

ÇELİK I-KİRİŞLERE DESTEK SAĞLAYAN KAYMA DİYAFRAMLARI İÇİN GEREKLİ RİJİTLİK ve MUKAVEMET DEĞERLERİ

¹Mustafa VARDAROĞLU, ²O. Özgür EĞİLMEZ, ³Andaç AKBABA

¹Arş. Gör., İnşaat Mühendisliği Bölümü, İYTE, Urla / İzmir
Tel: +90(232)750 6608, E-mail: mustafavardaroglu@iyte.edu.tr

²Doç. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, İEU, Balçova / İzmir
Tel: +90(232)488 8214, E-mail: ozgur.egilmez@ieu.edu.tr

³İnş. Müh., E-mail: andacakbaba@iyte.edu.tr

Özet

Trapez sac kalıplar (TSK) bina inşaatlarında beton döşeme kalıp sistemi, çatı ve cephe kaplamaları olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Çelik bina ve çelik köprü endüstrisinde TSK kayma diyaframı gibi davranmakta ve bağlı oldukları kiriş boyunca sürekli yanal destek sağlamaktadır. Çelik yapı endüstrisi sac kalıbın düzlem içindeki yüksek kayma rijitliğini gözönüne almakta ve kurulum aşamasında kirişlere sürekli yanal destek kaynağı olarak kullanılmasına izin vermektedir. Çelik köprü endüstrisinde ise kalıp-kiriş bağlantılarındaki göreceli esneklik buna imkan vermemektedir. Sac kalıp – kiriş bağlantısı üzerine yapılan çalışmalar sonucunda önerilen bir iyileştirme sac kalıbın I-kirişlere sürekli destek sağlamasını mümkün kılmıştır. Bu nümerik çalışmanın amacı narin ve narin olmayan I-kesit çelik kirişlerin kayma diyaframları ile sürekli yanal desteklenebilmesi için gerekli ve yeterli diyafram rijitlik ve mukavemet değerinin belirlenmesidir. Çalışma kapsamında iki I-kiriş ve arasında bir kayma diyaframından ibaret olan bir sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Diyafram kayma rijitliği, başlık genişliği, gövde narinlik değeri, gövde derinliği ve olası kalıp-kiriş bağlantı dizilimleri göz önüne alınan değişkenler arasındadır. Analizler sonucunda gerekli diyafram rijitliği, diyafram vida kuvvetlerinin basitçe hesaplanmasına olanak sağlayacak bir denklem önerilecektir.

Giriş

Trapez sac kalıplar (TSK) çelik bina ve çelik köprü inşaatlarında sıklıkla beton döşeme imalatında kullanılmaktadır. Bunun yanında yüksek kayma rijitliği sayesinde TSK'lar kayma diyaframı gibi davranabilmekte ve bağlandıkları kirişlere yanal destek sağlamaktadır. Çelik bina endüstrisinde TSK'lar I-kirişlere doğrudan bağlanabilmekte ve kayma diyaframı olarak modellenip yanal destek sağlamaktadır. Çelik köprü endüstrisinde ise farklı kiriş kamburlukları, başlık kalınlığındaki değişimlerden ötürü TSK, üst başlığa kaynaklanan bir köşebent –destek köşebenti- vasıtasıyla I-kirişlere bağlanmaktadır. Bu bağlantı şekli uygulamada kolaylık sağlamakla birlikte, bağlantı noktasında dış merkezlilik oluşmaktadır. Bu nedenle American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Load and

Resistance Factor Design (LRFD) şartnamesince TSK, I-kirişlere destek elemanı olarak modellenememektedir.

Buna karşılık Egilmez ve diğ. (2007, 2012) tarafından birleşim şekli için önerilen bir iyileştirme sonucunda Houston, TX'daki iki köprü inşaatında TSK'lar I-kirişlere sürekli destek elemanı olarak modellenmiş ve kullanılmıştır (Helwig & Herman, 2010).

Kararlılık destek elemanlarının tasarımında genel yaklaşım, desteklenen kiriş tasarım yüküne ulaşırken oluşacak deplasmanların da kabul edilebilir sınırlar dahilinde tutulmasıdır. Bu doğrultuda yeterli bir destek sistemi gerekli mukavemet ve rijitliğe sahip olmalıdır (Winter, 1960). Kayma diyaframları düzlemleri içerisinde kayma rijitliğine ve mukavemete sahiptir. Kayma diyaframları ile desteklenmiş I-kirişlerin burkulma kapasitesi önceki çalışmalarda (Errera & Apparao, 1976; Nethercot & Trahair, 1975; Helwig & Frank, 1999; Helwig & Yura, 2008a) ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. I-kirişlerde yanal destek kaynağı olarak kayma diyaframlarının mukavemet ve rijitlik ihtiyacını belirlemek için Helwig & Yura (2008a ve 2008b) detaylı bir nümerik bir çalışma yapmıştır. Helwig & Yura (2008a) kayma diyaframları ile desteklenmiş I-kirişlerin burkulma kapasitesi ile ilgili bir denklem önermiş, kayma diyaframı rijitlik ihtiyacını irdelenmiştir. Tamamlayıcı bir çalışma olarak kayma diyaframlarının mukavemet ihtiyacı Helwig & Yura (2008b) çalışmasında incelenmiştir. Helwig & Yura (2008a, 2008b) gövde narinlik oranı 60 tan küçük olan kirişleri göz önüne almıştır.

