

Çelik Köprü I-Kirişlerine Yanal Destek Sağlayan Trapez Sac Kalıpların Mukavemeti

Oğuz Özgür EĞİLMEZ*
Deniz ALKAN**

ÖZ

Trapez Sac Kalıplar (TSK) hem çelik bina hem de çelik köprü sektörlerinde beton döşemenin kalıp sistemi olarak sıklıkla kullanılmaktadırlar. TSK'ler her ne kadar bina inşaatlarında çelik I-kirişlere yanal destek sağlayıcı elemanlar olarak işlev görseler de, çelik köprü sektöründe trapez sac kalıplardan destek elemanları olarak yararlanılmasına izin verilmez. Ancak, önceki çalışmalar birleşim detayının geliştirilmesi durumunda TSK sisteminin kirişin yanal kararlılığına belirgin şekilde destek sağlayabildiğini göstermiştir. Bu makale halen devam etmekte olan ve TSK'lerin mukavemetinin incelendiği analitik bir çalışmanın ara sonuçlarını içermektedir. Geçmişte, TSK sistemleriyle desteklenen köprü kirişlerin genel burkulma davranışını irdeleyen basit sonlu elemanlar modelleri (SEM) kullanılmıştır. Bu çalışmada TSK'leri hem birbirlerine hem de kirişlere bağlayan vidalardaki kararlılık destek kuvvetlerini belirlemek için kullanılan geliştirilmiş bir sonlu elemanlar modelinin sonuçlarına yer verilmiştir. Bu çözümleme sonuçları TSK'lerin içermesi gereken mukavemet ihtiyacını belirleyecek olan bir tasarım yönteminin geliştirilmesinde kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Trapez Sac Kalıp, Kararlılık; Çelik I-Kiriş

ABSTRACT

Strength of Permanent Metal Deck Forms Used to Brace Steel Bridge I-Girders

Permanent metal deck forms (PMDF) are frequently used in the building and bridge industries as concrete deck formwork. PMDF are not currently relied upon as a bracing source for bridges due to eccentric connections that can dramatically reduce the stiffness of the deck system. However, previous studies have shown that the PMDF can provide substantial bracing against lateral torsional buckling to the bridge girders by making simple modifications to connection details. This paper presents the results of an ongoing analytical study on the PMDF strength requirements for steel bridge girders. In the past, simplified finite element analytical (FEA) models were used to investigate the global buckling behavior of the PMDF braced systems. This paper focuses on results of modified FEA

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 19.11.2007 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - ozguregilmez@iyte.edu.tr

** İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - denizalkan@iyte.edu.tr

Çelik Köprü I-Kirişlerine Yanal Destek Sağlayan Trapez Sac Kalıplarının Mukavemeti

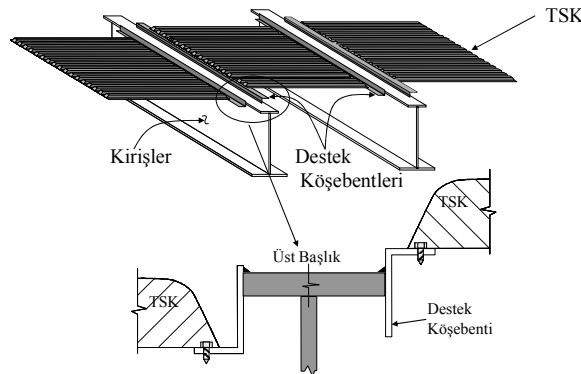
models to determine the stability brace forces of fasteners used to connect the PMDF along the sidelaps of the sheets and also to the girders. The results will be used to develop strength requirements for the PMDF used in the bridge industry.

Keywords: Permanent Metal Deck Forms, Stability; Steel I-Girders

1. GİRİŞ

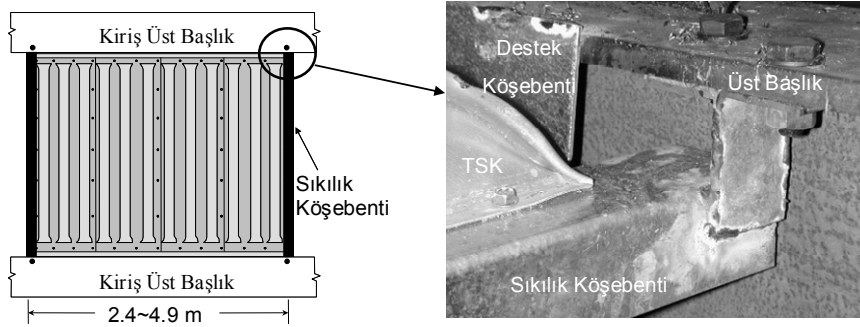
Kararlılık destek sistemlerinin tasarımında genel anlayış belirli bir tasarım yüküne ötelenmeler de kontrol altındayken ulaşmaktır. Bir destek sisteminin yeterli olabilmesi tasarım yüklerini taşıyabilmesi için yeterli mukavemete ve ötelenmeleri kontrol edebilmesi için yeterli sıklığa sahip olmasına bağlıdır. Trapez sac kalıplar (TSK) düzlemleri içinde oldukça yüksek bir sıklığa ve mukavemete sahiptirler ve birleşim şekline göre bağlandıkları ara veya ana kirişlere destek sağlayabilirler. Çelik bina inşaatı endüstrisinde çatı veya döşeme sistemlerinde sıklıkla kullanılan TSK'ler çatının veya döşemenin rüzgar yüklerinden dolayı yanal ötelenmesine direnç gösterdikleri gibi kirişlerin kararlılığına da destek sağlarlar.

