilmek için

$$\{p'\} = [k']\{d'\} + \{f'\} \tag{6}$$

ifadesi kullanılır.

Burada kullanılan üssü işareti sistem eksen takımında olduklarını göstermektedir ve

$$\begin{aligned}
 [k'] &= [T]^T [k] [T] \\
 \{p'\}_{6 \times 1} &= [T]_{6 \times 6}^T \{p\}_{6 \times 1} \\
 \{d'\}_{6 \times 1} &= [T]_{6 \times 6}^T \{d\}_{6 \times 1} \\
 \{f'\}_{6 \times 1} &= [T]_{6 \times 6}^T \{f\}_{6 \times 1}
 \end{aligned} \tag{7}$$

ile elde edilmektedirler.

Burada [T] transformasyon matrisini göstermektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} [t] & [0] \\ [0] & [t] \end{bmatrix}, \quad [t] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

2.3 Yarı Rijit Bağlı Düzlemsel Çerçevelerin Rijitlik Matrisi

Eksenel kuvvetin sıfır olması durumunda eğer nonlineer davranan dönel yaylarda varsa (3) deki [k] rijitlik matrisi (Erdem, Aksoğan, Hüseyin 1996)

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} \frac{U_1}{D} & \frac{6EI}{L^2} \frac{U_2}{D} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} \frac{U_1}{D} & \frac{6EI}{L^2} \frac{U_4}{D} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} \frac{U_2}{D} & \frac{4EI}{L} \frac{U_3}{D} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} \frac{U_2}{D} & \frac{2EI}{L} \frac{U_5}{D} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} \frac{U_1}{D} & -\frac{6EI}{L^2} \frac{U_2}{D} & 0 & \frac{12EI}{L^3} \frac{U_1}{D} & -\frac{6EI}{L^2} \frac{U_4}{D} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} \frac{U_4}{D} & \frac{2EI}{L} \frac{U_5}{D} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} \frac{U_4}{D} & \frac{4EI}{L} \frac{U_6}{D} \end{bmatrix} \tag{9}$$

şeklinde tanımlanabilir.

Yukarıdaki matrislerde kullanılan kısaltmalar aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned}
 U_1 &= k_1 + k_2 + 4k_1 k_2 \\
 U_2 &= 2k_1(1 + 2k_2) \\
 U_3 &= k_1(3 + 4k_2) \\
 U_4 &= 2k_2(1 + 2k_1) \\
 U_5 &= 4k_1 k_2 \\
 U_6 &= k_2(3 + 4k_1) \\
 D &= 3 + 4k_1 + 4k_2 + 4k_1 k_2
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$k_1 = \frac{k_a L}{4EI} , k_2 = \frac{k_b L}{4EI}$$

Bu ifadelerdeki k_a ve k_b boyutlu yay katsayıları olup bir radyan dönmeye karşı gelen momentleri gösterirler. k_1 ve k_2 x-y düzleminde çubuğun i ve j uçlarındaki dönel yaylara ait boyutsuz yay katsayılarıdır.

2.4 Yarı Rijit Bağlı Düzlemsel Çerçevelerin Nonlineer Rijitlik Matrisi

2.4.1 Geometrik Nonlineerlik

Yapı sistemleri, sisteme uygulanan yükler altında, başlangıçta lineer gibi davranırlar da, artan yükler altında eğilme momentlerinin ve aksenal kuvvetlerin birbirlerinin rijitliklerini etkilemelerinden dolayı nonlineer davranış gösterirler. Aksenal kuvvetin çekme olması durumunda deformasyon ve eğilme momenti azalmakta, basınç olması durumunda ise artmaktadır.

Yapı yükleme yapıldıkça deplasman yapmaktadır. Yapının bu yer değiştirmiş düğümlerine uygulanan yükler de ilave momentler doğurmaktadır. Oluşan bu momentler de yapının çubuk kuvvetlerini ve kritik yükünü etkilemektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı geometrik etkiler hesaplarda göz önüne alınmalıdır.

