

Narin Çelik Kirişlere Stabilite Desteği Sağlayan Kayma Diyaframlarının Rijitlik Gereklilikleri

Oğuz Özgür EĞİLMEZ¹
Andaç AKBABA²
Mustafa VARDAROĞLU³

ÖZ

Çelik I-kirişlerin burkulma kapasitesi, noktasal veya sürekli destek elemanları kullanılarak artırılmaktadır. Yapım aşamasında taze betonu taşımak için kiriş uzunluğunca kullanılan trapez sac kalıplar, bir kayma diyaframı gibi davranırlar ve çelik kirişlere sürekli destek sağlarlar. Bir destek elemanının görevini yerine getirebilmesi için yeterli rijitliğe ve dayanıma sahip olması gerekmektedir. Narin gövdeli çelik kirişleri destekleyen kayma diyaframlarının rijitlik gerekliliklerini araştırmak için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Çift ve tek simetri eksenli kesitler incelenmiştir. Kiriş orta açıklığında noktasal destek elemanı bulunduran kirişler de analiz edilmiştir. Narin gövdeli çelik I-kirişleri destekleyen kayma diyaframları için minimum rijitlik gereklilikleri önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayma diyaframı, çelik I-kiriş, sürekli stabilite bağlantısı, minimum rijitlik gerekliliği.

ABSTRACT

Stiffness Requirements for Shear Diaphragms Used for Stability Bracing of Slender Steel Beams

The buckling resistance of steel I-beams can be increased by providing lateral bracing along the length of the beams by either cross-frames or diaphragms. Metal sheeting that is often used in steel buildings and bridge constructions to support the fresh concrete, acts like a shear diaphragm and provides continuous bracing to steel beams. An adequate bracing system must possess sufficient stiffness and strength. A computational study was conducted to investigate stiffness requirements of shear diaphragms used to brace slender steel I-beams. Both double and single symmetrical axis sections were studied. Beams that are braced by cross-frames in addition to diaphragms have also been investigated. Stiffness requirements have been proposed for shear diaphragms used to brace slender steel I-beams.

Keywords: Shear diaphragm, steel beam, continuous bracing, stiffness requirements.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.331522

1 İzmir Ekonomi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ozgur.egilmez@ieu.edu.tr

2 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - andacakbaba@iyte.edu.tr

3 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - mustafavardaroglu@iyte.edu.tr

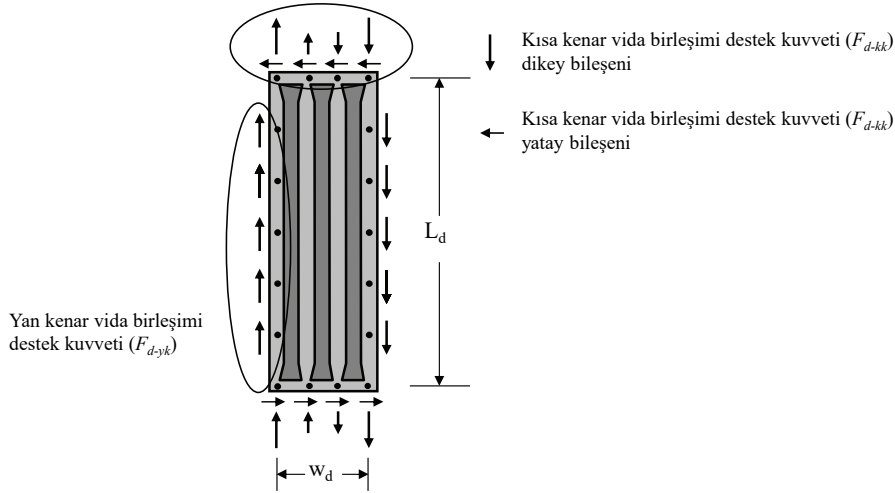
1. GİRİŞ

Çelik I-kirişlerin tasarımında, yapım aşamasında belirleyici olabilecek sınır durumlarından bir tanesi yanal burulmalı burkulmadır. Bu kritik yapım aşamasında, kirişlerin burkulma kapasitesinin artırılması için noktasal veya sürekli destek elemanları ile kirişlerin desteklenmeyen uzunluğunun kısaltılması gereklidir. Çelik bina ve köprü inşaatlarında taze betonu taşıması için sıklıkla kullanılan trapez sac plakalar, kiriş uzunluğu boyunca sürekli bir kayma diyaframı gibi davranırlar ve kompozit etkileşimin başlamadığı çelik kirişlerin üst başlıklarına sürekli bir yanal destek sağlarılar. Çelik bina endüstrisinde, kayma diyaframlarının kiriş üst başlıklarını yanal olarak destekledikleri kabul edilir. Çelik köprü endüstrisinde ise kayma diyaframlarının kirişleri yanal olarak destekledikleri kabul edilmez [3]. Bunun başlıca sebebi trapez sac plakalar ile kiriş üst başlığı bağlantısının eksantrik olmasıdır. Köprü endüstrisinde trapez sac plakalar genellikle, eksantrik olarak üst başlığa kaynaklanan köşebentlere vidalanırlar. Bu eksantriklik ise diyafram destek sitesinin rijitliğini azaltır. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda, basit bir bağlantı modifikasyonu sayesinde eksantrik bağlantının sebep olduğu rijitlik kaybının önüne geçilebildiği görülmüştür [7, 8, 9]. Bu araştırmaların sonuçları Houston'da (Teksas, ABD) üç yüz elliser adet 50 metre serbest açıklıklı ve basit mesnetli çelik kirişten oluşan 2 adet köprü inşaatında uygulanmıştır [10]. Bu uygulama sayesinde 680 adet noktasal destek elemanından tasarruf sağlanmıştır.

Bir destek elemanının deformasyonları ve kuvvetleri kontrol edebilmesi için yeterli rijitliğe ve dayanıma sahip olması gerekmektedir [18, 20]. Kayma diyaframları, diyafram düzlemi içinde yüksek bir rijitliğe ve dayanıma sahiptirler ve bağlandıkları kiriş üst başlığına sürekli bir yanal destek sağlamaktadırlar. Kayma diyaframlarının destek elemanları olarak tasarlanabilmeleri için rijitlik ve dayanım gerekliliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu konudaki çalışmalardan en kapsamlısı Helwig ve Yura [13, 14] tarafından yapılmıştır. Helwig ve Yura [13, 14] yaptıkları bu çalışmada kayma diyaframları tarafından desteklenen ve gövde narinlik oranı 60'tan düşük olan kompakt gövdeli kirişleri irdelemişlerdir. Çalışmada, deformasyon ve destek kuvvetlerinin kontrol edilebilmesi için gerekli olan diyafram rijitliğinin, ideal diyafram rijitliğinin 4 katı olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında, bu çalışmada kayma diyaframlarının kiriş üst başlıklarına bağlandıkları kısa kenar vida birleşimlerinde oluşacak olan destek kuvvetlerinin tahmin edilmesini sağlayan denklemler geliştirilmiştir. Bir kayma diyafram plakasında oluşan vida destek kuvvetleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kayma diyaframlarında iki çeşit vida birleşimi bulunmaktadır: 1) kayma diyaframlarını kiriş üst başlığına bağlayan kısa kenar vida birleşimleri; 2) kayma diyaframlarını birbirlerine bağlayan yan vida birleşimleri. Helwig ve Yura [13, 14], yaptıkları bu çalışmada yan vida birleşimlerinde oluşan destek kuvvetlerinin diyafram rijitliğine ve dayanımına etkilerini incelememişlerdir.

Gövde narinlik oranı 60'tan yüksek olan ve kayma diyaframı ile desteklenen narin kirişlerle ilgili çalışmalar ise daha azdır. Helwig ve Frank [12] kayma diyaframı ile desteklenen narin kirişlerin burkulma momentinin hesaplanması için denklemler önermişlerdir. Ancak yazarların bildiği kadarıyla, narin kirişleri destekleyen kayma diyaframlarının sahip olması gereken rijitlik ve dayanım gereklilikleri ile ilgili bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu çalışmada, basit mesnetli narin I-kirişleri destekleyen kayma diyaframların rijitlik gereksinimleri irdelenmektedir. Çalışmada hem çift simetri eksenli hem de tek simetri eksenli I-enkesitlere yer verilmiştir. Kiriş uzunluk/derinlik oranı (L/d) 10 ve 15 olan kirişler

incelenmiştir. L/d oranı daha yüksek olan kirişler, montaj esnasında genellikle noktasal çapraz veya rijit birleşimli I- ve U-enkesitli destek elemanlarına ihtiyaç duyarlar. Noktasal destek elemanlarının diyafram rijitlik gerekliliğine etkisini araştırmak için L/d oranı 20 ve 30 olan kirişler için de çözümlenmeler yapılmıştır. Bir trapez sac kayma diyaframının rijitliği, sac plakanın ve plakaları kiriş üst başlığına ve birbirlerine bağlayan vida birleşimlerinin rijitliklerine bağlıdır [15, 5]. Bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar modelinde hem diyaframı kiriş üst başlığına bağlayan kısa kenar vida birleşimleri hem de diyaframları birbirlerine bağlayan yan kenar vida birleşimleri modellenmiştir. Böylece her iki vida birleşiminin diyafram destek sisteminin rijitlik gereksinimine etkisi araştırılmıştır. Destek elemanlarında oluşan destek kuvvetleri, destek elemanının rijitliğiyle doğrudan orantılıdır [21]. Bu sebeple, destek elemanlarının dayanım gereklilikleri genellikle belirli bir destek elemanı rijitliğine göre belirlenir. Bu çalışmada elde edilen veriler, daha sonraki bir çalışmada narin kirişleri destekleyen kayma diyaframlarının dayanım gerekliliklerinin hesaplanmasında kullanılacaktır.