Çelik bina inşaatlarında trapez sac kalıplar kaynaklanarak veya vidalarla doğrudan kirişlerin üzerine bağlanırlar. Çelik köprü endüstrisinde kullanılan trapez sac kalıp sistemlerinin birleşim detayı ise bina endüstrisindeki birleşim detayından oldukça farklıdır. Çelik köprü uygulamalarında TSK'ler kirişlerin üzerine monte edilip bir süreklilik oluşturmaksızın kiriş üst başlıklarına kaynakla tutturulan köşebentlerin (genellikle destek köşebentleri diye adlandırılırlar) üzerine vidalanırlar. Şekil 1'de tipik bir çelik köprü kiriş-TSK uygulaması görülmektedir. Destek köşebentleri kiriş başlık kalınlığındaki değişimlere ve olası farklı kiriş kamburlarına karşı mütehaatin döşemenin seviyesini ayarlamasına olanak sağlar. Destek köşebentleri her ne kadar inşaat aşamasında kolaylık sağlasalar da, ortaya çıkan eksantrisite sebebiyle kalıp sisteminin sıklığı belirgin bir oranda azalmaktadır. Eksantrik destek köşebentlerinin bu yumuşatıcı etkisi sebebiyle Türkiye'de de kullanılan American Association of State Highway and Transportation Officials [1] standardı henüz TSKlerin çelik köprü kirişlerinin kararlılığında destek elemanları olarak kullanılmasına izin vermemektedir. Ancak Teksas (Austin) ve Houston Üniversitelerinde yapılan çalışmalar [2, 11] birleşim detayının geliştirilmesi durumunda TSK sisteminin sıklığının belirgin oranda arttığını göstermiştir.



Şekil 1 Çelik Köprü İnşaatında Trapez Sac Kalıp Uygulaması

Houston Üniversitesinde yapılan çalışmalar [11, 12] neticesinde önerilen birleşim detayı sac kalıp plaka yan birleşimlerine denk gelecek şekilde dik doğrultuda koyulup her iki ucundan kirişlere kaynakla veya bulonlarla tutturulan ve her 5 ila 10 sac plakada bir kullanılan köşebentlerden (genellikle sıklık köşebentleri olarak adlandırılırlar) oluşmaktadır (Şekil 2). Trapez sac kalıp plakaları hem destek köşebentlerine hem de belirli aralıklarla sıklık köşebentlerine vidalandıkları için destek köşebentlerinin eksantriklik sebebiyle dönmeleri engellenmektedir. Bu detaya sahip TSK'leri kayma diyaframları olarak modellemek mümkündür [6].



Şekil 2 TSK Sistemlerinin Geliştirilmiş Birleşim Detayı (Jetann, [12]).

Trapez Sac Kalıp sistemlerinin destek elemanları olarak kullanılabilmesi için sıklık ve mukavemet davranışlarının anlaşılması gerekmektedir. Bu sistemlerin sıklık özellikleri Helwig ve Yura [9] ile Eğilmez ve diğerleri [5] tarafından çalışılmıştır; ancak mukavemet özellikleri henüz tam olarak irdelenmemiştir. Helwig ve Yura [9] mukavemet özelliklerini basit bir model olan kayma diyaframı modeliyle incelemiş ve TSK'lerin mukavemet ihtiyaçları için bir denklem önermiştir. Ancak Eğilmez ve diğerlerinin [5] çok daha ayrıntılı bir modelle yaptıkları çözümler bağlantı vidalarındaki kuvvetlerin Helwig ve Yura'nın önerdikleri denklemle hesaplanan kuvvetlerden çok daha düşük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Eğilmez ve diğerlerin geliştirdiği modelle her ne kadar istenilen sonuçlara ulaşmak mümkün ise de çözümlene süresi çok fazla olduğu için daha basit modellerin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Bu makale çelik köprü inşaatlarında kullanılan Trapez Sac Kalıp sistemlerinin mukavemetlerinin hesaplanması üzerine analitik olarak yapılan bir çalışmanın sonuçlarını içermektedir. Trapez sac kalıpların mukavemeti, kalıpları birbirine ve destek köşebentine bağlayan vida birleşimlerinin mukavemetine bağlıdır [4]. Bu çalışmada TSK'lerin mukavemet özelliklerinin incelenmesi için Davies ve Bryan'ın [3] geliştirdiği basit bir sonlu elemanlar modelinin kullanılması önerilmektedir. Bu model Helwig ve Yura [9] tarafından önerilen modelin bir benzeri olmakla beraber TSK'lerin hem birbirleriyle hem de destek köşebentleriyle birleşimini sağlayan vidaları da modellemektedir.