Çubuk elemanların nonlineer davranışı geometrik rijitlik matrisini kullanan sonlu elemanlar yöntemleri ile veya kesin çözüme ait rijitlik matrisleri kullanılarak incelenebilir.

Bu çalışmada kesin çözüme ait rijitlik matrisleri kullanılacaktır. Bu yöntemde aksenal kuvvetin etki ettiği elemanı idare eden denge denklemi çözülüp eleman rijitlik matrisi elde edilmektedir. Aksenal kuvvetin sıfır, çekme ve basınç olması için farklı çözümleri bulunmaktadır. Bu yöntem çubuk elemanı tek parça olarak ele alan hesaplarda çok daha doğru sonuçlar vermektedir.

2.4.2 Büyük Geometri Değişimi

Geometrik nonlineerlikler yükleme sırasında yapının elemanlarında yer değiştirme ve eğilmeler olmasıyla meydana gelir. İkinci mertebeli momentler uygulanan yükler uygun deplasmanlarla çarpıldığında elde edilirler.

Geometri değişiminin daha da büyük olması halinde bunun denge şartlarından başka geometrik uygunluk şartları üzerindeki etkisinin de hesaba katılması gerekir. Bu durumda daha evvelce açıklandığı gibi yüklere küçük artımlar verilerek çözüme gidilebilir. Her yük adımında, sistem eksenini olarak bir önceki adımda bulunan deforme olmuş eksen takımını kullanılarak geometri değişiminin çözüme etkisi hesaba katılmış olur.

Yüklere küçük artımlar verildiğinden deplasmanlar da küçük olacak ve her adımda göz önünde tutulan sistem eksenini için lineer geometrik uygunluk şartları kullanılabilir. Ayrıca her adım içerisinde dengelenmemiş kuvvetler kontrol edilmektedir. Dengelenmemiş kuvvetleri düzeltme için yapılan bu işlemler neticesinde aynı zamanda deplasmanlar da düzeltilmiş olmaktadır.

Kuvvetler ve deplasmanlar arasındaki temel ilişki birinci mertebeli rijitlik matrisinde olduğu gibi $\{p\} = [k]\{d\} + \{f\}$ kapalı formunda gösterilebilir. Ancak $[k]$ ve $\{f\}$ ifadelerinde aksenal kuvvetin ve eğilme momentlerinin neden olduğu değişiklikler yapılmalıdır. Değişikliklerle bu ilişki ikinci mertebeli analizinde de kullanılabilir.

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L}s_1 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L}s_1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3}s_2 & \frac{6EI}{L^2}s_3 & 0 & -\frac{12EI}{L^3}s_2 & \frac{6EI}{L^2}s_5 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2}s_3 & \frac{4EI}{L}s_4 & 0 & -\frac{6EI}{L^2}s_3 & \frac{2EI}{L}s_6 \\ -\frac{EA}{L}s_1 & 0 & 0 & \frac{EA}{L}s_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3}s_2 & -\frac{6EI}{L^2}s_3 & 0 & \frac{12EI}{L^3}s_2 & -\frac{6EI}{L^2}s_5 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2}s_5 & \frac{4EI}{L}s_6 & 0 & -\frac{6EI}{L^2}s_5 & \frac{4EI}{L}s_7 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Burada

$$s_1 = \frac{1}{1 + * \frac{EA}{4N^3L^2} [H]}$$

$$s_2 = \frac{U_1}{D}, \quad s_3 = \frac{U_2}{D}, \quad s_4 = \frac{U_3}{D}, \quad s_5 = \frac{U_4}{D}, \quad s_6 = \frac{U_5}{D}, \quad s_7 = \frac{U_6}{D} \quad (12)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Yukarıdaki matrislerde kullanılan kısaltmalar aşağıda verilmektedir.