Bu bildiri de gövde narinlik oranı 60 tan büyük çelik I-kirişleri desteklemek için kullanılan kayma diyaframlarının rijitlik ve mukavemet ihtiyacını ortaya koyabilmek için yapılan nümerik bir çalışmanın sonuçları ortaya konmuştur. Yanal yüklemeye maruz kayma diyaframlarının rijitlik ve mukavemeti üzerine yapılan önceki çalışmalar (Luttrell, 1981; Davies & Bryan, 1982) sonucu diyafram kayma muavemetinin TSK-kiriş arası bağlantılar veya TSK panellerarası bağlantıların mukavemetine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuca dayanarak kayma diyaframlarının rijitliği ve mukavemeti üzerine bir çalışmanın yukarıda bahsi geçen bağlantılarda oluşacak kuvvetleri içermesi gerekliliğine karar verilmiştir. Bu doğrultuda Davies & Bryan (1982) tarafından ortaya konmuş olan kayma diyaframı sonlu elemanlar modeli kullanılarak TSK-kiriş bağlantısı ve kalıplar-arası bağlantılar vidalı olarak modellenmiş, yapılan sonlu elemanlar analizleri ile bahsi geçen bağlantı noktalarındaki kuvvetler doğrudan elde edilmiştir. Bağlantı noktalarının rijitliği vidalı bağlantılara göre ayarlanmış olup; TSK kayma rijitliği, TSK kalınlığı, kalıplararası vida sayısı, I-kiriş başlık genişliği, I-kiriş yüksekliği, gövde narinliği ve kiriş açıklığı yapılan sonlu elemanlar analizlerindeki değişkenlerdir.

Bu bildiri toplam beş bölümden oluşmaktadır. Takip eden bölümde genel bilgi ve önceki çalışmalar yer almaktadır. Devamında sonlu elemanlar modeli, çalışmaya genel bir bakış, sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları bulunmaktadır.

Genel Bilgi ve Önceki Çalışmalar

Kayma diyaframlarının kararlılık destek elemanı olarak göz önüne alınan özelliği kayma rijitliğidir. Kiriş boyunca kayma diyaframının 1 radyan kayma birim şekil değiştirmesi için gerekli olan kuvvet kayma rijitliği, Q olarak adlandırılmaktadır.

Kayma rijitliği, efektif kayma modülü, G' ile etkin diyafram genişliği, s_d -tek bir kirişi destekleyebilen temsili diyafram genişliği- nin çarpımına eşittir. Bu doğrultuda;

$$Q = G' * s_d \quad (1)$$

$$s_d = \left(\frac{n-1}{n} \right) * s_g \quad (2)$$

Burada n , sistemdeki kiriş sayısı, s_g ise kirişler arası açıklıktır. Kayma modülünün literatürdeki açılımı kayma gerilmesinin kayma birim şekil deplasmanına olan oranıdır. Buna karşılık TSK'larda kayma gerilmesi ve birim şekil değiştirme miktarı arasındaki oranın genellikle malzeme kalınlığının doğrusal bir fonksiyonu olmaması sebebiyle (Luttrell, 1981) malzeme kalınlığından bağımsız olarak efektif kayma modülü tanımlanmıştır. Kayma modülü laboratuvar ortamında belirlenebileceği gibi Luttrell (1981) de çeşitli TSK sistemleri için sunulan denklemler yardımıyla da elde edilebilir.

Errera & Apparao (1976) ve Nethercot & Trahair (1975) in kayma diyaframlarının yanal destek kabiliyeti üzerine çalışmaları neticesinde kayma diyaframları ile desteklenmiş, kiriş boyunca düzgün momente maruz çelik I-kirişler için

$$M_{cr} = M_g + 2Qe \quad (3)$$

denklemini önerilmiştir. Burada M_{cr} kayma diyaframları ile desteklenmiş I-kirişin burkulma kapasitesi, M_g desteksiz kirişin burkulma kapasitesi ve e ise kiriş ağırlık merkezi ile kayma diyaframı düzlemi arasındaki mesafedir.

