

**MODELING OF NONLINEAR BEHAVIOR OF DOUBLE-ANGLE SHEAR CONNECTIONS**

**Bülent AKBAŞ<sup>\*1</sup>, Jay SHEN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Deprem ve Yapı Bilimleri Anabilim Dalı, KOCAELİ

<sup>2</sup> Illinois Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering, USA

**Geliş/Received: 02.09.2005 Kabul/Accepted: 25.04.2006**

**ABSTRACT**

Shear (or simple) connections in steel construction are primarily used to transfer the support reaction of a simply supported beam to a column or a beam. A shear connection should be strong enough to be able to transfer the shear force, and flexible and ductile enough to accommodate the rotation demand of the beam end. The double-angle shear connection is one of the most commonly used simple shear connections, and many investigations have been conducted on the behavior and design of this type of connection. This study presents a simplified model (fiber model) for predicting the inelastic behavior of double angle connections and a design example.

**Keywords:** Double angle shear connection, fiber model, nonlinear behavior, beam line.

**ÇİFT KORNİYERLİ KESME KUVVETİ AKTARAN BİRLEŞİMLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

**ÖZET**

Çelik yapılarda kullanılan kesme kuvveti aktaran birleşimler (veya basit kiriş birleşimleri) esas olarak basit bir kirişin mesnet tepkisini bir kolona veya bir kirişe aktarmakta kullanılırlar. Bir kesme kuvveti aktaran birleşim, kesme kuvvetini aktarabilecek kadar güçlü ve aynı zamanda da kiriş ucundaki dönme talebini karşılayabilecek kadar esnek ve sünek olmak zorundadır. Çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimler en çok kullanılan kesme kuvveti aktaran birleşimlerden biridir ve bu tür birleşimlerin davranışı ve tasarımına yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, çift korniyerli birleşimlerin doğrusal olmayan davranışının lif modeli yardımıyla tahmin edilmesi ve bir uygulama örneği sunulmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşim, lif modeli, doğrusal olmayan davranış, kiriş çizgisi.

**1. GİRİŞ**

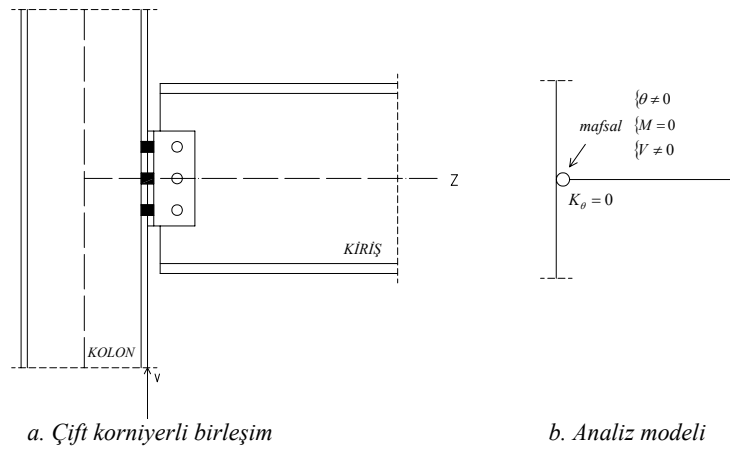
LRFD'de [1] dönme rijitliğine bağlı olarak teşkil edilebilecek iki tip çelik birleşim tanımlanmıştır: a) rijit birleşim, b) basit kiriş birleşimi. Rijit bir birleşimde birleşimin, ankastrelik momentinin %90'ından daha fazlasını taşıyabilecek yeterli rijitliğe, basit kiriş birleşiminde ise birleşimin ankastrelik momentinin ancak %20'sinden daha azını taşıyabilecek rijitliğe sahip

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Autor: e-mail/e-ileti: akbasb@gyte.edu.tr, tel: (0262) 605 16 07

olduğu kabul edilir. Moment taşıma kapasitesi, ankastrelik momentinin %20-90'ı arasında ise bu tür birleşimlere yarı-rijit birleşim adı verilir. Bu birleşim tiplerinden basit kiriş birleşimleri kesme kuvveti aktaran birleşimler olarak da adlandırılır ve genellikle çift korniyerlerden, alın levhalarından, T kesitlerden, mesnet korniyerlerinden (berkitmeli veya berkitmesiz) teşkil edilebilir [2, 3].

Kesme kuvveti aktaran birleşimler, hemen hemen tüm modern çelik binalarda basit bir kirişte oluşacak mesnet tepkisini kolona veya kirişe aktarmada kullanılırlar. Bir kesme kuvveti aktaran birleşim, mesnette oluşacak kesme kuvvetini aktarabilecek kadar güçlü, kiriş ucunda oluşacak dönme talebini de rahatlıkla karşılayabilecek kadar esnek ve sünek olmalıdır [4]. Basit bir kiriş birleşiminde mesnet elemanı kolon başlığı veya gövdesi olabileceği gibi kiriş gövdesi de olabilir. Kesme kuvveti aktaran birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükler altındaki davranışları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Şekil 1'de çift korniyerli tipik bir kesme kuvveti aktaran birleşim uygulaması ve analiz modeli gösterilmiştir. Çift korniyerli birleşimler (ÇKB), en çok kullanılan kesme kuvveti aktaran birleşim tiplerinden birisidir.

Bu çalışmada ÇKB'in doğrusal olmayan davranışı basit bir model (lif modeli) yardımıyla elde edilmiş ve bir uygulama örneği sunulmuştur.



Şekil 1. Tipik bir kesme kuvveti aktaran birleşim

## 2. KIRIŞ ÇİZGİSİ VE MOMENT – DÖNME İLİŞKİLERİ

Kesme kuvveti aktaran bir birleşimin yeterliliği, birleşimin gereken kesme kapasitesine sahip olup olmamasına ve birleşimde oluşan dönmelerin kirişin limit yüke ulaştığı andaki dönmeleri geçip geçmemesine bağlıdır [15]. Doğrusal veya doğrusal olmayan birleşimlerin Moment ( $M$ ) – Dönme ( $\theta$ ) ilişkilerinin elde edilmesinde kiriş çizgisi denklemlerinden yararlanılabilir. Düzgün yayılı yük ( $q$ ) etkisi altındaki bir kiriş için kiriş çizgisi denklemini (Şekil 2) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [16].

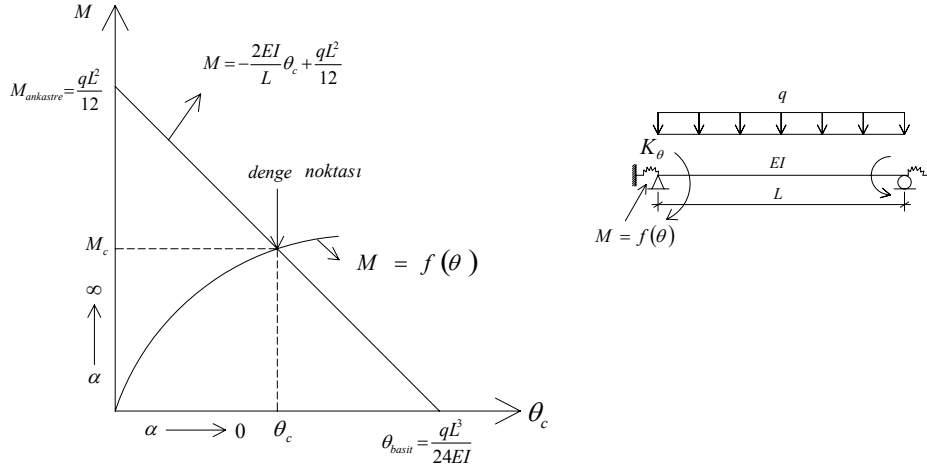
$$M = -\frac{2EI}{L}\theta_c + \frac{qL^2}{12} \quad (1)$$