Şekil 1. Kayma diyaframı palkasında oluşan vida destek kuvvetleri

Bu makalede ilk olarak önceki çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Ardından, sonlu elemanlar modeli tanıtılacak ve çalışmanın kapsamı hakkında bilgi verilecektir. Çözümleme sonuçları ile diyafram rijitlik gereklilikleri açıklandıktan sonra, makale kısa bir sonuç bölümüyle son bulacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kayma diyaframı ile desteklenmiş kirişlerin burkulma davranışı önceki yıllarda birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. 1970'li yılların ortalarında Errera ve Apparao [11] düzgün yayılı moment etkisi altında olan ve kayma diyaframı ile desteklenmiş kirişlerin burkulma momenti için aşağıdaki enerji tabanlı denklemi önermiştir:

$$M_{cr} = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 EI_y}{L^2} + Q\right) \left(\frac{\pi^2 EC_w}{L^2} + GJ + Qe^2\right)} + Qe \quad (1)$$

Bu denklemde M_{cr} = kayma diyaframı ile desteklenmiş kirişin burkulma momenti (kN/m); E = elastisite modülü (MPa); G = kayma modülü ($kN/m/rad$); I_y = kirişin zayıf eksenini etrafında atalet momenti (mm^4); J = burulma sabiti (mm^4); C_w = çarpılma sabiti (mm^6); L = kirişin desteklenmemiş uzunluğu (mm); Q = kayma diyaframının kayma sıklığı (kN/rad); ve e = kirişin ağırlık merkezi ile kayma diyaframının düzlemi arasındaki mesafedir (mm). Kuvvet bölü birim radyan (kN/rad) birimine sahip olan kayma diyaframı sıklığı, Q , diyafram destek sisteminin etkili kayma rijitliği, β' , ile tek bir kirişi destekleyen diyafram genişliğinin, s_{db} , çarpılması ile hesaplanır. Kayma diyaframı sıklığı, Q , kirişin 1 radyan kayma şekildeğiştirmesine karşı kayma diyaframının gösterdiği direnci ifade etmektedir. Luttrell [15], diyaframlar için kayma gerilmesi-gerinimi ilişkisinin diyafram kalınlığına doğrudan bağlı olmadığını göstermiştir. Bu sebeple, diyafram sıklığının (Q) hesaplamasında, geleneksel kayma rijitliği, β , yerine, etkili kayma rijitliği, β' , kullanılmaktadır. Kayma diyaframlarının etkili kayma rijitliği, β' , deneysel olarak hesaplanabildiği gibi, literatürde bulunan denklemlerin [15, 16] kullanılmasıyla da hesaplanabilmektedir.

Nethercot ve Trahair [17] ile Errera ve Apparao [11] düzgün yayılı moment etkisi altında olan ve kayma diyaframı ile desteklenmiş kirişlerin burkulma momenti için daha basit bir denklem önermişlerdir:

$$M_{cr} = M_g + 2Qe \quad (2)$$

Bu denklemde M_g = kirişin desteklenmemiş uzunluğundaki burkulma momentini ($kN-m$) ifade eder. Diğer parametreler daha önce açıklanmıştır. 1990'lı yılların sonunda Helwig ve Frank [12] yukarıda bahsedilen çalışmaları geliştirerek, değişik eğilme momenti yayılışlarına sahip ve kayma diyaframı ile desteklenmiş kirişlerin burkulma momenti için bir denklem önermişlerdir:

$$M_{cr} = C_b^* M_g + mQd \quad (3)$$

Bu denklemde M_{cr} = kayma diyaframı ile desteklenmiş kirişin burkulma momenti ($kN-m$); C_b^* = yük yüksekliğini de hesaba katan moment düzeltme katsayısı; M_g = kirişin desteklenmeyen uzunluğu kullanılarak elde edilen burkulma momenti ($kN-m$); m = yük konumu sabiti; Q = kayma diyaframının kayma sıklığı ($kN/m/rad$); ve d = kiriş derinliğidir (mm). Bu çalışmada Helwig ve Frank [12] gövde narinlik oranı 96 ve 160 olan kirişleri incelemişlerdir. Helwig ve Frank [12] m sabiti için 0.5 (yükün ağırlık merkezinde uygulandığı durum) ve 0.375 (yükün üst başlıkta uygulandığı durum) değerlerini önermişlerdir. 2000'li yılların sonunda Helwig ve Yura [13], Helwig ve Frank'ın [12] çalışmasını h/t_w oranı 60 olan kirişlere uyarlamışlar ve bu tür kirişler için m değerini yükün

ağırlık merkezinde uygulandığı durum için 0.85, yükün üst başlıkta uygulandığı durum için 0.5 olarak önermişlerdir.

Denklem (2) ve (3) geometrik ön kusuru olmayan düz kirişler için tanımlanmıştır. Bu sebeple, bu denklemleri kullanarak hesap edilecek diyafram rijitliği, ideal diyafram rijitliğini ifade edecektir. İdeal diyafram rijitliği Denklem (3) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\beta'_i = \frac{Q_i}{s_d} = \frac{(M_u - C_b^* M_g)}{m d s_d} \quad (4)$$

$$s_d = \frac{(n-1)s_g}{n} \quad (5)$$

Bu denklemde β'_i = etkili ideal kayma diyafram rijitliğini ($kN/m/rad$); Q_i = ideal diyafram sıklığını (kN/rad); M_u = kiriş uzunluğundaki tasarım momentini ($kN-m$); n = toplam kiriş adetini; s_d = bir kirişi destekleyen diyafram uzunluğu (mm) ve s_g = kirişler arası mesafeyi (mm) ifade eder. Diğer parametreler daha önce açıklanmıştır. Yapısal bir elemanın tasarlanan kapasiteye ulaşmasını sağlayacak destek elemanı rijitliği genel olarak “ideal rijitlik” olarak tanımlanır. Helwig ve Yura [14] h/t_w oranı 60 olan kirişleri destekleyen kayma diyaframlarının rijitlik gerekliliğini hesap etmek için çözümler yapmışlardır. Çalışmalarında, diyaframın “ideal rijitliğini”, kiriş dış lifinde 345 MPa eğilme gerilmesi oluşmasını sağlayacak diyafram rijitliği olarak kabul etmişlerdir. Helwig ve Yura [14] deformasyon ve destek kuvvetlerinin kontrol edilebilmesi için ideal diyafram rijitliğinin 4 katının sağlanmasını önermişlerdir. İdeal rijitliğin 4 katını kullanmak şu denkelemi ortaya çıkarmaktadır:

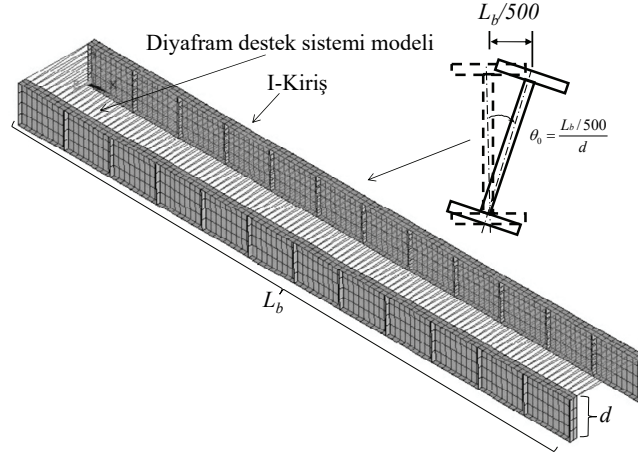
$$\beta'_{br} = 4\beta'_i = 4 \frac{Q_i}{s_d} = 4 \frac{(M_u - C_b^* M_g)}{m d s_d} \quad (6)$$

Bu denklemde G'_{br} = deformasyon ve destek kuvvetlerinin kontrol edilebilmesi için gerekli olan diyafram rijitliği ($kN/m/rad$); M_u = tasarım momenti ($kN-m$); β'_i = M_u 'ya ulaşmak için sağlanması gereken ideal diyafram rijitliği ($kN/m/rad$) (Denklem (4) kullanılarak elde edilir); C_b^* , M_g , m , d , ve s_d daha önce tanımlanmıştır.

3. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Bu çalışmada sayısal çözümler yapmak için ANSYS [1] sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli, Şekil (2)'de gösterildiği gibi üst başlıkları kayma diyaframı ile birbirine bağlanmış ikiz kirişlerden oluşmaktadır. Modelde sadece doğrusal elastik malzeme özelliklerine sahip elemanlar kullanılmıştır. Bu çalışmada kayma

diyaframı ile desteklenmiş kirişlerin yanal stabilitesi, beton dökümü aşamasında, yani gerilmelerin düşük olduğu aşamada incelendiği için doğrusal olmayan malzeme özelliği içeren elemanlar modelde kullanılmamıştır. Çelik kirişler ve gövdelerde kullanılan berkitme levhaları 8-düğüm noktalı plaka elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Başlıklarda iki, gövdelerde ise dört eleman kullanılmıştır. Elemanların en/boy oranı 1.2 ile 2.9 arasında değişmektedir. Kirişler basit mesnetlidir ve mesnetler düzlem dışı harekete izin vermeyecek şekilde yaratılmıştır. Kirişlere Şekil (2)'de gösterilen bir ön kusur tanımlanmıştır. Bunun sebebi, geometrik ön kusurların, destek kuvvetlerinin sayısal değerinde önemli bir rol oynamalarıdır. Wang ve Helwig [19], noktasal (örnek: çaprazlı stabilite bağlantısı) ve sürekli (örnek: diyafram) destek elemanları ile desteklenmiş kirişlerde oluşan destek kuvvetleri sayısal değerinin, kirişin geometrik ön koşulunun Şekil (2)'deki gibi olması durumunda en yüksek seviyeye ulaştığını göstermişlerdir. Şekil (2)'de gösterilen L_b , diyaframsız kirişin mesnetler arası uzunluğunu ifade etmektedir.

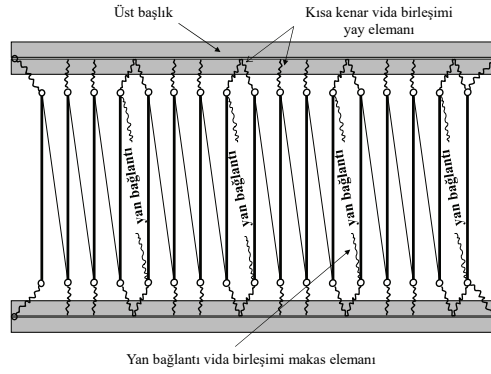


Şekil 2. Sonlu elemanlar modeli ve kiriş ön kusuru

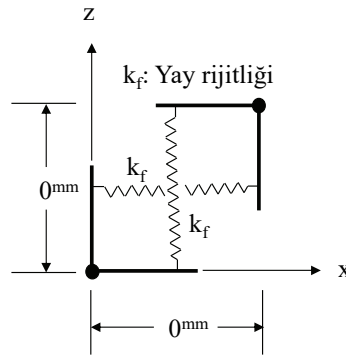
Kayma diyaframı modeli, Davies ve Bryan'ın (1982) düzlem içi yüklerin diyafram rijitliğine ve dayanımına etkilerini araştıran bir çalışmalarından alınmıştır. Bu çalışmada Davies ve Bryan (1982) kayma diyaframını, Şekil (3)'de gösterildiği gibi birbirine bağlanmış küçük makas sistemlerinden oluşturmuşlardır. Şekil (3)'de gösterilen her bir küçük makas dört adet dikey ve üç adet çapraz makas elemanından oluşmuştur. Dikey makas elemanlarının rijitliği çok yüksek tanımlanmış ve böylece bu dikey elemanların sistem rijitliğini etkilemeleri önlenmiştir. Diyafram sisteminin rijitliği ise çapraz makas elemanların rijitliği ile diyaframları üst başlığa ve birbirlerine bağlayan vida birleşimlerinin rijitlikleriyle belirlenmiştir. Diyaframın her bir dikey makas elemanı kiriş üst başlığına, diyafram-kiriş üst başlık vida bağlantısını temsil eden ve Şekil (4)'de gösterilen boyutsuz yay elemanları aracılığı ile bağlanmıştır. Bu yay elemanları, düzlem içindeki her iki yönde de aynı rijitliğe sahiptirler. Diyafram-kiriş üst başlığı birleşimi, genellikle 6 mm çapında vidalar ile birleştirilir. Yay elemanlarının rijitlik değeri, benzer bağlantıların rijitliklerinin

tanımlandığı bir çalışmadan alınmıştır [16]. Bu yay elemanları Şekil (3)'de boyutlu gibi görülmektedir. Ancak bu gösterim sadece okuyucuya görsel kolaylık sağlamak için yapılmıştır. Bu yaylar modelde boyutsuzdur. Kirişlerin uçlarında (mesnet bölgeleri), diyafram plakaları genellikle bir kirişi diğer kirişe bağlayan rijit birleşimli I- veya U-enkesitli destek elemanlarına bağlanırlar. Bu vida bağlantıları da yine boyutsuz yay elemanları kullanılarak modele yansıtılmıştır.