$$H = u(M_a^2 + M_b^2)(\text{Cotu} + u\text{Cosec}^2 u) - 2(M_a + M_b)^2 + 2uM_aM_b(\text{Cosec} u)(1 + u\text{Cotu})$$

$$U_1 = \frac{u^3[(k_a k_b - *EI N)\text{Sinu} + \alpha EI(k_a + k_b)\text{Cosu}]}{12}$$

$$U_2 = \frac{u^2[\alpha EI k_a \text{Sinu} + *k_a k_b(1 - \text{Cosu})]}{6}$$

$$U_3 = \frac{u[*k_a k_b + k_a NL]\text{Sinu} - *uk_a k_b \text{Cosu}}{4}$$

$$U_4 = \frac{u^2[*k_a k_b(1 - \text{Cosu}) + \alpha EI k_b \text{Sinu}]}{6} \quad (13)$$

$$U_5 = \frac{u[*k_a k_b u - k_a k_b \text{Sinu}]}{2}$$

$$U_6 = \frac{u[*k_a k_b + Nk_b L]\text{Sinu} - *uk_a k_b \text{Cosu}}{4}$$

$$D = [\alpha EI(*k_a + k_b) + NL] - *uk_a k_b \text{Sinu} - * [NL(k_a + k_b) + *2k_a k_b] \text{Cosu} + 2k_a k_b$$

$$\alpha^2 = \frac{N}{EI}, \quad u = \alpha L$$

$k_a = i$ ucuna ait dönel yay rijitliği

$k_b = j$ ucuna ait dönel yay rijitliği

Yukarıdaki ifadelerde aksenal kuvvet basınç ($N>0$) ise $*$ =1 dir. Eğer aksenal kuvvet çekme ($N<0$) ise $*$ = -1 olur ve Sin u, Cos u, Cot u, Cosec u ifadelerinin yerlerini sırasıyla Sinh u, Cosh u, Coth u, Cosech u ifadeleri alırlar.

2.5 Düğüm Noktalarında Uygunluk ve Denge Koşulları

Hesaplamalarda, her deformasyon durumunda uygunluk ve denge koşulunun sağlanması gerekir. Eleman rijitlik matrislerinden sistem rijitlik matrisinin elde edilmesinde, bir düğüm noktasında birleşen çubuk uçlarının aynı deplasmanı yapacakları kabulü kullanılmıştır. Böylece düğüm noktalarında sağlanması gereken uygunluk koşulları yerine gelmiş olmaktadır.

Düğüm noktalarının dengesi için ise düğüm noktalarına etkiyen dış kuvvetlerle çubuk uçlarında meydana gelen uç kuvvetleri için denge denklemleri yazılır. Nonlineer analizde yükler adım adım orantılı olarak yüklenmekte ve bu yükleme sırasında dengelenmemiş kuvvetler oluşmaktadır. Düğümlerde dengeyi sağlayabilmek için her bir yük adımında dengelenmemiş kuvvetleri küçültmek amacıyla iterasyonlar yapılmaktadır. Her iterasyonda düğümlerin deplasmanları kullanılarak düğüm koordinatları yenilenmekte ve bu son duruma göre çerçeve yeniden çözülmektedir. Denge belirli bir doğrulukla sağlandığında yeni yük adımına geçilmektedir.

2.6 Nonlinear Denklemlerin Hesaplanması

Bu çalışmada, toplam yükleri yük adım sayısına bölerek orantılı olarak uygulayan ve böylece nonlinear analizi lineerleştiren, ayrıca her yük adımında da düğüm denge denklemlerini sağlamak için Newton-Raphson yöntemi adım adım yükleme ile iterasyon biçiminde uygulanmaktadır.

$$\{R\}_j^i = \{\Delta P\}^{i+1} - \{F\}_j^i \quad (14)$$

Burada i indisi yük adım sayısını, j indisi ise bir yük adımındaki iterasyon devresini göstermek için kullanılmaktadır. $\{\Delta P\}^{i+1}$ sisteme uygulanan o andaki yük vektörünü, $\{F\}_j^i$ o adımdaki toplam iç direnç vektörünü, $\{R\}_j^i$ ise dengelenmemiş yük vektörünü göstermektedir.