Birleşimin  $M$ - $\theta$  eğrisinin kiriş çizgisini kestiği noktaya denge noktası adı verilir ve doğrusal davranış gösteren bir birleşimin denge noktasında  $M = M_c$  için

$$M_c = \frac{qL^2}{12} \left( \frac{1}{1 + \frac{2}{\alpha}} \right); \quad \alpha = \frac{K_\theta}{(EI/L)} \quad (2)$$

ve

$$\theta_c = M_c / K_\theta = \theta_c = \frac{qL^2}{12} \left( \frac{1}{2EI/L + K_\theta} \right) \quad (3)$$



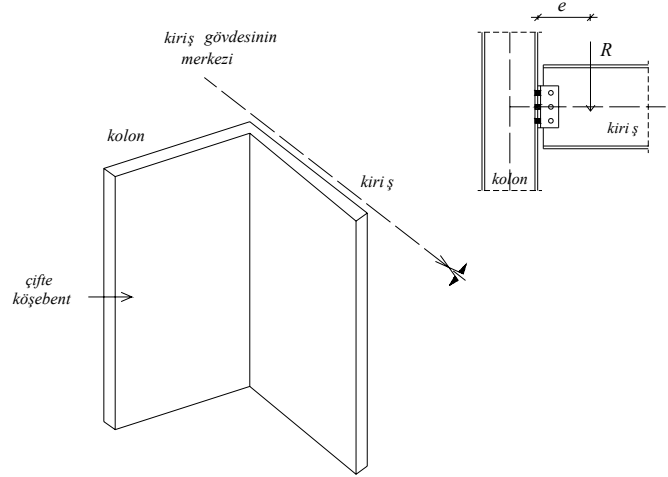
Şekil 2. Doğrusal olmayan bir birleşim kiriş çizgisi

yazılabilir. Şekil 2'deki  $\alpha \rightarrow 0$  durumu basit kiriş birleşimini,  $\alpha \rightarrow \infty$  durumu ise ankastre kiriş birleşimini göstermektedir. Doğrusal olmayan davranış gösteren bir birleşim için ise  $M, f(\theta)$ 'nın bir fonksiyonudur (Şekil 2) ve deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilebilir. Belirli bir birleşim için kiriş çizgisiyle deneysel olarak elde edilen  $M-\theta$  eğrisinin kesiştiği nokta, üzerinde  $q$  yayılı yükü bulunan  $L$  uzunluğundaki bir kirişin bu birleşimle teşkil edildiğinde birleşimde oluşacak momenti ve dönmeyi göstermektedir.

### 3. ÇİFT KORNİYERLİ KESME KUVVETİ AKTARAN BİRLEŞİMLER

Çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimler kiriş gövdesinin her iki tarafına yerleştirilen iki korniyerden teşkil edilir (Şekil 3). Çift korniyerlerle 4 değişik birleşim teşkili mümkündür: a) bulonlu (kiriş gövdesine)- bulonlu (kolon başlığına) (yaygın); b) bulonlu (kiriş gövdesine)- kaynaklı (kolon başlığına) (yaygın); c) kaynaklı (kiriş gövdesine)- bulonlu (kolon başlığına); d) kaynaklı (kiriş gövdesine)- kaynaklı (kolon başlığına) (Şekil 4 ve 5).

ÇKB'de bileşik kesme ve eğilme etkisi altında göçme modları kaynakta kırılma; kaynak ulaşım deliği için traşlanmış kiriş gövdesinde blok kayma yırtılması; bulonlarda kesme kırılması; kiriş gövdesi, kolon başlığı ve korniyer ayağında taşıma gücü kaybı; ve korniyer net alanı boyunca kesme kırılmasıdır. En çok kullanılan bulonlu-kaynaklı ÇKB, bulonlu-bulonlu birleşimlere göre daha sünekler, buna karşılık daha az rijittirler [17].



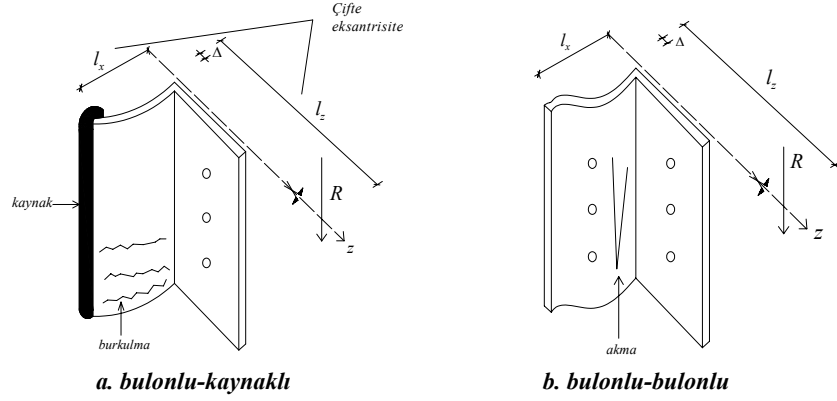
Şekil 3. Çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşim

#### 4. ÇİFT KORNİYERLİ KESME KUVVETİ AKTARAN BİRLEŞİMLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI İÇİN STATİK MODEL VE LİF MODELİ

Bir birleşimin  $M - \theta$  eğrisinin elde edilmesinin en doğru fakat aynı zamanda da en pahalı yolu laboratuvar deneyleridir. Oldukça fazla miktarda para ve zaman gerektiren deneysel yol, mühendislik ofislerinde kullanılması çok zor ve pratik olmadığından, sadece araştırma amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar yoluyla oluşmuş veri bankaları yardımıyla ise birleşimin geometrik ve mekanik özellikleri kullanılarak oluşturulan matematiksel modeller birleşimin mukabelesini tahmin etmekte kullanılabilirler. Literatürde en çok bilinen matematiksel modeller eğri uydurma (deney veya sayısal benzeşim sonuçlarına göre), basitleştirilmiş modeller, mekanik modeller, ve sonlu elemanlar analizidir [18]. Eğri uydurma yardımıyla en doğru sonuçlar elde edilebilir. Mekanik modeller eğer birleşimdeki elemanların yük-deformasyon özellikleri biliniyorsa, bilgisayar programları yardımıyla rahatlıkla kullanılabilirler. Sonlu elemanlar analizinde modelin çok dikkatli oluşturulması gerekmektedir (malzeme ve geometrik doğrusal olmama durumu, korniyer ve bulonlar arasındaki etkileşim, vb.). Basitleştirilmiş modeller ise daha az doğru olmasına rağmen, gerçek davranışın önemli kısımlarını göz önüne alır ve pratiktirler.

ÇKB'in  $M-\theta$  eğrisinin elde edilmesinde, doğrusal analiz için birleşimin yarısını temsil eden L şeklindeki bir model kullanılabilir (Şekil 4). Aynı model üzerine, oluşması muhtemel plastik mafsallar konularak doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilebilir. ÇKB'in doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri ise lif modeli yardımıyla gerçekleştirilebilir. Lif modeli (veya çoklu yay modeli), ilk olarak iki eksenli eğilmeye maruz betonarme elemanlarda betonu modellemek için kullanılmıştır [19]. Bu yöntemde elemanın kesiti, aksenal yük veya gerilme ve deformasyon (yer değiştirme veya birim deformasyon) altındaki davranışı bilinen küçük parçalara ayrılır ve her bir parçaya lif adı verilir. Kesitin tüm olarak davranışını tanıtmak için ise statik denge ve uygunluk koşulları uygulanır. Çelik elemanların aksenal davranışlarının oldukça iyi ve doğru bir şekilde tanımlanabilmesinden dolayı bir kesitin davranışı bir grup lif tarafından doğru bir şekilde temsil edilebilir. Daha çok lif kullanmak lif modelinin doğruluğunu da arttıracaktır.