Diyafram plakaları, montaj esnasında yanlardan birbirlerinin üzerine bindirilirlir ve yine 6 mm çapında metal birleştirme vidaları ile birbirlerine vidalanırlar. Bu yan kenar birleşimlerinin rijitliği de Şekil (3)'de görülen yan birleşim makas elemanı kullanılarak modellenmiştir. Bu yan birleşim makas elemanları Şekil (3)'de çapraz gözükmemektedir. Ancak gerçekte, bu makas elemanları iki kiriş arasında dikey olarak yerleştirilmişlerdir. Makas elemanın bir ucu bir diyaframa bağlanmışken, diğer ucu diğer diyaframa bağlanmıştır. Bu yan birleşim makas elemanlarının rijitliği, birleşimde kullanılan toplam vida birleşimlerinin rijitliklerinin toplamına eşittir. Bir adet yan vida birleşimi rijitliği, yine benzer vida birleşimlerinin rijitliğini veren çalışmalardan alınmıştır [16].



Şekil 3. Diyafram destek sisteminin sonlu elemanlar modeli



Şekil 4. Vida bağlantıları sonlu elemanlar modeli

Bugün piyasada, değişik uzunluk ve genişlikte birçok trapez sac plaka (diyafram plakası) mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan diyafram modeli, herhangi bir tip diyafram plakasını temsil etmemektedir. Ancak modellenen diyafram plakaları, bina ve köprü inşaatlarında sıklıkla kullanılan diyafram tiplerine benzer şekilde, kiriş üst başlığına 4 adet vida ile bağlanmışlardır. Diyafram yanlarında ise beşer adet yan vida birleşimi olduğu varsayılmıştır. Kayma diyaframıyla desteklenen kirişlerin burkulma kapasitesi, diyafram destek sisteminin toplam rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Denklem (3)'de kullanılan Q (diyafram sıklığı) değeri, daha önce belirtildiği gibi diyafram destek sisteminin etkili kayma rijitliği (β') ile tek bir kirişi destekleyen diyafram genişliğinin (s_d) çarpılması ile hesaplanır. Bir diyafram destek sistemi, diyafram plakasının kendisi, diyaframın kiriş üst başlıklarına bağlandığı kısa kenar vida birleşimi ve diyaframların yanlardan birbirlerine bağlandıkları yan kenar vida birleşimlerinden oluşur. Bina ve köprü tasarımcıları, bu çalışma sonuçlarını kullanarak elde edecekleri gerekli diyafram destek sistemi rijitliğini (β'_{br}) sağlayacak diyafram destek sistemini (diyafram plakası tipi, diyafram-kiriş üst başlık bağlantı vida sayısı ve yan vida birleşimi sayısı), literatürdeki deney sonuçlarını [15] veya önerilen denklemleri [16, 5] kullanarak belirleyebileceklerdir.

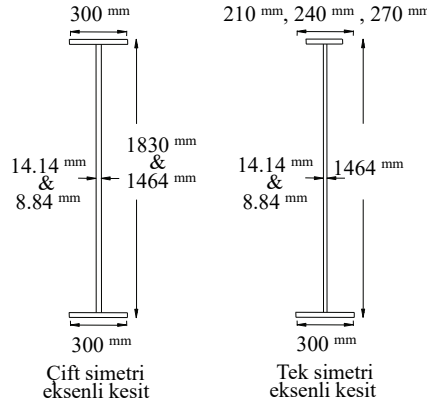
Yukarıda açıklanan sonlu elemanlar modelinin doğrulaması Eğilmez ve Alkan'ın [6] çalışmasında ayrıntılı olarak verilmiştir. Modelin kendisi ve doğrulaması ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler Eğilmez ve Alkan'ın [6] çalışmasından elde edilebilir.

4. ÇALIŞMAYA GENEL BAKIŞ

Bu çalışmada dört adet çift simetri eksenli ve altı adet tek simetri eksenli kesit incelenmiştir. İncelenen bu kesitler Şekil 5'de gösterilmiştir. Kesitlerin gövde narinlik oranları (h/t_w) 100 ve 160'dır. Çift simetri eksenli kesitler, h/t_w oranlarına (100 veya 160) ve derinliklerine (#1: $d = 1464$ mm, #2: $d = 1830$ mm) göre isimlendirilmişlerdir: ÇS-100 #1 ve #2 ile ÇS-160 #1 ve #2. Çift simetri eksenli kirişlerin başlık narinlik (b/t_f) oranı 6, başlık genişliği 300 milimetredir. Tek simetrik kesitler ise h/t_w (100 veya 160) ve mono-simetri (I_{yc}/I_y [Basınç başlığının y-eksenine göre atalet momentinin kesitin y-eksenine göre atalet momentine oranı] = 0.19, 0.29 ve 0.39) oranlarına göre isimlendirilmişlerdir: TS-100 #19, #29 ve #39 ve TS-160 #19, #29 ve #39. AASHTO LRFD [3] tek simetrik kirişlerde I_{yc}/I_y oranının 0.1 ve 0.9 arasında olmasını şart koşmaktadır. Tek simetrik kirişlerde tek bir derinlik incelenmiştir: $d = 1464$ mm. Daha yüksek derinliklere sahip tek simetrik kirişler, kendi ağırlıklarını taşımakta bile zorlanmakta ve montaj esnasında dahi destek elemanına ihtiyaç duymaktadır. Alt başlık genişliği 300 milimetredir. Üst başlık genişlikleri, istenilen I_{yc}/I_y oranına göre ayarlanmıştır. Her iki başlığın başlık narinlik oranları 6'dır. Kiriş gövdelerinde, gövde kayma burkulmasını önlemek için kiriş uzunluğu boyunca a/h oranı 1 olacak şekilde berkitme levhaları kullanılmıştır.

Kiriş uzunluğunun derinliğine oranı (L/d) 10 ve 15 olan basit mesnetli kirişler incelenmiştir. Bu oranın daha yüksek olduğu basit mesnetli kirişler, kendi ağırlıklarını taşımak için genellikle noktasal çapraz veya rijit birleşimli I- ve U-enkesitli destek elemanlarına ihtiyaç duyarlar. Kiriş orta noktasına bağlanmış noktasal çapraz destek elemanlarının diyafram rijitlik gerekliliğine etkisini araştırmak için L/d oranı 20 ve 30 olan kirişler için de analizler yapılmıştır. Analizlerde tek tip yükleme dikkate alınmıştır: üst başlığa etki eden düzgün yayılı yükleme. Helwig ve Yura [11], üst başlığa etki eden

yüklemelerin, kiriş ağırlık merkezinden etki eden yüklere nazaran daha kritik olduğunu göstermişlerdir.

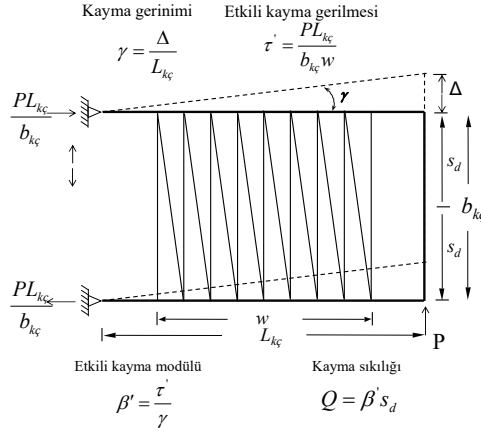


Şekil 5. Çalışmada kullanılan kesitleri

Literatürde, destek elemanı rijitlik gerekliliği genellikle destek elemanı ideal rijitliğinin katları olarak tanımlanmıştır [21, 12]. Daha önce belirtildiği gibi “destek elemanı ideal rijitliği”, desteklenen elemanın hedeflenen dayanıma ulaşması için sağlanması gereken rijitliği tarif eder. Ancak, ideal rijitliğe sahip destek elemanı tarafından desteklenen yapı elemanında yüksek deformasyonlar ve destek kuvvetleri oluşur. Bu yüksek deformasyon ve destek kuvvetlerini azaltmak için, ideal rijitlikten daha yüksek rijitliğe sahip bir destek elemanının kullanılması gerekmektedir. Daha önceki çalışmalarda ve çelik yapı şartnamelerinde [21, 12, 2], deformasyon ve destek kuvvetlerini kabul edilebilir değerlere indirmek için gerekli destek elemanı rijitliğinin, desteklenen yapı elemanına ve destek tipine bağlı olmak üzere ideal rijitliğin iki veya dört katı olması önerilmiştir. Bu “kabul edilebilir değerler”in ne olduğu göreceli bir konu olsa da, hedeflenen dayanımda yapı elemanında oluşacak deformasyonu ön kusurun iki ile dört katı arasında sınırlamaya yetecek destek elemanı rijitliğinin, destek kuvvetlerini de yeteri derecede azaltacağını belirten çalışmalar mevcuttur [21, 12].