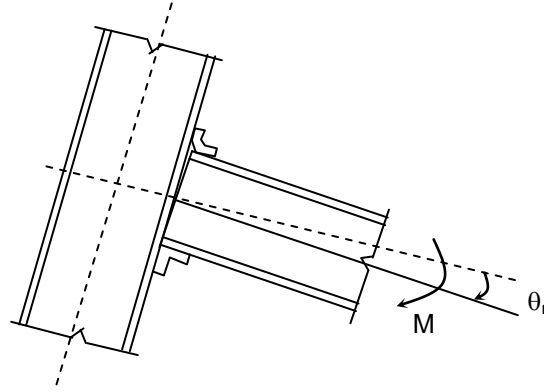
Bu yöntem $\{R\}_{j+1}^i$ değerlerinin o adımdaki (iterasyondaki) toplam yük değerleriyle karşılaştırılmasına dayanmakta olup aşağıdaki şekilde verilir.

$$\frac{\{R\}_{j+1}^i T \{R\}_{j+1}^i}{\{P\}^{i+1T} \{P\}^{i+1}} \leq TOL \quad (15)$$

Burada TOL belirlenen toleransı göstermektedir.

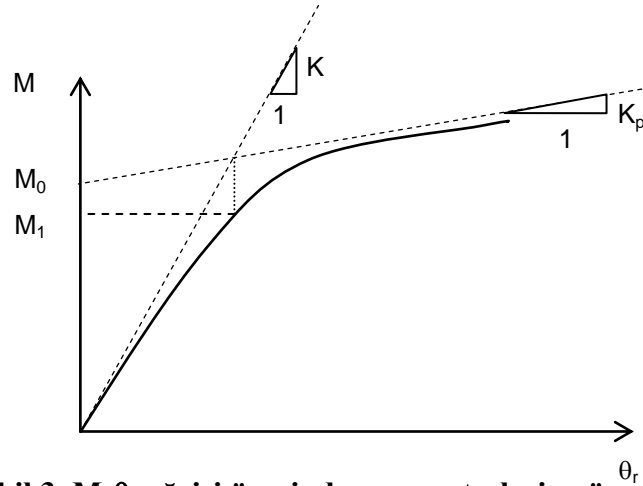
2.7 Yarı Rijit Bağlantıların Modellenmesi

Kirişten kolona olduğu gibi bir elemandan diğerine transfer edilen kuvvetlerin ve momentlerin arasında bağlantılar vardır. Birçok bağlantıda aksenal ve ona dik bağlı yer değiştirmeler, açılmalı bağlı yer değiştirmelere göre daha küçüktür.



Şekil 2 Kolonun kirişe göre bağıl dönmesi

Açısal bağıl yer değiştirmeler bağlantıdaki momentin bir fonksiyonu olarak tarif edilmektedir. Bir bağlantıya M momenti uygulandığında kiriş ve kolon arasında θ_r bağıl dönmesi meydana gelir. Bu dönme kiriş ve kolon eksenleri arasındaki açının değişmesini göstermektedir (Şekil 2).



Şekil 3. $M-\theta_r$ eğrisi üzerinde parametrelerin gösterilmesi

Yarı rijit bağlantılar için $M-\theta_r$ bağıntısı hemen hemen tüm yükleme boyunca nonlineerdir. Bağlantı davranışı lineer, çok parçalı lineer, polinom, kübik b-spline, kuvvet ve üssel modellerle gösterilmektedir. Bağlantı davranışını modellemeye en uygun olan “Dört Parametrelili Richard Modeli” burada kullanılmaktadır. Bu modelde bağlantı rijitliği

$$K = \frac{dM}{d\theta_r} = \frac{(K_o - K_p)}{\left(1 + \left|\frac{(K_o - K_p)\theta_r}{M_0}\right|^n\right)^{\frac{n+1}{n}}} + K_p \quad (16)$$