Lif modeli, pekleşmeyi daha iyi tanımlayabilir ve kesit içindeki ve eleman boyunca aksenal kuvvet-moment akma etkileşimini, artık gerilmeleri ve akmanın yavaş yavaş olan dağılımını temsil edebilir [20].



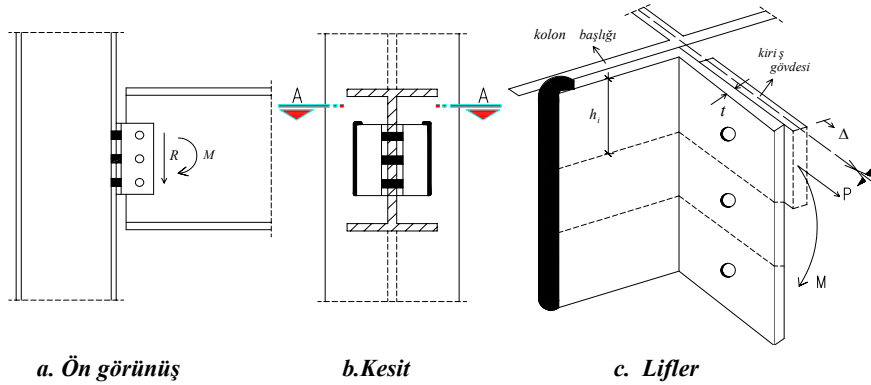
Şekil 4. Çift korniyerli birleşimin yarısına karşı gelen model

Bu çalışmada, çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimlerin lif modeli yardımıyla  $M-\theta$  ilişkilerinin belirlenmesi gösterilecektir. Şekil 5c ve 6c'de sırasıyla bulonlu-kaynaklı ve bulonlu-bulonlu çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimlerde korniyerlerin  $h_i$  yüksekliğinde parçalara bölünerek liflere ayrılması gösterilmiştir. Şekil 5c ve 6c'de görüldüğü gibi korniyerlerin en üst lifinde etkiyen  $P$  kuvveti, birleşime uç momenti etkidiği zaman oluşacaktır. Bu uç momenti,  $V$  mesnet tepkisiyle (Şekil 1) bulonların ağırlık merkezi veya kaynak çizgisi arasındaki  $e$  eksantrisitesinden dolayı oluşur.

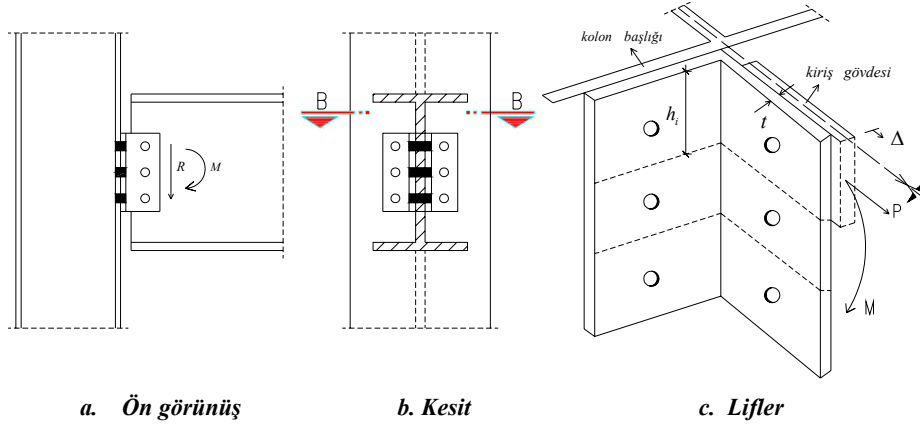
#### 4.1. Bulonlu- Kaynaklı Birleşimlerde Statik Model

Bulonlu-kaynaklı birleşimlerde korniyere etkiyen  $P$  tekil yükü (Şekil 7) bir ucu kayıcı ankastre diğer ucu kayıcı mesnet olan bir kirişe etkiyormuş gibi düşünülebilir (Şekil 8a) [17]. Buna göre çekme kuvveti altında oluşacak  $\Delta$  yer değiştirmesi (Şekil 8a) bilinen elastik yöntemler kullanılarak

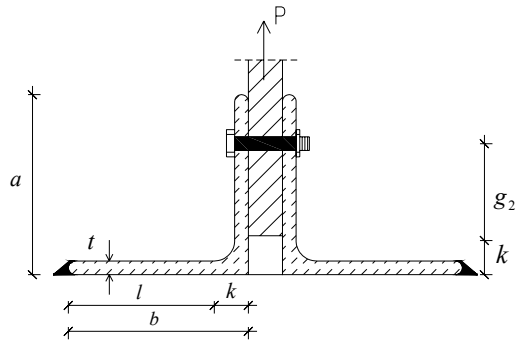
$$\Delta = \frac{Pl^3}{6EI} \left( 1 + \frac{3g_2}{l} \right) \quad (4)$$



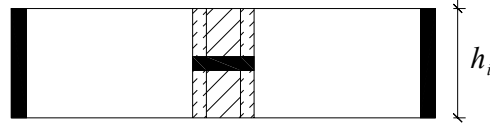
Şekil 5. Bulonlu-kaynaklı çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimlerde lif modeli



a. Ön görünüş      b. Kesit      c. Lifter  
 Şekil 6. Bulonlu-bulonlu çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimlerde lif modeli

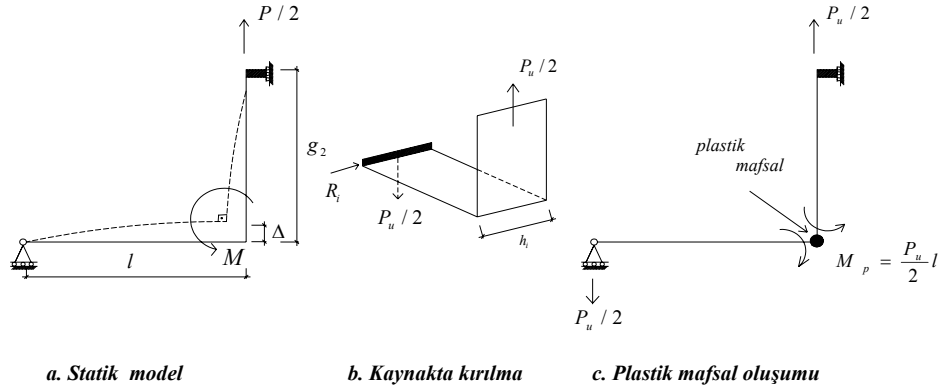


a. Kesit



b. Üst görünüş

Şekil 7. Bulonlu-kaynaklı çift korniyerli birleşim



a. Statik model                      b. Kaynakta kırılma                      c. Plastik mafsals oluşumu

Şekil 8. Bulonlu-kaynaklı birleşim modeli ve göçme modları (çekme kuvveti için)

olarak yazılabilir. Denklem 4'te  $P$ ,  $h_i$  yüksekliğindeki korniyer parçasına etkiyen çekme kuvvetini;  $E$ , elastisite modülünü;  $l$ , korniyerin kolon başlığına bağlanan kolun uzunluğundan  $k$ 'nın farkını;  $k$ , korniyer dış kenarıyla korniyerin iç köşesindeki yuvarlak dolgunun ucu arasındaki mesafeyi;  $g_2$ , korniyerin giriş gövdesine bulonla bağlandığı koldaki bulon ekseninden  $k$ 'nın farkını;  $I$  ise  $h_i$  genişliğindeki ve  $t$  kalınlığındaki kesitin atalet momentini göstermektedir. Buna göre  $I$  (Şekil 7b):

$$I = \frac{1}{12} h_i t^3 \quad (5)$$

olacaktır. Doğrusal davranış için başlangıç rijitliği  $K_0 = P/\Delta$  olarak yazılabilir.