Bu çalışmada, kirişlerin yapım aşamasında tasarlanacağı tasarım momentinin kiriş dış lifinde 210 MPa eğilme gerilmesi oluşturacak moment olduğu kabul edilmiştir. 210 MPa eğilme gerilmesi değeri her ne kadar göreceli bir değer olsa da, akma gerilmesi 345 MPa olan kirişler için, yapım aşamasında oluşabilecek gerilmelerin üst sınırında bir değerdir. Bu kabulün neticesinde, bu çalışmada kayma diyaframı “ideal rijitliği”, kiriş dış lifinde 210 MPa eğilme gerilmesi oluşmasını sağlayacak diyafram rijitliğini ifade etmektedir. Çalışmada incelenen her bir kesit için öncelikle burkulma analizi yapılmıştır. Burkulma analizlerinin amacı, diyafram çapraz makas elemanlarının alanının, kirişin, kiriş dış lifinde 210 MPa eğilme gerilmesi yaratacak düzgün yayılı yük altında burkulmasını sağlayacak şekilde kalibre edilmesini sağlamaktır. Bu alan belirlendikten sonra, Şekil 6’da gösterilen konsol çerçeve sonlu elemanlar modeli kullanılarak bu alanın ifade ettiği kayma diyaframı

ideal sıklığı belirlenmiştir. Şekilde gösterilen kayma diyaframı modeli, ikiz kiriş sonlu elemanlar modelinde kullanılan kayma diyaframı modelinin aynısıdır. Konsol çerçeve modelinde, diyafram çapraz makas elemanı kesit alanı olarak ikiz kiriş burkulma analiziyle belirlenen alan kullanılmıştır. Konsol çerçeveye birim bir yük uygulanmış ve çerçevede oluşan deformasyon değeri (Δ) elde edilmiştir. Ardından, Şekil 6'da belirtilen denklemler kullanılarak diyafram ideal sıklığı hesap edilmiştir. Kayma diyaframı ideal sıklığı belirlendikten sonra bu sıklığın iki, üç, dört ve beş katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş ikiz kirişlerin ön kusurların hesaba katıldığı ve yükün kademeli olarak artırıldığı çözümlenmeler yapılmıştır. Çözümlenmelerde tasarım yükü 12 adımda kirişlere uygulanmıştır. Her bir adım için kiriş ortasındaki dönme miktarı (θ) ile kısa kenar ve yan kenar vida birleşim destek kuvvetleri hesaplanmıştır. Sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

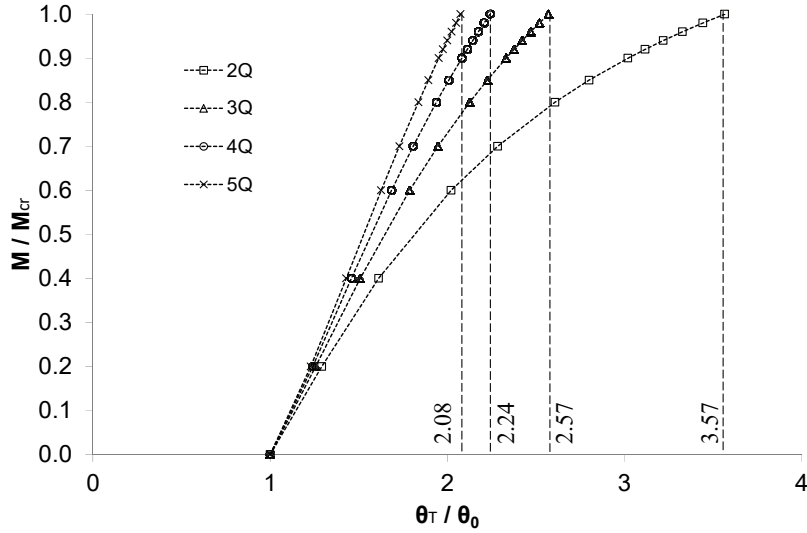


Şekil 6. Konsol çerçeve sonlu elemanlar modeli

5. ÇÖZÜMLEME SONUÇLARI

5.1. Çift Simetri Eksenli Kirişler

Sonlu elemanlar analiz sonuçları çift simetri eksenli kirişler için hem grafiksel hem de tablo olarak verilmiştir. Şekil 7'de, L/d oranı 10 olan ÇS-100 #1 kirişi için normalize edilmiş orta açıklık momenti ile normalize edilmiş orta açıklık dönmesinin ilişkisi gösterilmektedir. Dikey ekseninde belirtilen normalize edilmiş orta açıklık momenti (M/M_u), her bir yük adımındaki orta açıklık momentinin (M) tasarım momentine (M_u) bölünmesiyle elde edilmiştir. Yatay ekseninde belirtilen normalize edilmiş orta açıklık dönmesi (θ_{top}/θ_0) ise her bir yük adımındaki toplam orta açıklık dönme değerinin ($\theta_{top} = \theta + \theta_0$) orta açıklık ön kusur dönme değerine ($\theta_0 = [(L_b/500)/d]$) bölünmesiyle elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kayma diyaframı ideal sıklığının iki katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş kirişin, tasarım momenti seviyesindeki ($M/M_u = 1.0$) normalize edilmiş toplam dönme değeri 3.57'dir. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 3, 4 ve 5 katına çıkarıldığında, tasarım momenti seviyesindeki normalize edilmiş toplam dönme değerleri 2.57, 2.24 ve 2.08'e düşmüştür.



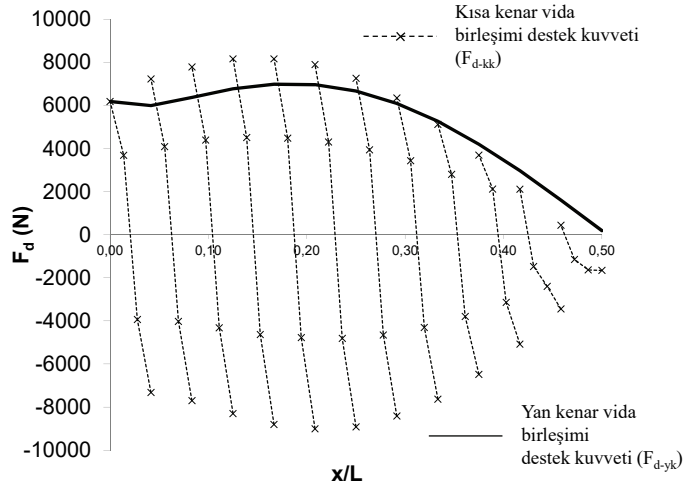
Şekil 7. L/d oranı 10 olan ÇS-100 #1 kirişi için normalize edilmiş moment - normalize edilmiş dönme eğrisi

Çift simetri eksenli kirişlerin tümü için elde edilmiş sonlu elemanlar çözümleme sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1, harflerle isimlendirilmiş 15 kolona bölünmüştür. İlk kolon olan (a) kolonunda kesitin ismi yer almaktadır. Sonraki iki kolon ((b) ve (c) kolonları) kesitin özelliklerini ve L/d oranlarını içermektedir. Kayma diyaframı ideal sıklığının 2, 3, 4 ve 5 katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş kirişlerde oluşan normalize edilmiş dönme değerleri (d), (e), (f) ve (g) kolonlarında verilmiştir. Aynı diyafram sıklıklarında, diyaframın kısa kenar vida birleşimlerinde oluşan destek kuvvetleri (F_{d-kk}) sırasıyla (h), (i), (j) ve (k) kolonlarında; diyaframın yan kenarında oluşan yan vida birleşimi destek kuvvetleri (F_{d-yk}) ise sırasıyla (l), (m), (n) ve (o) kolonlarında verilmiştir. Tablo 1’de görüldüğü gibi kayma diyaframı ideal sıklığının 2 katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş çift simetri eksenli kirişlerde oluşan normalize edilmiş dönme değerleri 4.74 ile 3.57 arasında değişmektedir. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 3 katına çıkarıldığında normalize edilmiş dönme değerleri ortalama %28.5 düşmektedir. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 4 katına çıkarıldığında, normalize edilmiş dönme değerleri $3Q_i$ sıklığındaki normalize edilmiş dönme değerlerine göre ortalama %13; 5 katına çıkarıldığında, normalize edilmiş dönme değerleri $4Q_i$ değerlerine göre ortalama %7 düşmektedir. Örneğin L/d oranı 15 olan ÇS-160 #1 kirişi için normalize edilmiş dönme değerleri, ideal diyafram sıklığının 2, 3, 4 ve 5 katı sıklığa sahip diyaframlar için sırasıyla 4.22, 2.98, 2.59 ve 2.40’dır. Bu değerler normalize edilmiş dönme değerlerinde %29, %13 ve %7’lik azalmalara karşılık gelmektedir.

Daha önce belirtildiği gibi, bir destek elemanı sadece deformasyonları kontrol etmek için değil, aynı zamanda destek kuvvetlerini kontrol etmek için de yeterli sıklığa sahip

olmalıdır. Bir diyafram plakasında oluşan destek kuvvetleri Şekil 1’de gösterilmişti. Şekil 1’de görüldüğü gibi bir diyafram plakasında iki çeşit destek kuvveti oluşur: 1) kayma diyaframlarını kiriş üst başlığına bağlayan kısa kenar vida birleşimlerinde oluşan destek kuvvetleri (F_{d-kk}); 2) kayma diyaframlarını birbirlerine bağlayan yan vida birleşimlerinde oluşan destek kuvvetleri (F_{d-yk}). Şekil 1’de görüldüğü gibi diyafram plakasının kısa kenarında hem dikey, hem de yatay yönde destek kuvveti bileşenleri oluşmakta iken, yan kenarında sadece dikey yönde destek kuvveti oluşmaktadır. Diyafram plakasının kısa ve yan kenarında oluşan destek kuvvetlerinin kiriş uzunluğunca dağılımı L/d oranı 10 olan S-100 #1 kirişi için Şekil 8’de gösterilmektedir. Diyafram sıklığı, ideal sıklığın 4 katı olarak alınmıştır. Dikey ekseninde destek kuvveti, yatay ekseninde ise kiriş uzunluğunun yarısı gösterilmektedir. Yatay ekseninde kiriş uzunluğunun yarısının gösterilmesinin sebebi, destek kuvvetlerinin kiriş orta açıklığına göre simetrik olmasıdır. Kesik izgili eğriler kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetlerini, düz çizgili tek eğri ise yan vida birleşimi destek kuvvetlerini göstermektedir. L/d oranı 10 olan S-100 #1 kirişinde toplam 24 diyafram plakası mevcuttur. Şekil 8’de kirişin sadece yarısı gösterildiği için toplam 12 kesik çizgili eğri vardır. Şekil 8’de görülen her bir kesik çizgili eğri, bir diyafram plakasına aittir. Eğrilerin zerindeki “x” işaretleri her bir vida birleşiminde oluşan destek kuvvetini göstermektedir. Daha önce aıklanığı gibi, sonlu elemanlar modelinde kısa kenar vida birleşimleri birbirine dik iki yönde rijitliğe sahip boyutsuz yay elemanlar kullanılarak modellenmişti. Bu modelleme neticesinde, sonlu elemanlar analizlerinden Şekil 1’de kısa kenar birleşimleri için gösterilen dikey ve yatay vida birleşimi destek kuvveti bileşenlerinin değerleri elde edilmiştir. Şekil 8’de gösterilen her bir kısa kenar vida birleşimi destek kuvveti (F_{d-kk}), birleşimde oluşan dikey ve yatay destek kuvveti bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökü hesaplanarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, bir diyafram plakasındaki kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetlerinin en büyüğü ilk ve son vida birleşiminde oluşmaktadır. Kiriş uzunluğunda ise, en büyük destek kuvveti kiriş uzunluğunun dörtte biri civarında oluşmakta ve kiriş ortasına doğru destek kuvvetleri azalmaktadır.