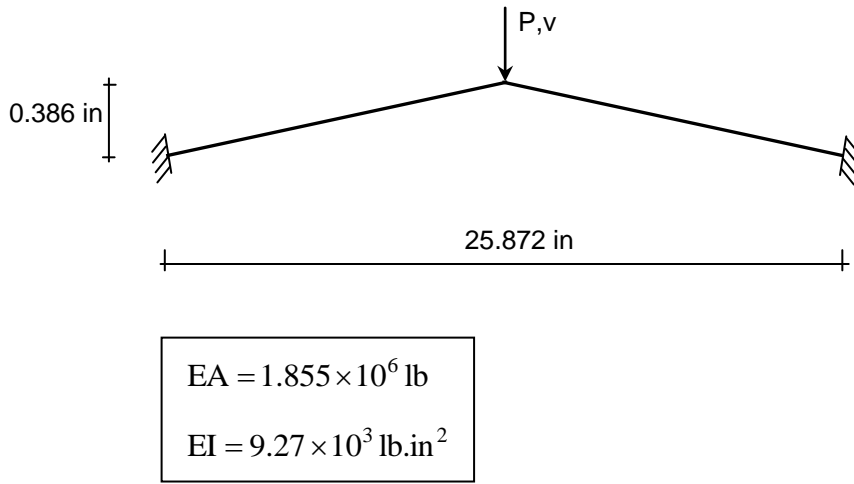
ile gösterilmektedir.

Buradaki K_0 bağlantının ilk rijitliğini, K_p bağlantının plastik rijitliğini, M_0 referans momentini ve n ise eğri şekil parametresini göstermektedir. θ_r ise bağlantıya ait bağıl dönme açısıdır. n aşağıdaki ifade ile elde edilir.

$$n = \frac{-\ln 2}{\ln \left(\frac{M_1}{M_0} - \frac{K_p}{K - K_p} \right)} \quad (17)$$

3. SAYISAL UYGULAMALAR

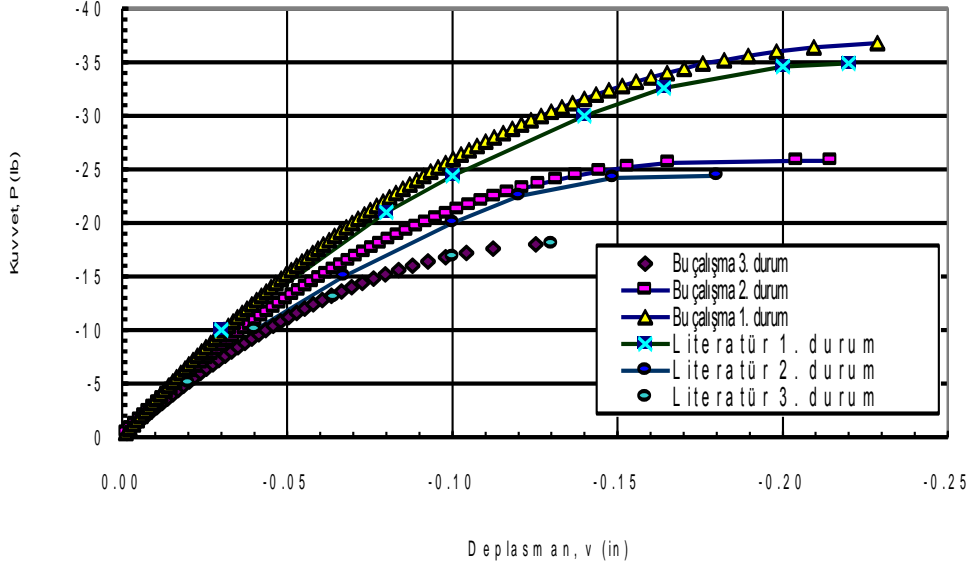
3.1 Basık Çerçeve (William's Toggle)



Şekil 4. Basık çerçevenin geometrisi ve eleman özellikleri

Şekil 4'de geometrisi ve eleman özellikleri gösterilen çerçeve üç farklı rijitlik için Al-Bermani ve Kitipornchai (1992) tarafından çözülmüştür. Literatürde yöntemlerin karşılaştırılmasında sıkça kullanılan bu çerçeveye ait yük deplasman ilişkisi birinci durum için yay rijitlikleri sonsuz, ikinci durum için $1.8 \times 10^3 \text{ lb-in/rad}$ ve üçüncü durum için ise sıfır alınarak bulunmuştur.