$$K_o = \frac{6EI}{L^3} \left( \frac{1}{1 + \frac{3g_2}{l}} \right) \quad (6)$$

Bulonlu-kaynaklı birleşimlerde göçme, kaynakta kırılma ve korniyerin iç köşesinde plastik mafsals oluşumuyla meydana gelecektir. Kaynakta kırılma için Şekil 8b'den

$$\left( \frac{P_u}{2} \right)^2 + R_i^2 = (F_w h_i)^2 \quad (7)$$

yazılabilir. Burada  $P_u$ , yük katsayıları ile arttırılmış düzenek çekme kuvvetini (LRFD için);  $R_i$ ,  $i$  parçasındaki kesme kuvvetini ( $= R/n$ );  $R$ , statik modele etkiyen toplam kesme kuvvetini;  $n$ , parça sayısını;  $h_i$ , parça genişliğini; ve  $F_w$ , birim uzunluk için kaynak mukavemetini göstermektedir. Denklem 7'den  $P_u$  çekilirse

$$P_u = 2\sqrt{(F_w h_i)^2 + R_i^2} \quad (8)$$

bulunur. Korniyerin iç köşesindeki plastik mafsals momenti ise

$$M_p = \frac{P_u l}{2} \quad (9)$$

olur. Buradan  $P_u$  çekilirse

$$P_u = \frac{2M_p}{l} \quad (10)$$

bulunur. Denklem 10'daki  $M_p$  :

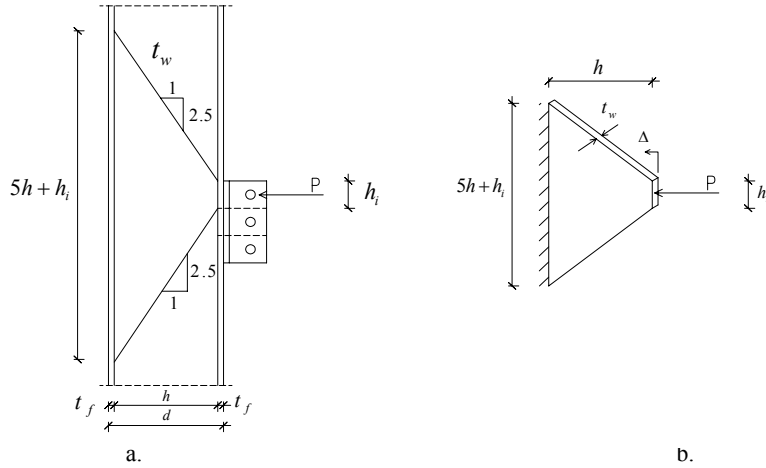
$$M_p = ZF_y = \left( \frac{1}{4} h_i t^2 \right) F_y \quad (11)$$

olarak yazılabilir. Burada  $Z$ , plastik kesit modülünü;  $F_y$ , korniyerin akma mukavemetini göstermektedir. Denklem 8 ve 10 kullanılarak  $P_u$  aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_u = \min \left\{ \begin{array}{l} 2M_p / L \\ 2\sqrt{(F_w h_i)^2 - R_i^2} \end{array} \right. \quad (12)$$

Herhangi bir parçaya etkiyen  $P$  kuvvetinin basınç kuvveti olması durumunda basınç rijitliği,  $K_c$ ,  $P$  kuvvetinin kolon gövdesi boyunca  $1/2.5$  eğimindeki bir bölgeye yayıldığı kabulüyle (Şekil 9) ve elastik yöntemler kullanılarak

$$K_c = \frac{5Et_w}{\ln \left( 1 + \frac{5h}{h_i} \right)} \quad (13)$$

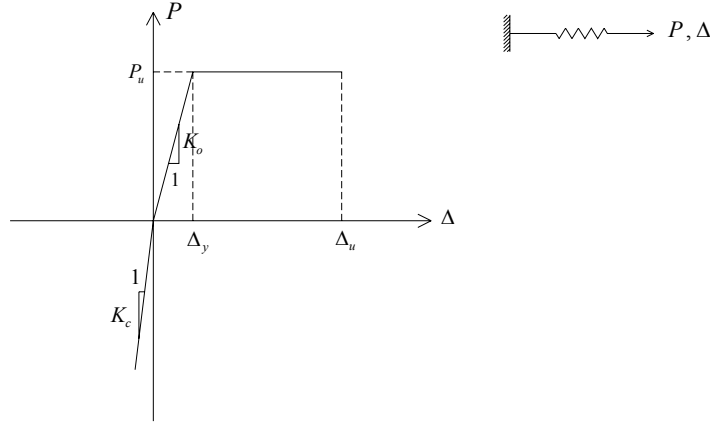


Şekil 9. Bulonlu-kaynaklı birleşim modeli (basınç kuvveti için)

ifadesi elde edilir. Burada  $t_w$ , kolon gövdesinin kalınlığını;  $h$ , kolon gövdesinin yüksekliğini ( $= d - 2t_f$ );  $d$ , kolon yüksekliğini;  $t_f$ , kolon başlık kalınlığını göstermektedir. Denklem 6 ve



13 kullanılarak bulonlu-kaynaklı ÇKB'de kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 10'deki gibi çizilebilir.



**Şekil 10.** Bulonlu-kaynaklı birleşimlerde kuvvet – yer değiştirme ilişkisi

#### 4.2. Bulonlu- Bulonlu Birleşimlerde Statik Model

Bulonlu-bulonlu birleşimlerde korniyere etkileyen  $P$  tekil yükü (Şekil 11) bir ucu kayıcı ankastre diğer ucu ankastre bir kirişe etkilyormuş gibi düşünülebilir (Şekil 12a) [17]. Buna göre çekme kuvveti altında oluşacak  $\Delta$  yer değiştirmesi (Şekil 8a) bilinen elastik yöntemler kullanılarak

$$\Delta = \frac{Pg_1^3}{24EI} \left\{ \frac{1}{1-0,75g_2/(g_1+g_2)} \right\} \quad (14)$$

olarak yazılabilir. Denklem 14'te  $g_1$ , korniyerin kolon başlığına bulonla bağlandığı koldaki bulon ekseninden  $k$ 'nin farkını göstermektedir;  $I$  için denklem 5 geçerlidir. Doğrusal davranış için başlangıç rijitliği  $K_0 = P/\Delta$  olarak yazılarak

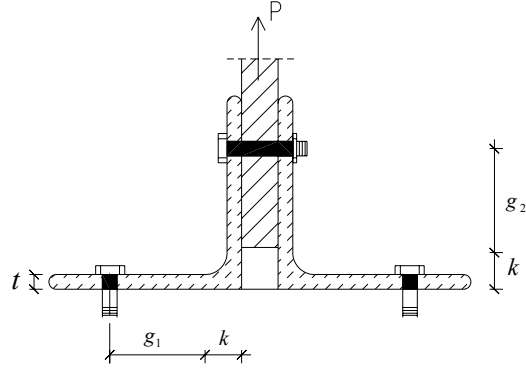
$$K_0 = \frac{24EI}{g_1^3} \left( 1 - \frac{0,75g_2}{(g_1+g_2)} \right) \quad (15)$$

elde edilebilir. Bulonlu-bulonlu birleşimlerde göçme ilk olarak ankastre mesnette ve sonra da korniyerin iç köşesinde plastik mafsal oluşumuyla meydana gelecektir. Şekil 12b'den,