Şekil 8’de gösterilen düz çizgili yan vida birleşimi destek kuvvetleri eğrisindeki “x” işaretleri, diyafram plakalarının birleştikleri her bir kenardaki bir adet yan kenar birleşim vidasında oluşan ortalama destek kuvvetini ifade etmektedir. Her bir kenardaki ortalama destek kuvveti, sonlu elemanlar modelinde yan kenar vida birleşimlerini temsil eden makas elemanında oluşan kuvvetin, toplam vida sayısına (5) bölünmesiyle elde edilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere, her bir kenarda diyafram plakalarının 5 adet vida ile birbirlerine bağlandıkları kabul edilmiştir. Yan vida birleşimi destek kuvvetlerinin kiriş uzunluğu boyunca dağılımı, kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetlerinin kiriş uzunluğunca dağılımına benzer şekilde, yan vida birleşimi destek kuvvetleri de kiriş uzunluğunun dörtte biri civarında en büyük değerine ulaşmakta ve kiriş orta açıklığına doğru azalarak dikkate alınmayacak değgerlere inmektedir. Bu tür bir davranışın başlıca sebebi, kiriş üst başlığında oluşan kayma deformasyonlarının mesnetten çeyrek kiriş uzunluğu mesafede maksimuma ulaşmasıdır. Kiriş orta açıklığı bölgesinde ise kayma deformasyonları oluşmamakta; üst başlık sadece yatay olarak hareket etmektedir.



Şekil 8. L/d oranı 10 olan ÇS-100 #1 kirişi için diyafram plakası kısa ve yan kenar destek kuvvetleri dağılımı ($Q=4Q_i$)

Tüm çift simetri eksenli kesitlerin kısa kenar ve yan kenar destek kuvvetlerinin tasarım momenti seviyesindeki değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’in (h), (i), (j) ve (k) kolonlarında ideal diyafram sıklığının sırasıyla iki, üç, dört ve beş katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş kirişler için kısa kenar destek kuvvetleri, (l), (m), (n) ve (o) kolonlarında ise sırasıyla yan kenar birleşimi destek kuvvetleri değerleri verilmiştir. Tablo 1’de görüldüğü gibi kısa ve yan kenar birleşimi destek kuvvetleri diyaframın sıklığı arttıkça azalmaktadır. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 3 katına çıkarıldığında, kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri, ideal sıklığın iki katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenen kirişlerde oluşan kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetlerine göre ortalama %25.5 azalmaktadır. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 4 katına çıkarıldığında, kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri, $3Q_i$ sıklığındaki destek kuvvetlerine göre ortalama %10.5, 5 katına çıkarıldığında, destek kuvvetleri $4Q_i$ değerlerine göre ortalama %5.5 düşmektedir. Örneğin L/d oranı 15 olan ÇS-160 #1 kirişi için kısa kenar vida birleşimi destek kuvveti değerleri, ideal diyafram sıklığının 2, 3, 4 ve 5 katı sıklığa sahip diyaframlar için sırasıyla 14608, 10738, 9614 ve 8990 N’dur. Bu değerler %26.5, %10.5 ve %6.5’lik azalmalara karşılık gelmektedir.

Gövde narinlik oranı, kiriş derinliği ve L/d oranının orta açıklık dönmesine ve destek kuvvetlerine etkileri de Tablo 1’de gözlenebilmektedir. Gövde narinlik oranının etkilerini gözlemek için L/d oranı 15 ve diyafram sıklığı $3Q_i$ olan ÇS-100 #1 ($d = 1464$, $h/t_w = 100$) ve ÇS-160 #1 ($d = 1464$, $h/t_w = 160$) kirişlerinin normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri ile kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri karşılaştırılacaktır. Belirtilen L/d oranı ve diyafram sıklığına sahip ÇS-100 #1 kirişinin normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri ile kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri sırasıyla 2.87, 11861 N, ve 9212 N’dur. Gövde narinlik oranı 160 olan ÇS-160 #1 kirişinin aynı diyafram

sıklığındaki normalize edilmiş orta açıklık değeri %3.8 artarak 2.98 olmakta, kısa kenar vida birleşimi destek kuvveti %9.5 azalarak 10738 N ve yan kenar vida birleşimi destek kuvveti %8.8 azalarak 8407 N olmaktadır. Diğer kiriş kesitleri ve diyafram sıklıklarında da benzer davranış gözlenmektedir. Gövde narinlik oranı artırıldığında kiriş alt başlığı daha fazla yanal deplasman yapmakta ve kirişin dönme miktarı artmaktadır. Gövde narinlik oranı artınca vida birleşim destek kuvvetlerinin azalmasının sebebi ise, narinlik oranı yüksek olan kirişin burkulmasını sağlamak için, düşük narinlik oranına sahip kirişlerin burkulma yükünden daha düşük yüklere ihtiyaç duyulmasıdır.

Tablo 1. Çift simetri eksenli kirişlerin normalize edilmiş dönme değerleri ve destek kuvvetleri

(a) Kesit	(b) Kesit Özellikleri	(c) L/d	(d)-(g) θ_T/θ_o				(h)-(k) F_{d-kk} (N)				(l)-(o) F_{d-yk} (N)			
			2 <i>Q</i> _{ideal}	3 <i>Q</i> _{ideal}	4 <i>Q</i> _{ideal}	5 <i>Q</i> _{ideal}	2 <i>Q</i> _{ideal}	3 <i>Q</i> _{ideal}	4 <i>Q</i> _{ideal}	5 <i>Q</i> _{ideal}	2 <i>Q</i> _{ideal}	3 <i>Q</i> _{ideal}	4 <i>Q</i> _{ideal}	5 <i>Q</i> _{ideal}
ÇS-100 #1	<i>b_f</i> = 300 mm	10	3,57	2,57	2,24	2,08	13110	9989	8990	8549	10225	7758	6981	6618
	<i>d</i> = 1464 mm	15	3,99	2,87	2,50	2,33	15857	11861	10613	9989	12354	9212	8238	7779
ÇS-160 #1	<i>b_f</i> = 300 mm	10	3,83	2,72	2,36	2,18	12486	9364	8365	7991	9759	7319	6549	6191
	<i>d</i> = 1464 mm	15	4,22	2,98	2,59	2,40	14608	10738	9614	8990	11476	8407	7475	7042
ÇS-100 #2	<i>b_f</i> = 300 mm	10	3,74	2,73	2,39	2,22	17405	13222	11899	11275	13591	10306	9266	8772
	<i>d</i> = 1830 mm	15	4,38	3,13	2,74	2,55	21725	15982	14234	13344	17011	12483	11090	10424
ÇS-160 #2	<i>b_f</i> = 300 mm	10	3,96	2,88	2,52	2,34	15520	11724	10525	9976	12124	9151	8205	7772
	<i>d</i> = 1830 mm	15	4,74	3,30	2,87	2,66	19603	13984	12361	11612	15348	10969	9705	9117

Gövde narinlik oranı ile *L/d* sabit tutulduğunda, derinliği fazla olan kirişlerde oluşan dönme miktarı ve vida birleşimi destek kuvvetleri daha büyüktür. Örneğin *h/t_w* = 100, *L/d* = 15 ve *Q* = 3*Q_i* olan kirişin normalize edilmiş orta açıklık dönme değeri ile kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri sırasıyla 2.87, 11861 N, ve 9212 N'dur. Diyafram sıklığı ve *L/d* oranı sabit tutulup kiriş derinliği artırıldığında (ÇS-100 #2, *d* = 1830 mm) normalize edilmiş orta açıklık değeri %9.1 artarak 3.13 olmakta, kısa kenar vida birleşimi destek kuvveti %34.7 artarak 15982 N ve yan kenar vida birleşimi destek kuvveti %35.5 artarak 12483 N olmaktadır. Kiriş derinliği artırılınca vida birleşim destek kuvvetlerinin artmasının sebebi, derinliği fazla olan kirişin burkulmasını sağlamak için, düşük derinliğe sahip kirişlerin burkulma yükünden daha yüksek yüklere ihtiyaç duyulmasıdır. Gövde narinlik oranı ile derinlik sabit tutulduğunda ise, yüksek *L/d*'ye sahip kirişte dönme miktarının ve vida birleşimi destek kuvvetlerinin daha büyük olduğu gözlenmektedir. Örneğin *h/t_w* = 100, *L/d* = 10, *d* = 1464 mm ve *Q* = 3*Q_i* olan kirişin (ÇS-100 #1, *L/d* = 10) normalize edilmiş orta açıklık dönme değeri ile kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri sırasıyla

9989 N, ve 7758 N'dur. Kiriş uzunluğunun derinliği oranı 15 olan ÇS-100 #1 kirişinde ise normalize edilmiş orta açıklık değeri %11.7 artarak 2.87 olmakta, kısa kenar vida birleşimi destek kuvveti %18.7 artarak 11861 N ve yan kenar vida birleşimi destek kuvveti %18.7 artarak 9212 N olmaktadır. Diğer kiriş kesitleri ve diyafram sıklıklarında da benzer davranış gözlenmektedir.

5.2. Tek Simetri Eksenli Kirişler

Tek simetri eksenli kirişlerin tümü için elde edilmiş sonlu elemanlar çözümleme sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi, tek simetri eksenli kirişlerde sadece derinliği 1464 mm olan kesitler irdelenmiştir. Tablo 2'nin formatı, Tablo 1'in formatının aynısıdır. İlk üç kolon ((a), (b) ve (c)) kesitin ismini, özelliklerini ve L/d oranlarını içermektedir. Sonraki dört kolon ((d), (e), (f) ve (g)) kayma diyaframı ideal sıklığının 2, 3, 4 ve 5 katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş kirişlerde oluşan normalize edilmiş dönme değerlerini içermektedir. Sonraki dört kolon ((h), (i), (j) ve (k)) aynı diyafram sıklıklarında, diyaframın kısa kenar vida birleşimlerinde oluşan destek kuvvetlerini içermektedir. Son dört kolon da ((l), (m), (n) ve (o)) aynı diyafram sıklıklarında diyaframın yan kenarında oluşan yan vida birleşimi destek kuvvetlerini içermektedir. Tablo 2'de görüldüğü gibi kayma diyaframı ideal sıklığının 2 katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş tek simetri eksenli kirişlerde oluşan normalize edilmiş dönme değerleri 4.16 ile 3.24 arasında değişmektedir. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 3 katına çıkarıldığında normalize edilmiş dönme değerleri ortalama %29.1 düşmektedir. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 4 katına çıkarıldığında, normalize edilmiş dönme değerleri $3Q_i$ sıklığındaki normalize edilmiş dönme değerlerine göre ortalama %13.0; 5 katına çıkarıldığında, normalize edilmiş dönme değerleri $4Q_i$ değerlerine göre ortalama %7.3 düşmektedir. Örneğin $h/t_w = 100$, $L/d = 10$, ve $I_{yc}/I_y = 0.29$ olan TS-100 #29 kirişinin normalize edilmiş dönme değerleri, ideal diyafram sıklığının 2, 3, 4 ve 5 katı diyafram sıklığı için sırasıyla 3.33, 2.41, 2.10, ve 1.95'dir. Bu değerler normalize edilmiş dönme değerlerinde %27.6, %12.6 ve %7.2'lik azalmalara karşılık gelmektedir.