Helwig & Frank (1999), (3) ile verilen kiriş mukavemeti denklemini, düzgün momentin dışında tekil ve düzgün yayılı yüklere maruz narin gövdeli I-kirişler için yük yüksekliği etkisini de hesaba katarak aşağıdaki şekilde genişletmiştir.

$$M_{cr} = C_b^* M_g + mQd \quad (4)$$

Burada C_b^* yük yüksekliğini de yansıtan moment değişim faktörü, d kiriş derinliği ve m ise yük çeşidi ve yük yüksekliğini yansıtan bir katsayıdır.

Çelik I-kirişlerde imalat kusurları, inşa sahasına taşıma, inşaat sırasında veya çevresel koşullardan ötürü bir miktar başlangıç şekil bozukluğu bulunmaktadır. Hiçbir başlangıç şekil değişikliği olmayan diğer bir deyişle kusursuz bir yapısal elemanın istenilen yük seviyesine veya burkulma kapasitesine ulaştırılabilmesi için sürekli bir destek elemanının sahip olması gereken rijitlik değeri ideal rijitlik olarak adlandırılmaktadır (Helwig & Yura, 2008a).

Kusursuz olmayan yapı elemanlarında şekil değişimlerini ve destek elemanında oluşacak kuvvetleri kabul edilebilir aralıklarda tutabilmek için ideal rijitlikten daha büyük rijitliğe sahip destek elemanları gereklidir (Winter, 1960).

(3) ve (4) numaralı denklemler tamamıyla düzgün, hiçbir başlangıç şekil bozukluğu bulundurmeyen kirişler için tanımlandığından; denklemler kayma rijitliği, Q için tekrar çözüldüğünde elde edilecek kayma rijitliği değeri ideal rijitlik kavramına denk gelecektir. Helwig & Frank (1999) in narin gövdeli kirişler için tanımladığı (4) numaralı denklem, Helwig & Yura (2008a) ile narin olmayan kirişlere de uygulanabilecek şekilde genişletilmiştir. Helwig & Yura (2008a, 2008b) gövde narinlik oranı 60'tan -narin olmayan- düşük, kayma diyaframları ile desteklenmiş I-kirişler üzerinde sonlu elemanlar analizleri yapmıştır. Yapılan özdeğer burkulma analizleri ile (4) numaralı denklemde narin olmayan gövdeli I-kirişler için kullanılabilir m katsayıları önerilmiştir. İdeal rijitlik değerleri için yapılan özdeğer burkulma analizlerini takiben başlangıç şekil bozukluğuna sahip çelik I-kirişleri maksimum 345 MPa gerilme oluşturacak yüklemeler altında ideal rijitlik değerinin tam sayı katlarına sahip kayma diyaframları ile destekleyerek gerçek ölçekli burkulma analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda narin gövdeli olmayan çelik I-kirişleri desteklemek için kullanılan kayma diyaframlarının rijitlik ihtiyacı için ideal rijitlik değerinin dört katı önerilmiştir. (4) numaralı denklem (1) numaralı denklem kullanılarak kayma rijitliği, Q için tekrar düzenlendiğinde

$$G'_{gerekli} = 4G'_i = 4 \frac{Q_i}{s_d} = 4 \frac{(M_{cr} - C_b^* M_g)}{m d s_d} \quad (5)$$

(5) numaralı denklemin türetildiği sonlu elemanlar analizlerindeki kirişlerde başlangıç şekil bozukluğu değeri

$$\theta_0 = \left(\frac{L_b}{500d} \right) \quad (6)$$

olarak ifade edilmiştir (Helwig & Yura 2008a, 2008b). (6) numaralı denklemde θ_0 , I-kirişe ait başlangıç kesit dönmesi değeridir. L_b kiriş serbest burkulma boyu olup d ise kiriş derinliğidir. Yapılan gerçek ölçekli burkulma analizleri neticesinde (Helwig & Yura 2008b) narin gövdeli olmayan çelik I-kirişleri desteklemek için kullanılan kayma diyaframlarının mukavemet ihtiyacı için

$$M_{br}' = 0.001 \frac{M_u L}{d^2} \quad (7)$$

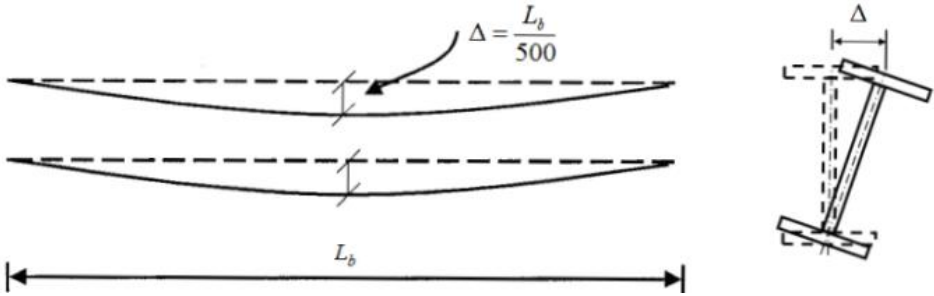
denklemini önerilmiştir. Burada M_{br}' birim boydaki destek momenti olmakta olup; kayma diyaframı ve I-kiriş birleşiminde oluşan stabilite destek kuvvetlerinin I-kiriş başlığında oluşturduğu

momentin TSK genişliğine -610 mm- bölünmesiyle elde edilen birim moment değeridir. L kiriş serbest burkulma boyu olup d ise kiriş derinliğidir.