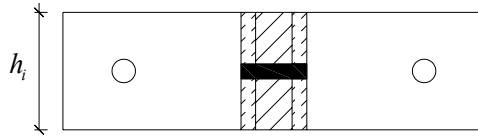
$$P_y = \frac{8g_1+2g_2}{g_1(2g_1+g_2)} M_p \quad (16)$$

ve pekleşme rijitliği

$$K_t = \frac{6EI}{g_1^3} \frac{1}{1+\frac{3g_2}{g_1}} \quad (17)$$

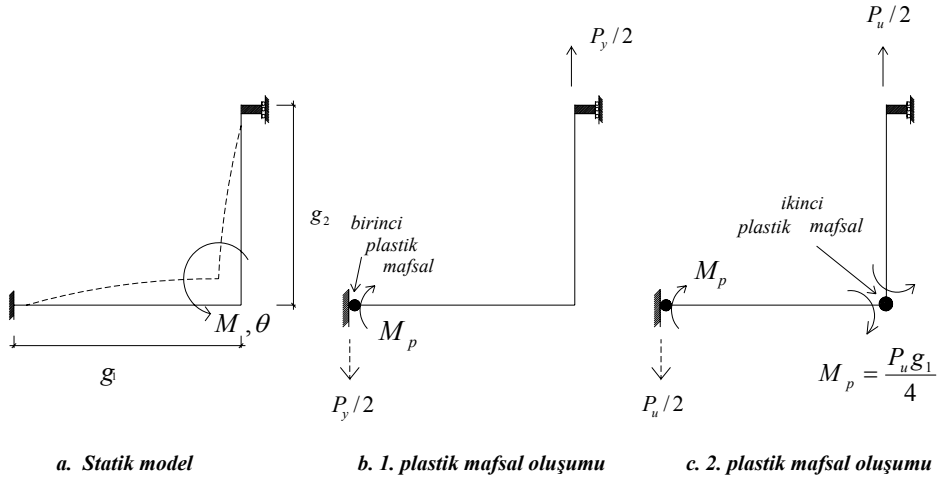


a. Kesit



b. Üst görünüş

Şekil 11. Bulonlu-bulonlu çift korniyerli birleşim



a. Statik model

b. 1. plastik mafsal oluşumu

c. 2. plastik mafsal oluşumu

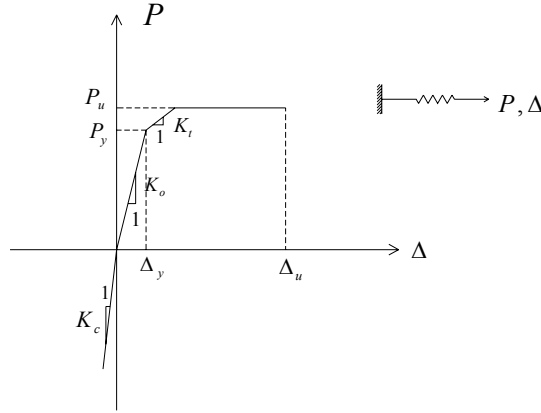
Şekil 12. Bulonlu-bulonlu birleşim modeli ve göçme modları (çekme kuvveti için)

olarak yazılabilir. Şekil 12c'den de,

$$P_u = \frac{4M_p}{g_1} \quad (18)$$

## Modeling of Nonlinear Behavior of Double-Angle ...

yazılabilir. Herhangi bir parçaya etkiyen  $P$  kuvvetinin basınç kuvveti olması durumunda basınç rijitliği,  $K_c$ , denklem 13 ile aynı olacaktır. Bulonlu-bulonlu ÇKB'de kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 13'teki gibi çizilebilir.



Şekil 13. Bulonlu-bulonlu birleşimlerde kuvvet – yer değiştirme ilişkisi

### 4.3. Lif Modeli

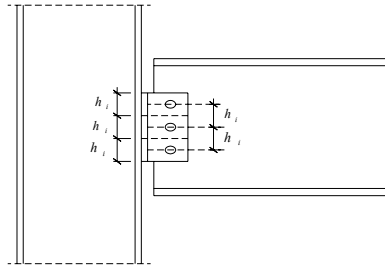
Bu bölümde lif modeli kullanılarak çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimler  $h_i$  yüksekliğindeki parçalara bölünecek (Şekil 14a) ve  $P - \Delta$  model eğrileri (Şekil 14b) yardımıyla  $M - \theta$  eğrileri oluşturulmaya çalışılacaktır.

Birleşim ve şekil değiştirme için lif modelleri sırasıyla Şekil 15a ve b'de verilmiştir. Geometrik özellikler kullanılarak şekil değiştirmeler için aşağıdaki ilişkiler yazılabilir (tüm bağıntılar örnek olması için üç bulonlu-üç lifli bir birleşim modeli üzerinde çıkarılacaktır, bağıntılar istenirse genellenebilir).

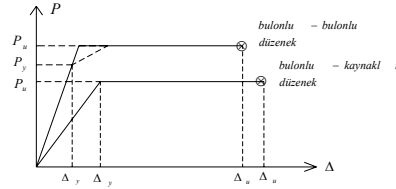
$$\Delta_1 = (y_1 - y_c)\theta \quad (19a)$$

$$\Delta_2 = (y_2 - y_c)\theta \quad (19b)$$

$$\Delta_3 = (y_c)\theta \quad (19c)$$

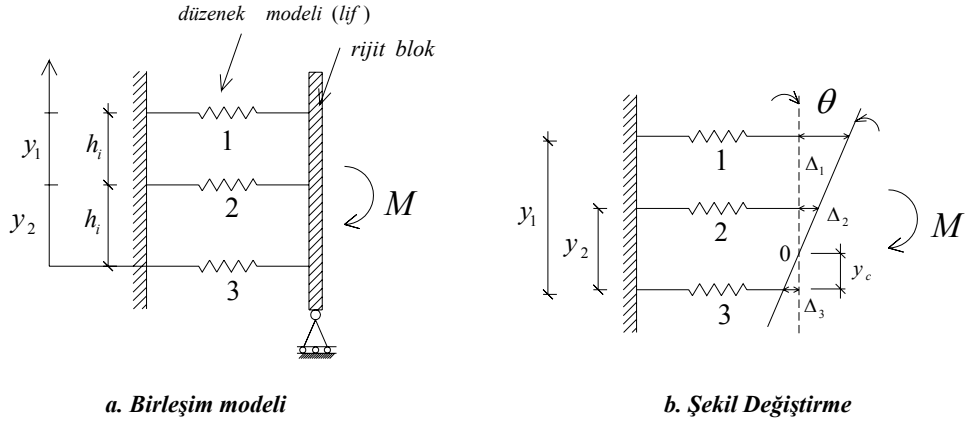


a. Kesme kuvveti aktaran birleşim



b. P-θ eğrileri

Şekil 14. Çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşim ve yaklaşık P-Δ eğrileri



Şekil 15. Lif modeli

Denklem 19 doğrusal, doğrusal olmayan ve artımsal durumlar için geçerlidir.  $M - \theta$  eğrisinin oluşturulması için adım adım yaklaşım yöntemi izlenebilir. Doğrusal olmayan analiz için adım adım yaklaşım, doğrusal olmayan analizi çok adımlı doğrusal analize (adımlar arası doğrusallaştırmaya) dönüştürür. Lifler değişik kuvvet seviyelerinde akabilirler. Herhangi bir lifteki akmaya *olay* adı verilir ve her *olayın* meydana gelişinde birleşimin rijitliği de değişir. İki olay arasında doğrusal analiz yapılır ve olayların ne zaman meydana geleceğine adım adım yaklaşımla karar verilir.