Normalize edilmiş orta açıklık dönmelerindeki azalmaya benzer olarak, diyaframın sıklığı artırıldıkça vida birleşim destek kuvvetleri de azalmaktadır. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 3 katına çıkarıldığında kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri ortalama %26.6 düşmektedir. Diyafram sıklığı ideal sıklığın 4 katına çıkarıldığında, kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri $3Q_i$ sıklığındaki kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetlerine göre ortalama %11.1; 5 katına çıkarıldığında, kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri $4Q_i$ değerlerine göre ortalama %5.8 düşmektedir. Örneğin $h/t_w = 100$, $L/d = 10$, ve $I_{yc}/I_y = 0.29$ olan TS-100 #29 kirişinin kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetleri, ideal diyafram sıklığının 2, 3, 4 ve 5 katı diyafram sıklığı için sırasıyla 10675, 8066, 7229 ve 6842 N'dur. Bu değerler kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetlerinde %24.4, %10.4 ve %5.4'lük azalmalara karşılık gelmektedir. Benzer azalma oranları yan vida birleşimi destek kuvvetlerinde de gözlenmektedir.

Tek simetri eksenli kirişlerde de, çift simetri eksenli kirişlere benzer olarak gövde narinlik oranı ve kiriş derinliği sabit tutulup L/d oranı artırılınca normalize edilmiş orta açıklık dönme miktarı ile destek kuvvetleri artmakta; L/d oranı ve kiriş derinliği sabit tutulup gövde narinlik oranı artırıldığında normalize edilmiş orta açıklık dönme miktarı artmakta,

destek kuvvetleri azalmaktadır. Mono-simetri oranının normalize edilmiş orta açıklık dönme değerlerine ve destek kuvvetlerine etkileri de Tablo 2’de incelenebilmektedir. TS-100 #19, #29 ve #39 kirişlerinin $L/d = 10$ ve $Q = 3Q_i$ için normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri sırasıyla 2.34, 2.41 ve 2.50’dir; kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetleri sırasıyla 7254, 8066 ve 9027 N’dur; yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri sırasıyla 5657, 6265 ve 7002 N’dur. Görüldüğü gibi normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri ile kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetleri mono-simetri oranı arttıkça artmaktadır. Bunun sebebi, mono-simetri oranı arttıkça kirişlerin tasarım yüklerinin artmasıdır.

Tablo 2. Çift simetri eksenli kirişlerin normalize edilmiş dönme değerleri ve destek kuvvetleri

(a) Kesit	(b) Kesit Özellikleri	(c) L/d	(d)-(g) θ_T/θ_o				(h)-(k) F_{d-kk} (N)				(l)-(o) F_{d-yk} (N)			
			2Q _{ideal}	3Q _{ideal}	4Q _{ideal}	5Q _{ideal}	2Q _{ideal}	3Q _{ideal}	4Q _{ideal}	5Q _{ideal}	2Q _{ideal}	3Q _{ideal}	4Q _{ideal}	5Q _{ideal}
TS-100 #19	$b_{cf} = 210$ mm $I_{yc}/I_y = 0.19$ $d = 1464$ mm $h/t_w = 100$	10	3,24	2,34	2,05	1,90	9701	7254	6493	6143	7576	5657	5055	4771
		15	3,73	2,66	2,32	2,16	11512	8390	7441	6992	8982	6535	5792	5447
TS-100 #29	$b_{cf} = 240$ mm $I_{yc}/I_y = 0.29$ $d = 1464$ mm $h/t_w = 100$	10	3,33	2,41	2,10	1,95	10675	8066	7229	6842	8319	6265	5616	5312
		15	3,84	2,73	2,38	2,21	12848	9427	8365	7878	10016	7346	6522	6137
TS-100 #39	$b_{cf} = 270$ mm $I_{yc}/I_y = 0.39$ $d = 1464$ mm $h/t_w = 100$	10	3,49	2,50	2,18	2,02	11974	9027	8103	7666	9320	7002	6278	5941
		15	3,96	2,81	2,45	2,28	14409	10600	9427	8877	11246	8259	7353	6920
TS-160 #19	$b_{cf} = 210$ mm $I_{yc}/I_y = 0.19$ $d = 1464$ mm $h/t_w = 160$	10	3,51	2,46	2,13	1,97	8852	6430	5693	5356	6914	5021	4454	4190
		15	4,02	2,77	2,39	2,21	10376	7279	6393	5981	8076	5697	5001	4683
TS-160# 29	$b_{cf} = 240$ mm $I_{yc}/I_y = 0.29$ $d = 1464$ mm $h/t_w = 160$	10	3,57	2,52	2,19	2,03	9801	7229	6443	6068	7657	5636	5015	4731
		15	4,01	2,81	2,44	2,26	11325	8178	7242	6792	8880	6407	5663	5319
TS-160# 39	$b_{cf} = 270$ mm $I_{yc}/I_y = 0.39$ $d = 1464$ mm $h/t_w = 160$	10	3,66	2,61	2,26	2,10	10925	8178	7317	6917	8563	6380	5704	5386
		15	4,16	2,91	2,52	2,34	12985	9402	8328	7829	10171	7353	6515	6116

5.3. Kiriş Uzunluğunca Çapraz Destek Elemanları ile Desteklenmiş Kirişler

Daha önce bahsedildiği gibi çelik I-kirişlerin tasarımında yanal burulmalı burkulma sınır durumu, özellikle uzun kirişlerde belirleyici olabilmektedir. Bu gibi kirişlerin montaj sırasındaki burkulma momentini artırmak için genellikle noktasal destek elemanları kullanılmaktadır. Kayma diyaframı ile desteklenen bu tür kirişlerin davranışının

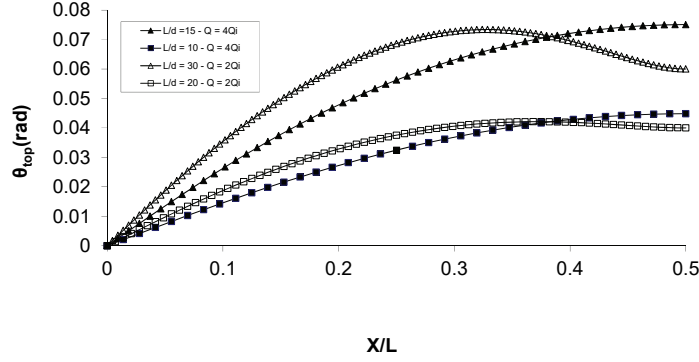
incelenbilmesi için L/d oranları 20 ve 30 olan ve kiriş açıklığının ortasında çapraz destek elemanı bulunduran kirişler analiz edilmiştir. Çapraz noktasal destek elemanları bir kirişin üst başlığını diğer kirişin alt başlığına bağlayan ve rijitliği çok yüksek olan makas elemanlarla modellenmiştir. Analizler tüm kesitler için yapılmış olsa da burada sadece L/d oranları 20 ve 30 olan ÇS-100 #1 kesitinin analiz sonuçları irdelenecektir. Diğer kiriş analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 9'da L/d oranları 10, 15, 20 ve 30 olan ÇS-100 #1 kesitleri için kiriş uzunluğunca tasarım momenti seviyesinde oluşan orta açıklık dönme değerleri gösterilmektedir. Dikey eksen toplam dönme miktarını (θ_{top}), yatay eksen ise normalize edilmiş kiriş uzunluğunu (x/L) göstermektedir. L/d oranı 10 ve 15 olan kirişler için diyafram sıklığı ideal diyafram sıklığının dört katı ($Q = 4Q_i$), L/d oranı 20 ve 30 olan kirişler için diyafram sıklığı ideal diyafram sıklığının iki katı ($Q = 2Q_i$) olarak alınmıştır. Bunun sebebi, aşağıda da açıklandığı gibi, çapraz destek elemanı ile kiriş ortasında desteklenmiş kirişlerde oluşan dönme miktarının, desteksiz kirişlere nazaran çok düşük olmasıdır. Dönme miktarları kiriş ortasına göre simetrik olduğu için şekil sadece kirişlerin yarısına kadar olan ($x/L = 0.5$) dönme miktarlarını gösterilmektedir. Her ne kadar L/d oranları 10, 15, 20 ve 30 olan kirişlerin boyları farklı olsa da, kiriş uzunlukları normalize edildiği için iki kiriş için de aynı şeklin kullanılması mümkün olmaktadır.