Sonlu Elemanlar Analitik (SEA) Modeli

Kiriş Sonlu Elemanlar Analitik Modeli

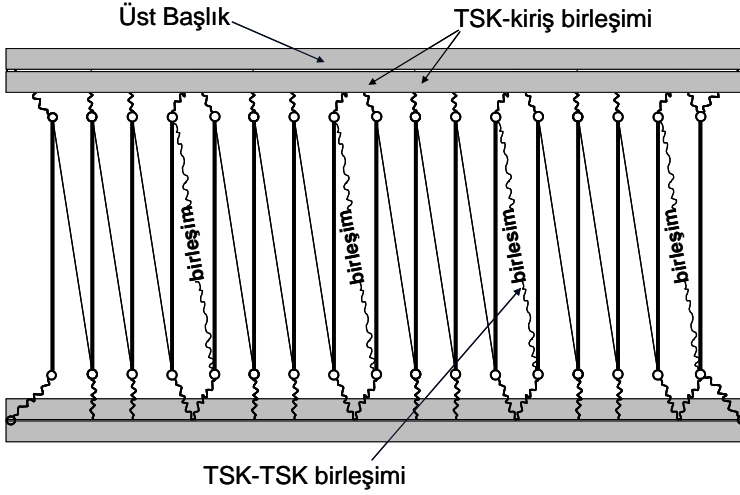
TSK'larla desteklenmiş çelik I-kirişlerin burkulma davranışını irdelemek için üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS (2007) kullanılarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. Birbirinin simetriği iki çelik I-kiriş arasında kayma diyaframından oluşan bir sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Tüm elemanlar lineer-elastik malzeme modeline göre modellenmiştir. Kirişler 8 düğüm noktalı klasik kabuk elemanlarla modellenmiştir. Başlıklarda iki, gövdede ise dört kabuk eleman kullanılmıştır. Sonlu elemanlar en/boy oranı bir ve iki arasında tutulmuştur. Kirişler eğilme ve burulmada basit mesnetlidir. Mesnetlerde alt ve üst başlık yanal ötelenme serbestliği engellenmiş olup, çarpılma serbestliği vardır. Desteklenecek olan yapısal elemanlardaki başlangıç şekil bozuklukları destek elemanlarında oluşacak kuvvetler üzerinde önemli bir parametredir. Wang & Helwig (2005) çelik çaprazlar veya diyaframlarda desteklenen çelik I-kirişlerdeki yapısal stabilite destek kuvvetlerinin başlangıç şekil bozuklukları ile doğrudan orantılı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmadaki kirişlere Helwig & Yura (2008a, 2008b) da da kullanıldığı üzere Wang & Helwig (2005) tarafından önerilen şekil ve büyüklükte başlangıç şekil bozukluğu yansıtılmıştır (Şekil 1). Kirişlerdeki başlangıç enkesit dönmesinin en büyük değeri, θ_{0max} (6) numaralı denklemde ifade edilen şekildedir. (6) numaralı denklemle ifade edilen değer kiriş açıklık ortasında maksimum değerine ulaşmakta olup mesnetlerde sıfırdır. Ayrıca kirişler mesnetlerde çarpılma serbestliğine sahip olmakta diğer bir deyişle kiriş derinliği etrafında enkesit serbestçe dönebilmektedir.



Şekil 1 Kirişlerde başlangıç şekil bozukluğu.

Kayma Diyaframı Sonlu Elemanlar Analitik Modeli

Kayma diyaframları Davies & Bryan (1981)'a göre modellenmiştir. Davies & Bryan (1981) Şekil 2'de gösterildiği üzere diyafram kayma rijitliğini eksenel elemanlardan oluşan bir düzlem kafes ile modellemiştir.