a) Tüm liflerin doğrusal olması durumu:

Bu durumda yaylardaki aksenal kuvvetler (Şekil 16a),

$$P_1 = K_0 \Delta_1 = K_0 (y_1 - y_c) \theta \quad (20a)$$

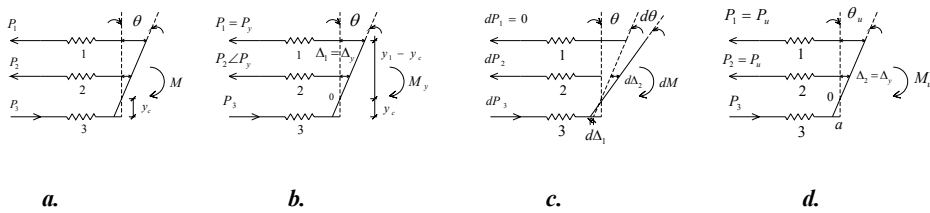
$$P_2 = K_0 \Delta_2 = K_0 (y_2 - y_c) \theta \quad (20b)$$

$$P_3 = K_c \Delta_3 = K_c y_c \theta \quad (20c)$$

yazılabilir.  $\sum F_x = 0$  'dan;

$$y_c = \frac{y_1 + y_2}{2 + \frac{K_c}{K_0}} \quad (21)$$

bulunur.  $\sum M_0 = 0$  için ise;



Şekil 16. Lif kuvvetleri

**Modeling of Nonlinear Behavior of Double-Angle ...**

$$M = K_{\theta}\theta \quad (22)$$

ve

$$K_{\theta} = K_0 \left\{ (y_1 - y_c)^2 + (y_2 - y_c)^2 + \frac{K_c}{K_0} y_c^2 \right\} \quad (23)$$

yazılabilir.

b)  $M = M_y$  olması durumunda 1. lifin akması:

Bu durumda 1. lifteki yay kuvveti (Şekil 16b);

$$P_1 = P_u = K_0 \Delta_y = K_0 (y_1 - y_c) \theta \quad (24)$$

olacaktır. Buna göre

$$\theta_y = \frac{\Delta_y}{(y_1 - y_c)} = \frac{P_u}{K_0 (y_1 - y_c)} \quad (25)$$

ve

$$M_y = K_{\theta} \theta_y = \frac{K_{\theta}}{K_0} \frac{P_u}{y_1 - y_c} \quad (26)$$

yazılabilir.

c) 1.lif aktuktan sonraki rijitlik,  $K_{\theta}^t$  :

Bu durumda artımsal değerler (Şekil 16c);

$$dP_1 = 0 \quad (27a)$$

$$dP_2 = K_0 d\Delta_2 \quad (27b)$$

$$dP_3 = K_c d\Delta_3 \quad (27c)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 27'den,

$$d\Delta_2 = (y_2 - y_c) d\theta \quad (28a)$$

$$d\Delta_3 = (y_c) d\theta \quad (28b)$$

yazılabilir.  $\sum F_x = 0$  'dan

$$y_c = \frac{y_2}{1 + K_c / K_0} \quad (29)$$

bulunur.  $\sum M_0 = 0$  'dan

$$dM = K_{\theta}^t d\theta \quad (30)$$

ve

$$K_{\theta}^t = K_0 \left[ (y_2 - y_c)^2 + \frac{K_c}{K_0} y_c^2 \right] \quad (31)$$

ifadeleri elde edilebilir.

d) Çekme kuvveti etkisindeki son lifin akması ve birleşimin maksimum mukavemete erişmesi:

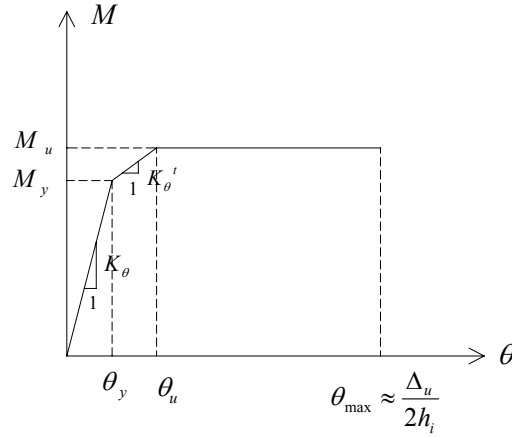
Bu durumda (Şekil 16d)  $P_1 = P_u$  ve  $P_2 = P_u$  için;

$$\theta_u = \frac{\Delta_2}{y_2 - y_c} = \frac{\Delta_y}{y_2 - y_c} = \frac{P_u}{K_0(y_2 - y_c)} \quad (32)$$

olacaktır.  $\sum M_a = 0$  için;

$$M_u = (y_1 + y_2)P_u \quad (33)$$

yazılabilir ve sonuç  $M - \theta$  eğrisi Şekil 17'deki gibi çizilir.



Şekil 17. Moment-dönme ilişkisi

## 5. UYGULAMA ÖRNEĞİ

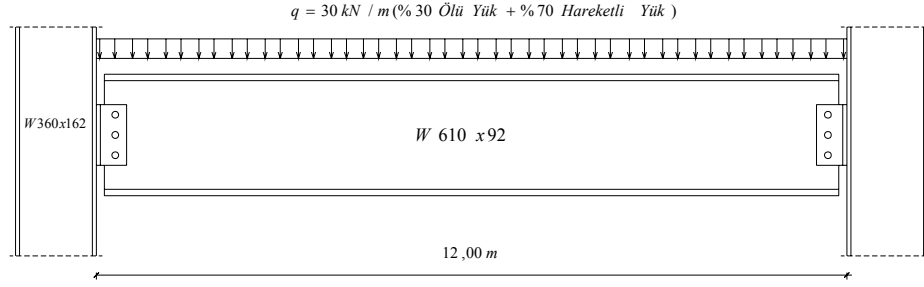
Şekil 18'de verilen  $12.00\text{ m}$  açıklığındaki, kolon boyutu  $W360 \times 162$ , kiriş boyutu  $W610 \times 92$  olan ve üzerinde  $q = 30\text{ kN/m}$ 'lik bir yayılı yük bulunan çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşim LRFD (2000) yönetmeliğine göre boyutlandırılmıştır. Kesem kuvveti aktaran birleşim bulonlu-kaynaklı ve bulonlu-bulonlu olarak detaylandırılmış ve sonuçlar sırasıyla Şekil 19a ve b'de verilmiştir. Bulonlu-kaynaklı birleşimde kullanılan kaynak kalınlığı  $a_{\max} = 7,50\text{ mm}$ , kaynak mukavemeti  $F_{EXX} = 485\text{ MPa}$ 'dır. Her iki birleşimde kullanılan bulonların çapı  $20\text{ mm}$  ve bulon malzemesinin çekme mukavemeti  $F_u^b = 825\text{ MPa}$ 'dır. Çelik sınıfı  $STI(A36)$  ve akma mukavemeti  $F_y = 250\text{ MPa}$  olup bulon cinsi  $A325 - X$ 'dir. Kiriş etkileyen yükün %30'u ölü yükten, %70'i ise hareketli yükten oluşmaktadır.

a) Bulonlu-bulonlu birleşim:

Birleşime ait gerekli ölçüler Şekil 20a'de gösterilmiştir. Buna göre birleşim modeli için  $h_i = 75\text{ mm}$ ,  $y_1 = 150\text{ mm}$ ,  $y_2 = 75\text{ mm}$  (Şekil 15a); korniyer için  $k = 21\text{ mm}$ ,  $g_1 = 56\text{ mm}$ ,  $g_2 = 43\text{ mm}$ ,  $t = t_L = 9.5\text{ mm}$ ;  $I_f = h_i t^3 / 12 = 5359\text{ mm}^4$ ; kolon için  $t_w = 13.30\text{ mm}$ ,  $t_f = 21.80\text{ mm}$ ,  $h = d - 2t_f = 364 - 2(21.80) = 320.4\text{ mm}$ ; kiriş için

## Modeling of Nonlinear Behavior of Double-Angle ...

$I_{kiriş} = 646 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ ;  $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$  'dır. Birleşimin  $M-\theta$  eğrisinin oluşturulmasıyla ilgili hesaplamalar aşağıda sırasıyla gösterilmiştir. Satır sonundaki parentez içindeki numaralar kullanılan denklem numarasını göstermektedir.