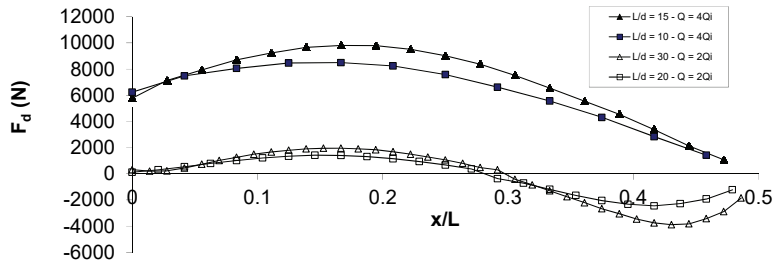
Şekil 9'da görüldüğü gibi, L/d oranı 10 ve 15 olup diyafram sıklığı ideal sıklığın dört katı olan kirişlerde oluşan toplam dönme miktarları sırasıyla yaklaşık 0.045 ve 0.075 radyandır. Bu değerlerin orta açıklık ön kusur dönme değerlerine ($\theta_0 = [(L_b/500)/d]$) bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş toplam dönme değerleri ise sırasıyla 2.24 ve 2.50'dir. Bu değerler Tablo 1'de verilmiştir. L/d oranı 20 olup orta açıklığında çapraz destek elemanı bulunduran ÇS-100 #1 kirişinin uzunluğunda oluşan en yüksek toplam dönme değeri yaklaşık 0.042 radyandır. Bu değer mesnetten uzunluğun yaklaşık %35'i mesafesinde oluşmakta, kiriş orta açıklığına yaklaştıkça düşmekte ve kiriş orta açıklığında 0.04 radyan olmaktadır. Kiriş orta açıklığında, çapraz destek elemanının dönmeyi engellemesi neticesinde, yüklemeler esnasında dönme oluşmamaktadır. Ancak Şekil 9, tasarım momenti seviyesindeki toplam dönme değerlerini gösterdiği için kiriş orta açıklığında ($x/L = 0.5$) toplam dönme değeri sıfır değil, ön kusur dönme değeri olan 0.004 radyana eşittir ($\theta_0 = [(L_b/500)/d]$). Bu kirişte, kiriş uzunluğunca oluşan en yüksek toplam dönme miktarının, bu değerlerin oluştuğu mesafedeki ön kusur dönme değerine bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş en yüksek dönme değeri 1.15'dir. L/d değeri 10 olan ÇS-100 #1 kirişinin uzunluğu 14640 mm'dir. Kiriş uzunluğunun iki katına çıkartılıp açıklık ortasına çapraz destek elemanı yerleştirildiği ÇS-100 #1 kirişinin ($L/d = 20$, $L = 29280$ mm) desteklenmemiş boyu da 14640 mm olmaktadır. L/d oranı 10 olan ÇS-100 #1 kirişinin normalize edilmiş en yüksek dönme değeri 2.24 iken, daha düşük diyafram sıklığına sahip ($Q = 4Q_i$, yerine $Q = 2Q_i$) L/d oranı 20 olan ÇS-100 #1 kirişinin normalize edilmiş en yüksek dönme değeri 1.15'e düşmüştür. L/d oranları 15 ve 30 olan ÇS-100 #1 kirişlerinin en yüksek toplam dönme değerleri sırası ile 0.075 ve 0.073 rad ve normalize edilmiş en yüksek dönme değerleri de sırasıyla 2.50 ve 1.39'dur.

Şekil 10'da L/d oranları 10, 15, 20 ve 30 olan ÇS-100 #1 kesitleri için kiriş uzunluğunca tasarım momenti seviyesinde oluşan kısa kenar destek kuvvetleri gösterilmektedir. Dikey eksen kısa kenar destek kuvvetini (F_{d-kk}), yatay eksen ise normalize edilmiş kiriş uzunluğunu (x/L) göstermektedir. Gösterilen destek kuvvetleri her bir diyafram plakasında

oluşan en yüksek kısa kenar vida birleşim destek kuvvetini ifade etmektedir. Şekil 9'da olduğu gibi L/d oranı 10 ve 15 olan kirişler için diyafram sıklığı ideal diyafram sıklığının dört katı ($Q = 4Q_i$), L/d oranı 20 ve 30 olan kirişler için diyafram sıklığı ideal diyafram sıklığının iki katı ($Q = 2Q_i$) olarak alınmıştır. Destek kuvvetleri kiriş ortasına göre simetrik olduğu için şekil sadece kirişlerin yarısına kadar olan ($x/L = 0.5$) destek kuvvetleri gösterilmektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi desteklenmemiş uzunlukları aynı olan çapraz destek elemanlı ve çapraz destek elemansız kirişlerin destek kuvvetleri arasında önemli bir fark oluşmaktadır. L/d oranı 10 ve 15 olan ÇS-100 #1 kirişlerinde oluşan en yüksek kısa kenar destek kuvvetleri sırasıyla yaklaşık 9800 ve 8490 N'dir. Bu değerler, çapraz destek elemanına sahip L/d oranları 20 ve 30 olan kirişlerde 1950 ve 1920 N'ye düşmektedir. Benzer davranış yan kenar destek kuvvetlerinde de gözlenmiştir. Daha önce belirtildiği gibi, diğer kiriş analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 9. L/d oranı 10, 15, 20 ve 30 olan ÇS-100 #1 kirişleri için toplam dönme dağılımı



Şekil 10. L/d oranı 10, 15, 20 ve 30 olan ÇS-100 #1 kirişleri için diyafram plakası kısa ve yan kenar destek kuvvetleri dağılımı

6. DİYAFRAM RİJİTLİK GEREKLİLİĞİ

Bir önceki bölümde ortaya konan sonuçlar incelendiğinde ideal diyafram sıklığının iki katı sıklığa sahip diyaframlarla desteklenmiş çift ve tek simetri eksenli kirişlerde (kiriş uzunluğunca çapraz veya rijit birleşimli I- ve U-enkesitli destek elemanlarına sahip olmayan kirişler) normalize edilmiş orta açıklık dönme değerlerinin 3.3 ila 4.5 arasında değiştiği görülmektedir. Diyafram sıklığı ideal diyafram sıklığının 3 katına çıkarıldığında (diyafram sıklığının %50 artırılması) normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri çift simetri eksenli kirişlerde %28.5, tek simetri eksenli kirişlerde ortalama %29.1 azalmıştır. Diyafram sıklığı ideal diyafram sıklığının 4 katına çıkarıldığında (diyafram sıklığının %33.3 artırılması) normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri çift simetri eksenli kirişlerde ortalama %12.8, tek simetri eksenli kirişlerde ortalama %13.0 azalmıştır. Diyafram sıklığı ideal diyafram sıklığının 5 katına çıkarıldığında (diyafram sıklığının %25 artırılması) normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri çift simetri eksenli kirişlerde ortalama %7.2, tek simetri eksenli kirişlerde ortalama %7.3 azalmıştır.

Aynı kirişler için kısa ve yan kenar vida birleşimleri destek kuvvetlerinde gözlenen azalma oranları da normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri azalma oranlarıyla benzerlik göstermektedir. Çift simetri eksenli kirişler için kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetlerindeki azalmalar $2Q_i$ 'den $3Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %28.7, $3Q_i$ 'den $4Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %11.2 ve $4Q_i$ 'den $5Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %6.9 olmuştur. Yan kenar vida birleşimi destek kuvvetlerindeki azalmalar $2Q_i$ 'den $3Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %25.6, $3Q_i$ 'den $4Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %10.7 ve $4Q_i$ 'den $5Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %5.6 olmuştur. Tek simetri eksenli kirişler için kısa kenar vida birleşimi destek kuvvetlerindeki azalmalar $2Q_i$ 'den $3Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %27.4, $3Q_i$ 'den $4Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %11.6 ve $4Q_i$ 'den $5Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %6.0 olmuştur. Yan kenar vida birleşimi destek kuvvetlerindeki azalmalar $2Q_i$ 'den $3Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %26.6, $3Q_i$ 'den $4Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %11.1 ve $4Q_i$ 'den $5Q_i$ 'ye çıkıldığında ortalama %5.8 olmuştur.

Görüldüğü gibi diyafram sıklığının $4Q_i$ 'den $5Q_i$ 'ye çıkarıldığında oluşacak %25'lik sıklık artışı neticesinde normalize edilmiş orta açıklık dönme değerleri ile kısa ve yan kenar vida birleşimi destek kuvvetlerinde elde edilecek azalma oranı sadece %7 civarındadır. Bu azalma oranı, tasarımda kullanılacak güvenlik katsayıları ile kompanse edilebilecek bir oran olduğu için kiriş uzunluğu boyunca çapraz veya rijit birleşimli I- ve U-enkesitli destek elemanlarına sahip olmayan kirişler için gerekli diyafram sıklığı, ideal diyafram sıklığının dört katı olması uygun gözükmektedir. Bu durumda, L/d oranı $15'e$, h/t_w oranı $160'a$ ve derinliği 1800 milimetreye kadar olan çift simetri eksenli kirişler ile L/d oranı $15'e$, h/t_w oranı $160'a$ ve derinliği 1450 milimetreye kadar olan tek simetri eksenli kirişlerin dış lifte 210 MPa eğilme gerilmesine ulaşmalarını sağlayacak diyafram rijitliği aşağıda verilmiştir:

$$\beta'_{br} = 4\beta'_i = 4 \frac{(M_u - C_b^* M_g)}{m d s_d} \quad (7)$$

Bu denklemde β'_{br} = deformasyon ve destek kuvvetlerinin kontrol edilebilmesi için gerekli olan diyafram rijitliği; M_u = tasarım momenti; $\beta'_i = M_u$ 'ya ulaşmak için sağlanması gereken

ideal diyafram rijitliği (Denklem (4) kullanılarak elde edilir); C_b^* = yük yüksekliğini de hesaba katan moment düzeltme katsayısı; M_g = destek elemanı tarafından desteklenmemiş kirişin burkulma momenti; m = yük konumu sabiti; d = kiriş derinliği; ve s_d = tek bir kiriş destekleyen diyafram genişliğidir. Denklem nasıl kullanıldığını göstermek için Ek'de örnek bir problem çözülmüştür.

L/d oranları 20 ve 30 olan ve orta açıklıklarında noktasal destek elemanları ile desteklenmiş kirişler incelendiğinde, diyafram sıklılığının ideal diyafram sıklılığının iki katı olduğu durumda dahi dönme ve vida birleşimi destek kuvvetlerinin çok düşük olduğu görülmüştür. Bu sebeple, bu tür kirişler için gerekli diyafram rijitliğinin (β'_{br}), ideal diyafram rijitliğinin (β') iki katı olması uygun gözükmemektedir.

Tasarımcılar, Denklem (7)'de belirtilen rijitliğe sahip bir diyaframı literatürde mevcut olan tabloları veya deney sonuçlarını kullanarak seçebilirler [16, 5, 7]. Denklem (7)'de şu tasarım katsayıları kullanılmalıdır kullanılmamalıdır: (a) Yük ve dayanım katsayıları ile tasarımda $\phi = 0.65$; (b) Güvenlik katsayıları ile tasarımda $\phi = 0.65$ (16, 4).

7. SONUÇ

Kayma diyaframları ile desteklenmiş narin gövdeli kirişlerin yapım aşamasındaki burkulma davranışını incelemek ve diyaframların destek elemanı olarak kullanılmasını sağlayacak rijitlik gerekliliğinin belirlenmesi amacıyla analitik bir çalışma yapılmıştır. Kayma diyaframları, kiriş üst başlıklarına ve birbirlerine basit vida birleşimleriyle bağlanırlar. Sonlu elemanlar modelinde her iki vida birleşimi de modellenmiştir. Çalışmada gövde narinlik oranı 100 ve 160 ve L/d oranı 10, 15, 20 ve 30 olan çift ve tek simetri eksenli kesitlere sahip kirişler incelenmiştir. L/d oranı 20 ve 30 olan kirişlerin orta açıklığına noktasal destek elemanları yerleştirilmiştir. Çift ve tek simetrik kirişlerde L/d oranı arttığında dönme miktarlarının ve vida birleşim destek kuvvetlerinin arttığı, gövde narinlik oranı arttığında ise dönme miktarlarının arttığı ancak vida birleşim destek kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. Tek simetri eksenli kirişlerde mono-simetri oranı arttığında dönme miktarlarının ve vida birleşim destek kuvvetlerinin arttığı gözlenmiştir. Orta açıklığında çapraz destek elemanları ile desteklenmiş ve böylece desteklenmemiş kiriş uzunluğunun kiriş uzunluğunun yarısına indiği kirişlerde dönmeler ve destek kuvvetleri büyük oranda azalmıştır.