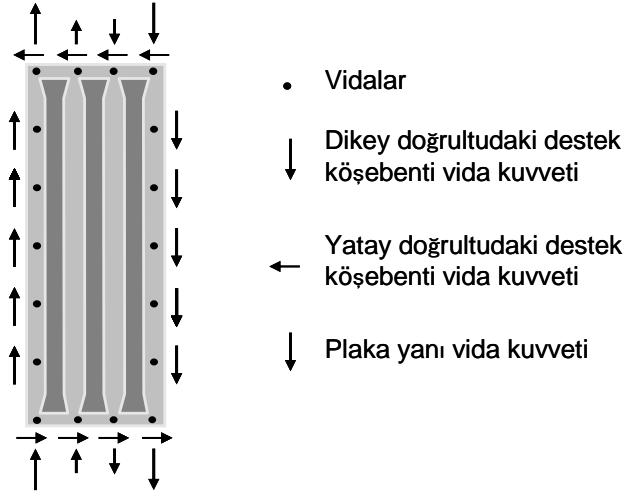


Şekil 2 Kayma Diyaframı Sonlu Elemanlar Analitik Modeli.

Şekil 2'de, SEA modelin üstten görünüşü yer almakta ve toplamda dört adet TSK paneli ve iki adet kiriş bulunmaktadır. Modeldeki TSK'lar çelik köprü ve bina inşaatlarında sıklıkla kullanılan 3 oluklu enkesite sahip olmakla birlikte Şekil 2'de 4 adet dik ve 3 adet çapraz çubukla temsil edilmektedir. SEA modelinde her bir paneldeki eksenel eleman sayısı değiştirilerek istenildiği kadar bağlantı elemanı kullanılabilir; çapraz ve dik elemanların sonlarına yerleştirilen boyutsuz yaylar vasıtasıyla da bağlantı noktalarında oluşan kuvvetler elde edilmektedir. Eksenel elemanlar her bir kiriş üst başlığının ortasındaki düğüm noktalarında bulunan boyutsuz yaylara bağlanmaktadır. Eksenel elemanlar her bir düğüm noktasında 3 eksende ötelenme serbestliklerine sahiptir. Dik eksenel elemanların rijitliği, deplasmanların ihmal edilebileceği kadar yüksek alınmıştır. Bu sayede dik eksenel elemanlar yükü bir kirişten diğer bir kirişe aktarırken kayma diyaframının rijitliği tamamıyla çapraz elemanların enkesit alanı ile temsil edilmektedir. Analizlerde ihtiyaç duyulan kayma rijitliği değerlerini modele yansıtılabilmek için gerekli çapraz eksenel eleman alanlarının hesabında Luttrell (2004) de tarif edilen şekilde bir kayma çerçevesi SEA modelinden yararlanılmıştır. Kayma çerçevesi SEA modeli ile ilgili detaylı bilgi Egilmez & Alkan (2009)'da bulunmaktadır.

Vida bağlantıları Sonlu Elemanlar Analitik Modeli

Çelik köprü inşaatlarında TSK panelleri, destek köşebentleri ve komşu panellere vidalarla veya kaynaklarla bağlanabilmektedir. Şekil 3' te tekil TSK paneli ve bağlantı elemanları görülmektedir.



Şekil 3 TSK birleşim noktaları ve oluşan destek kuvvetleri

19 mm uzunluğunda ve 6.3 mm çapındaki TEKS vidalar sıklıkla kullanılan vida tipidir. SEA modelinde TSK-kiriş bağlantıları vidalı birleşimlere göre düşünülmüş olup bağlantı rijitliği boyutsuz yaylar vasıtasıyla modele yansıtılmıştır. Yaylar, kirişler boyunca olan eksen ve bu eksene dik eksen doğrultusunda eşit rijitliğe sahip olmakla birlikte dönmeye karşı rijitliği yoktur. Boyutsuz yaylar üst başlık ortasındaki düğüm noktasında, aksenal elemanların ucunda konumlanmıştır. Şekil 2'de görsel sebeplerle belli bir uzunlukla görülmesine rağmen bağlantı noktalarını simgeleyen yaylar boyutsuzdur. Vidalı bağlantıyı simgeleyen bu yayların rijitlik ve mukavemet değerleri Luttrell (2004)'ten alınmıştır. Şekil 2'de "birleşim" olarak ifade edilmiş olan elemanlar TSK yan yüzlerinde bulunan kalıplar-arası bağlantıları temsil etmektedir. Şekil 2'de görsellik kazandırmak için çapraz çizilmiş olan bu elemanlar aslında dik aksenal elemanlardır. Luttrell(2004)'de bu tür bağlantılar için verilen rijitlik değeri, bağlantıda kullanılan vida sayısı kadar artırılıp analizler yapılmıştır. TxDOT (2004) kalıplararası birleşimlerde kullanılacak vidalar arası mesafeyi en çok 450 mm olarak tanımlamıştır. Bu doğrultuda 5 vidalı birleşimlerde iki kiriş arası açıklık 2740 mm, 3 vidalı birleşimlerde ise 1800 mm tutulmuştur. Bu açıklık değerleri çelik köprü inşaatlarında halihazırda uygulanmakta olan değerlerdir.