Bu çalışmada her bir durum Al-Bermani ve Kitipornchai (1992) ile hesaplanarak Şekil 5'te verilmiştir. Sonuçlar arasındaki farkın az olduğu Şekil 5'te görülmektedir.

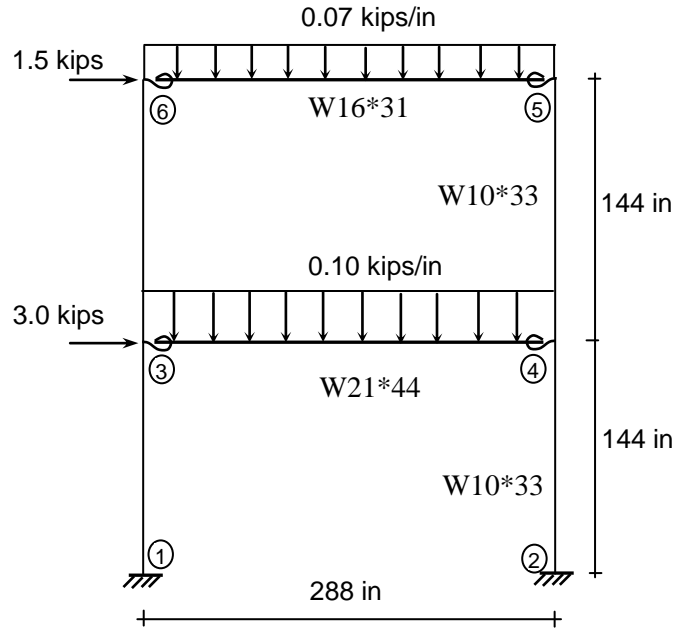


Şekil 5. Basık Çerçeve için Al-Bermani ve Kitipornchai ile karşılaştırma

3.2 İki Katlı Tek Açıklıklı (Direk ve Ara Yüklü) Çerçeve

Şekil 6'da geometrisi, eleman tipleri ve yükleme durumu gösterilen iki katlı tek açıklıklı çerçeve, düğüm yükleri ve ara yükleme altında analiz edilmiştir. Çizelge 1'de King ve Chen (1993)'in sonlu eleman çözümü, King ve Chen (1993)'in yaklaşık çözümü ve bu çalışmada $s_1 = 1$ ve $s_1 \neq 1$ durumları için bulunan sonuçlar, düşey ve yatay yüklemenin birlikte olup olmamasına göre karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'den de görüleceği üzere yarı rijit bağlantı olması, eğilmenin göz önüne alınması ve yükün ard arda (sırasıyla önce düşey sonra yatay yük) iki yük adımında uygulanmasıyla sistemin yatay deplasmanlarının arttığı görülmektedir.

Bağlantıya ait özellikler ve birimler $K_i = 206667 \text{ in} - \text{kip} / \text{rad}$, $M_u = 761 \text{ in} - \text{kip}$ ve $C = 0.525$ olarak alınmıştır.



Şekil 6. İki katlı tek açıklıklı direk ve ara yüklü çerçeve

Çizelge 1. İki katlı tek açıklıklı direk ve ara yüklü çerçeve için yatay deplasmanların karşılaştırması (in)

Düğüm No	Rijit Bağlantılı Çerçeve		Yarı Rijit Bağlantılı Çerçeve					
	King ve Chen	Bu Çalışma	King ve Chen	King Ve Chen Yaklaşık	Bu Çalışma	Bu Çalışma	Bu Çalışma	Bu Çalışma
					$s_1 = 1$	$s_1 = 1$	$s_1 \neq 1$	$s_1 \neq 1$
					Tek yük adımı	İki yük adımı	Tek yük adımı	İki yük adımı
3	0.14	0.142	0.25	0.24	0.224	0.235	0.224	0.236
6	0.23	0.226	0.50	0.47	0.440	0.477	0.440	0.481