Bu çalışmada, kirişlerin yapım aşamasında tasarlanacağı tasarım momentinin kiriş dış lifinde 210 MPa eğilme gerilmesi oluşturacak moment olduğu kabul edilmiştir. Kirişlerin yanal burulmalı burkulma kapasitelerini bu seviyeye çıkarmak için gerekli olan diyafram rijitliğinin, kiriş uzunluğu boyunca noktasal destek elemanlarıyla desteklenmemiş kirişler için ideal diyafram sıklılığının dört katı, desteklenmiş kirişler için ise iki katı olduğu gözlenmiştir.

EK: TASARIM ÖRNEĞİ

Döşeme Sistemi:

8 adet basit mesnetli yapma kirişten oluşmaktadır. Kirişler 12 m uzunluğundadır. Kirişler arası mesafe 2500 mm'dir. Kesit özellikleri: $d = 875$ mm (derinlik), $t_w = 8$ mm (gövde

kalınlığı), $h/t_w = 105$, $b = 150$ mm (başlık genişliği), $t_f = 10$ mm (başlık kalınlığı), $b/2t_f = 7.5$ (başlık narinlik oranı), $J = 22.9 \times 10^4$ mm⁴ (burulma sabiti), $C_w = 10^{12}$ mm⁶ (çarpılma sabiti), $I_y = 5.66 \times 10^6$ mm⁴.

Kiriş uzunluğunca noktasal destek elemanı bulunmamaktadır. Kirişler etki eden yapım aşaması tasarım momenti 446.3 kN-m'dir. Bu tasarım momenti kiriş dış lifinde 210 MPa gerilme oluşturmaktadır.

Yanal Burulmalı Burkulma Kapasitesi Kontrolü:

Her ne kadar kirişin kendi ağırlığı kiriş orta noktasına etki etse de, yükün büyük çoğunluğu (taze beton ve yapım aşaması servis yükleri) kiriş üst başlığına etki etmektedir. Bu durumda yükün tümünün üst başlığa etki ettiği varsayılabilir. Üst başlıktan yükleme sebebiyle, moment düzeltme katsayısı, C_b , yükün etki ettiği yüksekliğe bağlı olarak modifiye edilmelidir: $C_b^* = C_b/1.4$ [22]. Üst başlığa etki eden düzgün yayılı yük için $C_b = 1.14$ olarak kabul edilebilir [22]. Bu durumda, $C_b^* = C_b/1.4 = 0.81$. Kirişin burkulma momenti şu denklemle hesap edilebilir [2]:

$$\phi M_n = \phi C_b^* M_g = \phi C_b^* \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \frac{\pi^2 E^2 C_w I_y}{L_b^2}} = 36.1 \text{ kN-m}$$

Diyafram Destek Elemanı Rijitlik Gerekliliği:

Kullanılacak diyaframın sahip olması gereken gerekli rijitlik, G'_g , Denklem (5) ve (7) kullanılarak hesaplanabilir.

$$s_d = \frac{(n-1)s_g}{n} = \frac{(8-1)2.5}{8} = 2.2 \text{ m}$$

$$\beta'_{br} = 4\beta'_i = 4 \frac{(M_u - \phi C_b^* M_g)}{s_d m d} = 4 \frac{(446.3 - 36.1)}{2.2 \times 0.5 \times 0.875} = 1705 \text{ kN/m/rad}$$

Etkili diyafram rijitliği 1705 kN/m/rad olan bir diyaframa ihtiyaç vardır.

Semboller

- C_b^* Yük yüksekliğini de hesaba katan moment düzeltme katsayısı
- C_w Çarpılma sabiti (mm⁶)
- E Çeliğin elastisite modülü (MPa)
- F_d Diyaframın kenarlarında (kısa veya yan) oluşan vida birleşimi destek kuvveti (N)
- F_{d-kk} Diyaframın kısa kenar vida birleşimlerinde oluşan destek kuvveti (N)
- F_{d-yk} Diyaframın yan kenarındaki vida birleşimlerinde oluşan destek kuvveti (N)

Narin Çelik Kirişlere Stabilite Desteği Sağlayan Kayma Diyaframlarının...

I_y	Kirişin zayıf eksenine etrafında atalet momenti (mm^4)
I_{yc}	Basınç başlığının y-eksenine göre atalet momenti (mm^4)
J	Burulma sabiti (mm^4)
L	Kirişin uzunluğu (m)
L_b	Kirişin desteklenmemiş uzunluğu (m)
$L_{kç}$	Konsol çerçevenin uzunluğu (mm)
M	Yüklemeler neticesinde kiriş orta açıklığında oluşan moment ($kN-m$)
M_{cr}	Kayma diyaframı ile desteklenmiş kirişin burkulma momenti ($kN-m$)
M_g	Kirişin desteklenmemiş uzunluğundaki burkulma momenti ($kN-m$)
M_u	Kiriş uzunluğundaki tasarım momenti ($kN-m$)
P	Konsol çerçeveye etki eden kuvvet (kN)
Q	Kayma diyaframının kayma sıklığı (kN/rad)
Q_i	İdeal diyafram sıklığı (kN/rad)
a	Kiriş boyunca yerleştirilmiş berkitme levhaları arasındaki mesafe (mm)
b	Başlık genişliği (mm)
$b_{kç}$	Konsol çerçevenin genişliği (mm)
d	Kiriş derinliği (mm)
e	kirişin ağırlık merkezi ile kayma diyaframının düzlemi arasındaki mesafe (mm)
h	Hadde profillerinde, ağırlık merkezi ile basınç başlığının iç yüzündeki eğrilik bitim noktası arasındaki uzaklığın iki katı (mm)
m	Yük konumu sabiti
n	Toplam kiriş adedi
s_g	Kirişler arası mesafe (mm)
s_d	Bir kirişi destekleyen diyafram uzunluğu (mm)
t_w	Gövde kalınlığı (mm)
t_f	Başlık kalınlığı (mm)
w	Konsol çerçeveyi destekleyen kayma diyaframının genişliği (mm)
β	Kayma modülü ($kN/m/rad$)
β'	Diyafram destek sisteminin etkili kayma rijitliği ($kN/m/rad$)
β'_{br}	Deformasyon ve destek kuvvetlerinin kontrol edilebilmesi için gerekli olan diyafram rijitliği ($kN/m/rad$)
β'_i	M_u 'ya ulaşmak için sağlanması gereken etkili ideal diyafram rijitliği ($kN/m/rad$)

Δ	Konsol çerçeve deplasmanı (mm)
γ	Konsol çerçevede oluşan kayma gerinimi (rad/rad)
θ	Kiriş orta açıklığında yüklemeler sonucunda oluşan dönme (rad)
θ_0	Kiriş orta açıklığındaki dönme geometrik ön kusuru (rad)
θ_T	Kiriş orta açıklığında oluşan toplam dönme (rad)
τ'	Etkili kayma gerilmesi (kN/m)

Kaynaklar

- [1] ANSYS, *Finite Element Model Users Manual*, (Version 11.0), ANSYS Inc., Canonsburg, Pa, USA, 2007.
- [2] AISC, *Specification for structural steel buildings*, 14th Ed., Chicago, 2010.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) Bridge Design Specifications*, 7th Ed., Washington, D.C., 2014.
- [4] CANAM, *Steel Deck Diaphragm Catalogue*, Boucherville. Davies J.M., Bryan E.R. (1982). *Manual of Stressed Skin Diaphragm Design*, JW&S, NY, USA, 2007.
- [5] Davies J. M., and Bryan E. R., *Manual of Stressed Skin Diaphragm Design*, Wiley Press, 1982.
- [6] Egilmez, O. O. And Alkan, D., “Çelik köprü I-kirişlerine yanal destek sağlayan trapez sac kalıpların mukavemeti,” *Teknik Dergi*, 20, 4891-4904, 2009.
- [7] Egilmez, O. O., Helwig, T., Jetann, C., Lowery, R., “Stiffness and strength of metal bridge deck forms”, *Journal of Bridge Engineering*, 12(4), 429-437, 2007.
- [8] Egilmez, O. O., Herman, R., Helwig, T., “Lateral stiffness of steel bridge I-girders braced by metal deck forms”, *Journal of Bridge Engineering*, 14(1), 17-25, 2009.
- [9] Egilmez, O. O., Helwig, T., Herman, R., “Buckling behavior of steel bridge I-girders braced by permanent metal deck forms”, *Journal of Bridge Eng.*, 17(4), 624-633, 2012.
- [10] Egilmez, O., Helwig, T., and Herman, R., “Using metal deck forms for construction bracing of steel bridges,” *J. Bridge Engrg.*, ASCE, in press, 2016.
- [11] Errera, S. and Apparao, T. (1976), “Design of I-shaped beams with diaphragm bracing”, *Journal of the Structural Division*, 102(4), 769-781.
- [12] Helwig, T. A. and Frank, K. H., “Stiffness requirements for diaphragm bracing of beams”, *Journal of Structural Engineering*, 125(11), 1249-1256, 1999.
- [13] Helwig, T. A. and Yura, J. A. (2008a), “Shear diaphragm bracing of beams. I: Stiffness requirements”, *Journal of Structural Engineering*, 134(3), 348-356.

- [14] Helwig, T. A. and Yura, J. A. (2008b), “Shear diaphragm bracing of beams. II: Design requirements”, *Journal of Structural Engineering*, 134(3), 357-363.
- [15] Luttrell, L. D. & Steel Deck Institute (1981). *Steel Deck Institute diaphragm design manual*, 1st Ed., MO.
- [16] Luttrell, L. D. & Steel Deck Institute (2004). *Steel Deck Institute diaphragm design manual*, 3rd Ed., Canton.
- [17] Nethercot, D. and Trahair, N. (1975), “Design of diaphragm-braced I-beams”, *Journal of the Structural Division*, 101(10), 2045-2061.
- [18] Türkiye Cumhuriyet, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, *Çelik yapıların tasarım ve yapım kuralları*, Ankara, 2016
- [19] Wang, L. and Helwig, Todd A. (2005), “Critical imperfections for beam bracing systems”, *Journal of Structural Engineering*, 131(6), 933-940.
- [20] Winter, G. (1960), “Lateral bracing of columns and beams”, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 125(1), 807–826.
- [21] Yura, J., A. (2001), “Fundamentals of beam bracing”, *Eng. J.*, 38(1), 11-26.
- [22] Ziemian, R., ed. (2110), *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 6th Ed., JW & S, USA.