Sonlu Elemanlar Analitik Modelinin Deneyler ile Doğrulanması

SEA modelinin sonuçları Eğilmez (2005) tarafından 14.63 m açıklığında TSK ile desteklenmiş kirişler ile Houston Üniversitesi Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda yapılan tam ölçekli burkulma deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Eğilmez & Alkan (2009) deney düzeneği ile ilgili ayrıntılı bilgi vermektedir. SEA modeli ve deney çıktıları karşılaştırıldığında; elastik bölgede kirişlerin kesit dönmelerinin başlangıç kesit dönmelerine oranı gerçek burkulma davranışına kıyasla % 4.7 yüksek sonuçlanmıştır.

Genel Bakış

Analizlerde altı farklı enkesitli I-kiriş kullanılmıştır. Kesit derinlikleri 1464 mm ve 1830 mm'dir. Gövde kalınlıkları değiştirilerek 100 ve 160 olmak üzere iki gövde narinlik oranı vardır. Başlık genişlikleri 220 ve 300 mm olup başlık narinlik oranı tüm kesitler için 6'dır. Analizlerde diğer parametreler ise açıklık/derinlik oranı, L/d ile diyafram rijitliğidir. Kesitlere ait detaylı bilgi, takip eden sayfalardaki tablolarda bulunmaktadır. Tüm kirişler narin gövdeli olduğundan, kiriş boyunca -kiriş derinliğinin 1.25 katı aralıklı- ve mesnetlerde düşey berkitmeler kullanılmıştır. Analizlerde 1.52 mm (16 ga) kalınlığında TSK paneller kullanılmıştır. 1.22 mm (18 ga) ve 0.91 mm (20 ga) kalınlığında paneller ile de analizler yapılmış olup, diyafram kayma rijitliği eşit alındığında birleşim noktalarındaki kuvvetlerin eşit olduğu görülmüştür.

Kirişler üst başlık ortasındaki düğüm noktalarından, açıklık ortasında maksimum 210 MPa eğilme gerilmesi oluşturacak şekilde kiriş boyunca düzgün yayılı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bu sayede beton dökümü esnasında tüm yükü çelik kirişlerin taşıılması amaçlanmıştır. Analizler için her I-kirişin yanal burulma burkulması dayanımı, Mg hesaplanmıştır. 210 MPa eğilme gerilmesi oluşturacak kiriş karakteristik eğilme momenti, M_{cr} hesabının ardından Helwig&Yura (2008a)'dan yükleme durumuna uygun "m" katsayıları seçilmiştir. (5) nolu denklem kullanılarak Q_i hesaplanmıştır. Q_i 'nin katlarını burkulma analizlerine yansıtılabilmek için gerekli olan çapraz eksenel eleman alanları hesabında kayma çerçevesi SEA modeli ile kayma analizleri yapılmıştır

Bulgular ve Sonuçlar

Bu bölümde yapılan burkulma analizlerinin sonuçlarına yer verilmiştir. Tablo 1'de analizler sonucunda açıklık ortasında oluşan kiriş enkesit dönmesi değerinin kiriş başlangıç şekil bozukluğuna oranı verilmiştir. Yapılan analizlerde Şekil 3'te görülen panel dizilimi kullanılmış olup, TSK-kiriş birleşiminde 4, paneller-arası birleşimlerde 5 adet vida bulunmaktadır. Analizlerde ideal diyafram rijitliğinin 2, 3 ve 4 katı diyafram rijitliği kullanılmış, kiriş açıklığının kiriş derinliğine oranı 10, 15 ve 20 tutulmuştur. Tablo 1'e göre sırasıyla 2, 3 ve 4 kat rijitlik için gövde narinlik oranı (GNO)'nın 100 den 160'a çıkarılması halinde -K100#2, K160#2- enkesit dönmesi oranları sırasıyla %9.3, %7.3 ve %6.6 artmaktadır. K100#2 ve K160#2 kesitlerinin gövde yüksekliği, başlık genişlikleri ve narinliği aynı olduğundan kesit dönmesindeki bu fark GNO'dan kaynaklanmaktadır. Tüm kesitlere ait analizler bir bütün olarak incelendiğinde; diyafram rijitliğinin ideal rijitliğin 3 katından 4 katına artırılması durumunda kesit dönmesi değerlerindeki azalmanın, ideal rijitliğin 2 katından 3 katına arttırıldığı durumlardaki kesit dönmesi değerlerindeki azalımdan daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Buna ilaveten L/d oranındaki azalmanın kesit dönmesi değerlerini düşürdüğü görülmektedir. Tablo 1'e göre sırasıyla 2, 3 ve 4 kat rijitlik için gövde yüksekliğinin 1464 ten 1830'a çıkarılması halinde enkesit dönmesi oranları K100#1 ve K100#3 için yaklaşık %11, K160#1 ve K160#3 için ise yaklaşık %18 ~ %20 artmaktadır. Karşılaştırılan kirişlerin birbirinden tek farkının kiriş derinliği olması sebebiyle kesit dönmesindeki artış kesit yüksekliğindeki artıştan kaynaklanmaktadır.