Şekil 18. Düzgün yayılı yük etkisi altındaki basit bir kiriş

$$K_0 = \frac{24(2 \times 10^5)(5359)}{56^3} \left( 1 - \frac{0.75(43)}{(43 + 56)} \right) = 98,759 \text{ N/mm} \quad (15)$$

$$M_p = \frac{1}{4} (75)(9.5)^2 250 = 423,047 \text{ Nmm} \quad (11)$$

$$P_y = \frac{8(56) + 2(43)}{56\{2(56) + 43\}} \times 423047 = 26026 \text{ N} \quad (16)$$

$$K_c = \frac{5(2 \times 10^5)(13.30)}{\ln\left(1 + \frac{5(320.4)}{75}\right)} = 4,280,280 \text{ N/mm} \quad (13)$$

$$K_t = \frac{6(2 \times 10^5)(5359)}{56^3} \left( \frac{1}{1 + 3(43)/56} \right) = 11085 \text{ N/mm} \quad (17)$$

$$P_u = \frac{4M_p}{g_1} = \frac{4(423,047)}{56} = 30,218 \text{ N} \quad (18)$$

$$y_c = \frac{150 + 75}{2 + \frac{4,280,280}{98,759}} = 4,96 \text{ mm} \quad (21)$$

$$K_\theta = 98,759 \left[ (150 - 4.96)^2 + (75 - 4.96)^2 + \frac{4,280,280}{98,759} 4.96^2 \right] = 2667 \text{ kNm} \quad (23)$$

$$M_y = \frac{2667}{98,759} \frac{30,218 \times 10^{-3}}{(150 - 4.96) \times 10^{-3}} = 5.62 \text{ kNm} \quad (26)$$

$$K_{\theta}^t = 98,759 \left[ (75 - 4.96)^2 + \frac{4,280,280}{98,759} 4.96^2 \right] = 590 \text{ kNm} \quad (31)$$

$$M_u = (150 + 75)(30,218) = 6.80 \text{ kNm} \quad (33)$$

$$q_u = (1.2 \times 0.30 + 1.6 \times 0.70)(30) = 44.4 \text{ kN/m} \quad (\text{yük katsayılarıyla arttırılmış yayılı yük})$$

$$M_{ankastre} = \frac{1}{12} q_u L^2 = \frac{1}{12} (44.4)(12)^2 = 532.8 \text{ kNm}$$

$$\theta_{basit} = \frac{q_u L^3}{24EI} = \frac{(44.4)(12)^3}{24(2 \times 10^5)(646 \times 10^{-6})} = 0.025 \text{ radyan} \quad \left. \vphantom{\theta_{basit}} \right\} \text{ kiriş çizgisi için}$$

$$V_u = \frac{1}{2} q_u L = \frac{1}{2} (44.4)(12) = 266.4 \text{ kN}$$

$$e_z = \frac{M_u}{V_u} = \frac{6.80}{266.4} = 0.0255 \text{ m} = 25.5 \text{ mm} \quad (\text{eksantrisite})$$

$$\theta_{\max} = \theta_{basit} = 0.025 \text{ radyan}$$

$$\Delta_u = 2h_i \theta_{\max} = 2(75)0.025 = 3.75 \text{ mm}$$

$$\theta_u = \frac{30,218}{98759(75 - 4.96)} = 0.00437 \text{ rad} \quad (32)$$

$$\theta_y = \frac{5.62}{2667} = 0.00211 \text{ rad} \quad (26)$$

Sonuçlar Şekil 21'de gösterilmiştir.

b) *Bulonlu-kaynaklı birleşim:*

Birleşime ait gerekli ölçüler Şekil 20b'da gösterilmiştir. Buna göre birleşim modeli için

$$h_i = 100 \text{ mm}, \quad y_1 = 200 \text{ mm}, \quad y_2 = 100 \text{ mm}; \quad \text{korniyer için } k = 21 \text{ mm}, \quad g_2 = 43 \text{ mm},$$

$$l = 81 \text{ mm}, \quad b = 102 \text{ mm}; \quad \text{birleşim modeli için } I_f = h_i t^3 / 12 = 100(9.5)^3 / 12 = 7145 \text{ mm}^4.$$

Birleşimin  $M-\theta$  eğrisinin oluşturulmasıyla ilgili hesaplamalar aşağıda sırasıyla gösterilmiştir. Satır sonundaki parantez içindeki numaralar kullanılan denklemlerin numaralarını göstermektedir.

$$K_0 = \frac{6(2 \times 10^5)(7145)}{81^3} \left( \frac{1}{1 + 3(43)/81} \right) = 6223 \text{ N/mm} \quad (6)$$

$$K_c = 4,280,280 \text{ N/mm} \quad (13)$$

$$R_i = V_u / 3 = 266.4 / 3 = 88.8 \text{ N}$$

$$F_w = (0.707a)F_{EXX} = 0.707(7.50)485 = 2572 \text{ N/mm}$$

$$P_u = \min \begin{cases} 2(423,047)/81 = 10,446 \text{ N} \\ 2\sqrt{(2572)(100)^2 - 88.8^2} = 10,141 \text{ N} \end{cases} \quad (12)$$



**Modeling of Nonlinear Behavior of Double-Angle ...**

$$y_c = \frac{200 + 100}{2 + \frac{4,280,280}{6223}} = 0.43 \text{ mm} \quad (21)$$

$$K_\theta = 6223 \left[ (200 - 0.43)^2 + (100 - 0.43)^2 + \frac{4,280,280}{6223} 0.43^2 \right] = 310 \text{ kNm} \quad (23)$$

$$M_y = \frac{310}{6223 \times 10^{-3}} \frac{10,446 \times 10^{-3}}{(200 - 0.43)} = 2.61 \text{ kNm} \quad (26)$$

$$K_\theta' = 6223 \left[ (100 - 0.43)^2 + \frac{4,280,280}{6223} 0.43^2 \right] = 61.7 \text{ kNm} \quad (31)$$

$$M_u = (200 + 100) 0,446 = 3.13 \text{ kNm} \quad (33)$$

$$M_{ankastre} = 532.8 \text{ kNm}$$

$$\theta_{basit} = 0.025 \text{ radyan} \quad \left. \vphantom{\theta_{basit}} \right\} \text{ kiriş çizgisi için}$$

$$e_z = \frac{M_u}{V_u} = \frac{3.13}{266.4} = 0.0117 \text{ m} = 11.7 \text{ mm} \quad (\text{eksantrisite})$$