4. SONUÇ

Eksenel kuvvetin eğilme rijitliğine etkisi ikinci mertebeden momentler doğurmaktadır. Bu etki nonlineer analizlerde göz önüne alınmaktadır. Eğilme momenti de eksenel kısalmaya neden olması sebebiyle eksenel rijitliği etkilemektedir. Her iki etkinin birlikte alınması daha doğru sonuçlar doğurmaktadır. Ayrıca hem düşey hem de yatay yüklerin etkisi altındaki sistemler, düşey ve yatay yüklerin bir arada etki ettirildiğinde, eğer düğüm koordinatları da güncelleniyorsa, düşey düğüm yükleri düğümlerin yatay yer değiştirmesi nedeniyle ilave momentler de doğuracaktır. Farklı olarak düşey ve yatay yükler ard arda yüklenecek olursa, eğilmiş yatay çubuklara yatay yüklerin etki etmesi daha büyük ikinci mertebeli moment oluşmasına sebep olacaktır.

Bütün bu sebeplerden dolayı, doğru çözümü etkileyebilecek bütün etkiler göz önüne alınmalıdır. Bağlantıların gerçek davranışlarının tespit edilip göz önüne alınması, nonlineerliği etkileyen faktörlerin ve yüklemenin birlikte uygulanıp uygulanmayacağına karar verilmesi vb. etkiler çıkan sonuçları etkileyecektir.

5. KAYNAKLAR

- AKSOĞAN, O. MISTIKOĞLU, G. ve AKAVCI, S.S., 1995. Ultimate Capacities of Frames with Strain-Softening Connections. Proceedings of the Third International Conference on Steel and Aluminium Structures, 231-238.
- AL-BERMANI, F.G.A. and KITIPORNCHAI, S., 1992. Elastoplastic Nonlinear Analysis of Flexibly Jointed Space Frames. J. Struct. Eng. ASCE, 118(1):108-127.
- ALMUSALLAM, T.H. and RICHARD, R.M., 1993. Steel Frame Analysis with Flexible Joints Exhibiting a Strain Softening Behavior. Comp. Struct., 46(1):55-65.
- BARAKAT, M. and CHEN, W.F., 1990. Practical Analysis of Semi-rigid Frames. Eng. J. AISC, 27(2):54-68.
- BATOZ, J.L. and DHATT, G., 1979. Incremental Displacement Algorithms for Nonlinear Problems. Int. J. Num. Meth. Eng., 14:1262-1266.
- BERGAN, P.G., 1980. Solution Algorithms for Nonlinear Structural Problems. Comp. Struct., 12: 497-509.
- CHAN, S.L., 1988. Geometric and Material Nonlinear Analysis of Beam-Columns and Frames Using the Minimum Residual Displacement Method. Int. J. Num. Meth. Eng., 26:2657-2669.
- ERDEM, H. ve AKSOĞAN, O., 1994. The Analysis of Frames Consisting of Members Connected to Their Rigid End Sections by Nonlinear Rotational Springs. Ç.Ü.Müh.Mim.Fak. Dergisi, 9(1-2):33-46.
- ERDEM, H., AKSOĞAN, O. ve HÜSEYİN, K., 1996. Bağlantıları Yarı Rijit ve Nonlineer Davranan Üç Boyutlu Çerçevelerin İncelenmesi. Ç.Ü.Müh.Mim.Fak. Dergisi, 11:33-45.
- KING, W.S. and CHEN, W.F., 1993. LRFD Analysis for Semi Rigid Frame Design. Eng. J. AISC,
- TOADER, I.H.I., 1993. Stability Functions for Members with Semirigid Joint Connections. J. Struct. Eng. ASCE, 119(2):505-521.
- VISSER, M., 1995. Steel Frame Stability Design. Eng. J. AISC, 32(1): 12-20.
- YU, C.H. and SHANMUGAM, N.E., 1986. Stability of Frames with Semirigid Joints. Comp. Struct., 23(5):639-648.