Tablo 1'de basınç başlığı genişliğinin artırılması durumunda kiriş yanal burulma burkulması dayanımının artması sonucu enkesit dönmesi oranlarının azaldığı da ayrı bir sonuçtur.

Tablo 1 Kiriş enkesit dönmesi oranları

Kesit Adı	Kesit Özellikleri	L/d	θ_T / θ_0		
			$2Q_{ideal}$	$3Q_{ideal}$	$4Q_{ideal}$
K-100#1	$b_f=220$ mm	10	2.85	2.41	2.23
	$d^2=1464$ mm	15	3.32	2.75	2.53
	GNO ³ =100	20	4.30	3.38	3.07
K-100#2	$b_f=300$ mm	10	2.54	2.16	2.00
	$d=1464$ mm	15	2.90	2.45	2.27
	GNO =100	20	3.63	2.95	2.70
K-100#3	$b_f=220$ mm	10	3.18	2.66	2.46
	$d=1830$ mm	15	3.78	3.07	2.81
	GNO =100	20	-	-	-
K-160#1	$b_f=220$ mm	10	3.33	2.74	2.52
	$d=1464$ mm	15	3.71	3.01	2.75
	GNO =160	20	5.02	3.76	3.36
K-160#2	$b_f=300$ mm	10	2.96	2.46	2.26
	$d=1464$ mm	15	3.17	2.63	2.42
	GNO =160	20	3.98	3.16	2.87
K-160#3	$b_f=220$ mm	10	4.06	3.26	2.98
	$d=1830$ mm	15	4.66	3.62	3.24
	GNO =160	20	-	-	-

1. Başlık genişliği, 2. Kesit derinliği, 3. Gövde narinlik oranı

Tablo 2'de analizler sonucunda TSK ve destek köşebenti birleşim vidalarında oluşan maksimum vida destek kuvvetlerinin birleşim kayma mukavemetine oranı görülmektedir. Birleşim mukavemetleri 1.52 mm kalınlığında TSK panel için Luttrell(2004)'e göre hesaplanmıştır. Vidalarda Şekil 3'te görüldüğü gibi kirişlere doğru ve kirişlere paralel yönde destek kuvvetleri oluşmakta olup Tablo 2'deki oranlar bu kuvvetlerin bileşkesine göre dir. TSK yan yüzlerinde oluşan vida destek kuvvetleri TSK-destek köşebenti birleşimlerine göre daha düşük çıkmış olup bu bildiride yer verilememiştir.

Tablo 2'deki sonuçlar Tablo 1'de sunulan sonuçların devamı niteliğinde olup aynı analizlere aittir. Tablo 2'ye göre sırasıyla 2, 3 ve 4 kat rijitlik için GNO'nun 100 den 160'a çıkarılması halinde – K100#2, K160#2- vida destek kuvvetlerinde büyük bir değişiklik olmamıştır. K100#2 ve K160#2 kesitlerinin gövde yüksekliği, başlık genişlikleri ve narinliği aynı olduğundan GNO'daki değişimlerin vida destek kuvvetleri üzerinde etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Tüm kesitlere ait analizler bir bütün olarak incelendiğinde; diyafram rijitliğinin ideal rijitliğin 3 katından 4 katına artırılması durumunda vida kuvvetlerindeki azalmanın, ideal rijitliğin 2 katından 3 katına artırılması durumunda vida kuvvetlerindeki azalımdan daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

Ek olarak L/d oranındaki azalmanın vidalarda daha düşük kuvvetler oluşturduğu görülmektedir. Tablo 2'ye göre sırasıyla 2, 3 ve 4 kat rijitlik için gövde yüksekliğinin 1464'ten 1830'a çıkarılması halinde vida kuvvetleri K100#1 ve K100#3 için yaklaşık %40, K160#1 ve K160#3 için ise yaklaşık %45 artmaktadır. Bu doğrultuda daha yüksek eğilme rijitliğine sahip kirişlerde daha yüksek basınç kuvvetlerinin oluşması neticesinde vidalarda daha yüksek destek kuvvetleri oluşmaktadır. Tablo 1'e göre basınç başlığı genişliğinin artırılması durumunda vidalarda daha yüksek kuvvetler oluşmuştur.