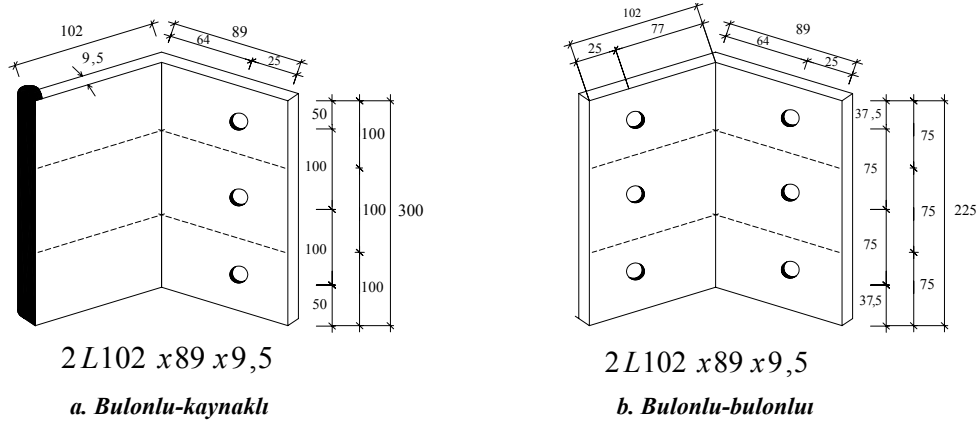
$$\theta_{\max} = \theta_{basit} = 0.025 \text{ rad}$$

$$\Delta_u = 2h_i \theta_{\max} = 2(100)(0.025) = 5 \text{ mm}$$

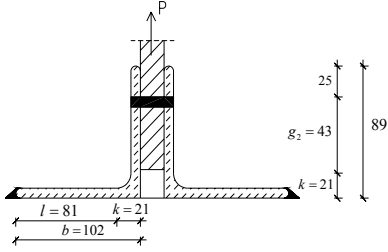
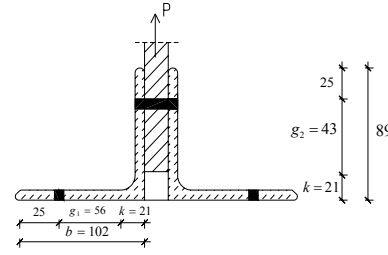
$$\theta_u = \frac{10,446}{6223(100 - 0.43)} = 0.0169 \text{ rad} \quad (32)$$

$$\theta_y = \frac{2.61}{310} = 0.00842 \text{ rad} \quad (26)$$

Sonuçlar Şekil 21'de gösterilmiştir.



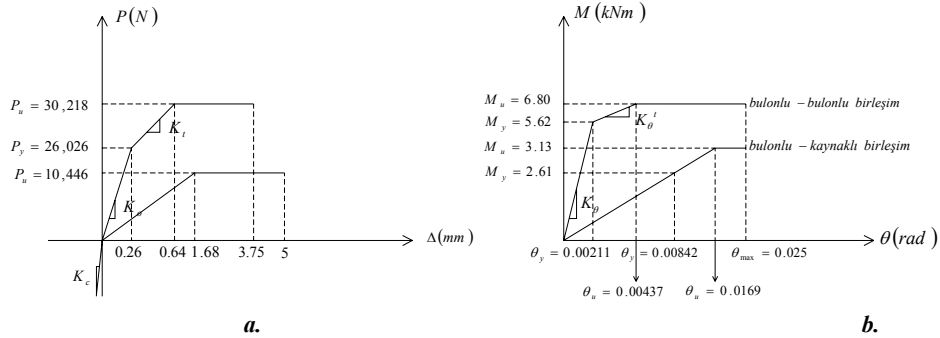
**Şekil 19.** Boyutlandırma



a. Bulonlu-bulonlu

b. Bulonlu-kaynaklı

Şekil 20. Birleşime ait ölçüler



a.

b.

Şekil 21. Lif modeli sonuçları

## 6. SONUÇLAR

Gerek kesme kuvveti aktaran birleşim, gerekse yarı-rijit ve rijit birleşimlerin boyutlandırılmasında ve yapısal analizde (statik ve/veya dinamik) birleşimin özelliklerinin belirlenmesi (rijitliği,  $M-\theta$  eğrisi, vb.) önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimlerin doğrusal olmayan davranışı ve birleşimin özellikleri basitleştirilmiş bir model (lif modeli) yardımıyla elde edilmiştir ve bir uygulama örneği sunulmuştur. Lif modeli sadece çift korniyerli kesme kuvveti aktaran birleşimlere değil diğer kesme kuvveti aktaran birleşim tiplerine de (alın levhalı, T kesitli) kolaylıkla uygulanabilir. Basitleştirilmiş modeller yardımıyla birleşimlerin özelliklerini (kesme kuvveti aktaran, yarı-rijit, rijit) deneye ihtiyaç duymadan yaklaşık olarak belirlemek mümkündür.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, şekillerin çizilmesi ve metnin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı Araş.Gör. Ü.Mert Tuğsal ve F.İlknur Gökçe'ye teşekkürü bir borç bilirler.

## KAYNAKLAR

- [1] Manual of steel construction—load and resistance factor design. American Institute of Steel Construction (AISC), 2000.
- [2] Astaneh-Asl, A., Nader, M.N., and Malik, L., Cyclic Behavior Of Double Web Angle Connections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 115(5), 1101–18, 1989.
- [3] Deren, H., Uzgider, E., ve Piroğlu, F., *Çelik Yapılar, Çağlayan Kitapevi*, 2003.
- [4] Astaneh, A., Liu, J., McMullin, K.M., Behavior and Design of Single Plate Shear Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 58, 1121–1141, 2002.
- [5] Johnson, B. and Green, L., Flexible Welded Angle Connections, *AWS. Weld J* 19(10):402–8, 1940.
- [6] Munse, W.H., Bell, W.G., and Chesson, E., Behavior Of Riveted And Bolted Beam-To-Column Connections, *Journal of Structural Division*, ASCE, 85(ST3), 29–50, 1959.
- [7] Lipson, S.L., Single-Angle Welded-Bolted Connections, In: *Proceedings of the Canadian Structural Engineering Conference*, Toronto, Canada. 139–62, 1968.
- [8] Kennedy, D.J.L., Moment-Rotation Characteristics of Shear Connections, *Engineering Journal*, 105-115, 1969.
- [9] Birkemoe, P.C. and Gilmor, M.I., Behavior of Bearing Critical Double-Angle Beam Connections, *Engineering Journal*, Fourth Quarter, 109-115, 1978.
- [10] Astaneh, A., Call, S.M., McMullin, K.M., Design of Single Plate Shear Connections, *Engineering Journal*, First Quarter, 21-32, 1989.
- [11] Rauscher, T.R. and gerstle, K.H., Reliability of Rotational Behavior of Framing Connections, *Engineering Journal*, First Quarter, 12-19, 1992.
- [12] Yang, J.G., Double Angle Framing Connections Subjected to Shear and Tension, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997
- [18] Liu, J. and Astaneh-Asl, A., Cyclic Testing Of Simple Connections Including Effects Of Slab, *Journal of structural Engineering*, ASCE, 126(1), 32–39, 2000.
- [14] Abolmaali, A., Kukreti, B., Razavi, H., Hysteresis Behavior of Semi-Rigid Double Web Angle Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 1057–1082, 2003.
- [15] Kennedy, J.L., Moment-Rotation Characteristics of Shear Connections, *Engineering Journal*, 106-115, 1969.
- [16] Salmon, C.G. and Johnson, J.E., *Steel Structures: Design and Behavior*, HarperCollins College Publishers, NewYork, 1996.
- [17] Shen, J., *Advanced Steel Structures*, IIT, 2002.
- [18] Jaspert, J.P., General Report: Session on Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 55, 69-89, 2000.
- [19] Lai, S.S., Will, G.T., Otani, S., Model For Inelastic Biaxial Bending, *Journal of Structural Engineering*, 110 (STII), 2563-84, 1984.
- [20] Challa, V.R.M. and Hall, J.F., Earthquake Collapse Analysis of Steel Frames, 23, 1199-1218, 1994.