Tablo 2 TSK-kiriş birleşimi normalize edilmiş kuvvet oranları

Kesit Adı	Kesit Özellikleri	L/d	$F_{\text{destek}}/ F_{\text{kapasite}}$		
			$2Q_{\text{ideal}}$	$3Q_{\text{ideal}}$	$4Q_{\text{ideal}}$
K-100#1	$b_f=220$ mm	10	0.66	0.57	0.54
	$d=1464$ mm	15	0.79	0.67	0.63
	GNO ³ =100	20	1.04	0.83	0.76
K-100#2	$b_f=300$ mm	10	0.81	0.72	0.68
	$d=1464$ mm	15	0.96	0.84	0.79
	GNO =100	20	1.23	1.02	0.95
K-100#3	$b_f=220$ mm	10	0.96	0.82	0.77
	$d=1830$ mm	15	1.18	0.97	0.90
	GNO =100	-	-	-	-
K-160#1	$b_f=220$ mm	10	0.63	0.54	0.51
	$d=1464$ mm	15	0.73	0.60	0.56
	GNO =160	20	0.98	0.75	0.68
K-160#2	$b_f=300$ mm	10	0.83	0.72	0.68
	$d=1464$ mm	15	0.92	0.79	0.74
	GNO =160	20	1.17	0.95	0.88
K-160#3	$b_f=220$ mm	10	0.95	0.78	0.72
	$d=1830$ mm	15	1.12	0.88	0.80
	GNO =160	-	-	-	-

1. Başlık genişliği, 2. Kesit derinliği, 3. Gövde narinlik oranı

Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilen sonuçlara ek olarak; K-160#2 kirişi için L/d 10,15 ve 20 için 3 kat ideal rijitliğe sahip, 1.52 mm kalınlığında diyafram ile yapılan analiz sonuçları Helwig & Yura (2008b) tarafından önerilmiş olan (5) numaralı denklem sonuçları ile karşılaştırılmıştır. (5) numaralı denkleme göre hesaplanan TSK-kiriş birleşimindeki kuvvetler SEA göre yüksek bulunmuştur. Bu doğrultuda kayma diyaframlarının mukavemeti üzerine bir denklem üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Kaynaklar

1. AASHTO LRFD bridge design specifications, customary U.S. units [electronic resource]. (2012). Washington, DC : American Association of State Highway and Transportation Officials, c2012
2. ANSYS Inc. (2007). Finite Element Model Users Manual. Version 11.0, Canonsburg, Pa.
3. Davies J. M. and Bryan E. R. (1982). Manual of Stressed Skin Diaphragm Design. John Wiley and Sons, New York.
4. Egilmez, O., Alkan, D. (2009). Çelik köprü I-kirişlerine yanal destek sağlayan trapez sac kalıpların mukavemeti. Teknik Dergi, 20(4) 4891-4904.
5. Egilmez, O., Helwig, T., Jetann, C., & Lowery, R. (2007). Stiffness and strength of metal bridge deck forms. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 12(4), 429437.
6. Egilmez, O., Helwig, T., & Herman, R. (2012). Buckling behavior of steel bridge I-girders braced by permanent metal deck forms. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 17(4), 624-633.
7. Errera, S. J., & Apparao, T.R. (1976). Design of I-shaped beams with diaphragm bracing. ASCE Journal of the Structural Division, ASCE, 102(4), 769-781.
8. Helwig, T. A., & Herman, R. (2010). Using metal deck forms as construction bracing. CTR Technical Report No:5-5145-1, CTR at the University of Texas at Austin.
9. Helwig, T. A., & Frank, K. H. (1999). Stiffness requirements for diaphragm bracing of beams. Journal of Structural Engineering, ASCE, 125(11), 1249-1256.
10. Helwig, T. A., & Yura, J. A. (2008). Shear diaphragm bracing of beams. I: Stiffness and Strength Behavior. Journal of Structural Engineering, ASCE, 134(3), 348-356.
11. Helwig, T. A.; & Yura, J. A. (2008). Shear diaphragm bracing of beams. II: Design requirements. Journal of Structural Engineering, ASCE, 134(3), 357-363.
12. Luttrell, L. D. (1981). Steel Deck Institute diaphragm design manual (1st ed.). St. Louis, Missouri
13. Luttrell, L. D. (2004). Steel Deck Institute diaphragm design manual (3rd ed.). Canton, Ohio.
14. Nethercot, D., & Trahair, N. (1975). Design of diaphragm-braced I-beams. Journal of Structural Division, ASCE, 101(10), 2045-2061.
15. Texas Department of Transportation (TxDOT). (2004). Permanent metal deck form standards, TxDOT Bridge Division, June 2002.
16. Wang, L., & Helwig, T. A. (2005). Critical imperfections for beam bracing systems. Journal of Structural Engineering, ASCE, 131(6), 933-940.
17. Winter, G. (1960). Lateral bracing of columns and beams. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 125, 809-825.

Anahtar sözcükler: Çelik I-kiriş, Yanal Burulma Burkulması, Trapez Sac Kalıp, Kayma Diyaframı, Yapısal Kararlılık.