Makalede ilk olarak önceki çalışmalar ile TSK sistemlerinin sıklık ve mukavemet özellikleri hakkında bilgi verilmektedir. Daha sonra sonlu elemanlar modeli tanıtılmakta ve

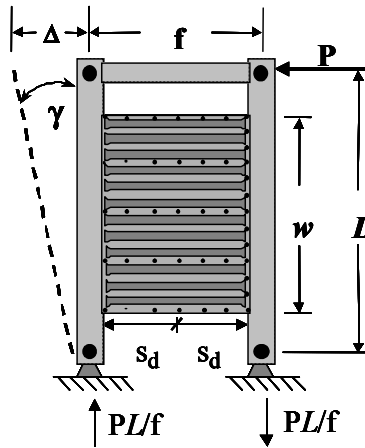
Çelik Köprü I-Kirişlerine Yanal Destek Sağlayan Trapez Sac Kalıpların Mukavemeti

elde edilen çözümlenme sonuçları Eğilmez'in [4] deney sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Ardından çözümlenmelerden elde edilen bağlantı vidalarındaki kuvvetleri içeren bulgulara yer verilmiştir. Bu çözümlenme sonuçları TSK'lerin içermesi gereken mukavemet ihtiyacını belirleyecek olan bir tasarım yönteminin geliştirilmesinde kullanılacaktır. Makale kısa bir özetle son bulmaktadır.

2. GENEL BİLGİ VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Trapez Sac Kalıp Sistemlerin Kayma Sıklığı

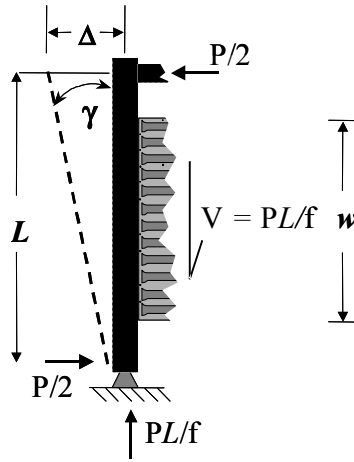
Bir destek sisteminin taşıdığı yükler sistemin sıklığıyla doğru orantılıdır [16]. Bu sebeple destek sisteminin mukavemetinin anlaşılması sıklığının da anlaşılmasını gerektirmektedir. TSK destek sistemlerinin sıklık açısından konumuzu ilgilendiren malzeme özelliği etkili kayma modülüsüdür, G' . Kayma modülüsünün geleneksel tanımı kayma gerilmesinin kayma birim uzamasına bölümüdür. Ancak, bir trapez sac kalıbın kayma gerilmesi-kayma birim uzaması ilişkisi malzeme kalınlığına doğrudan bağlı olmadığından [13], bu sistemlerin tanımlanmalarında genellikle malzeme kalınlığına bağlı olmayan bir "etkili" kayma modülüsü tanımı kullanılmaktadır. Bir TKS sisteminin etkili kayma modülüsü Şekil 3'de görülen bir deney düzeneği kullanılarak deneysel olarak hesaplanabilir. Şekil 3'de gösterilen değişkenler şöyledir: γ = kayma birim uzaması; Δ = deney çerçevesinin ucundaki yanal ötelenme; P = yanal yük; L = deney çerçevesinin boyu; f = deney çerçeve kirişlerinin arasındaki mesafe; ve w = TSK panelinin genişliği. Çelik bina endüstrisinde kullanılan TSK sistemlerinin sıklığı Steel Deck Institute [14] tarafından sağlanan tasarım denklemlerini ve çizelgelerini kullanarak da hesaplanabilir. Bu denklemler ve çizelgeler çelik köprü TSK sistemleri için birebir kullanılamazlar. Ancak Curah [2] ve Eğilmez [4] SDI [14] denklemlerinin küçük değişikliklerle çelik köprü TSK sistemlerinin sıklığı ve mukavemeti hesaplamalarında da kullanılabileceklerini göstermişlerdir.



Şekil 3 TSK Paneli için Kayma Deney Çerçevesi

Kayma deney çerçevesinin bir bölümünde (Şekil 4) kesitler yöntemi uygulandığında kuvvetler eşitliğinin sağlanabilmesi için sistemde bir iç kayma kuvvetinin bulunduğu görülebilir. Şekil 3'de görülen kuvvetler dengesi neticesinde kiriş boyunca oluşan etkili kayma gerilmesi ve birim kayma uzaması şu şekilde hesaplanır: $\tau' = V/w$ ve $\gamma = \Delta/L$. TSK sisteminin etkili kayma modülüsü de aşağıdaki denklemi kullanarak hesap edilir:

$$G' = \frac{\tau'}{\gamma} \quad (1)$$



Şekil 4 TSK Panelinde Oluşan İç Kuvvetler

2.2 Trapez Sac Kalıp Sistemlerin Kayma Sıklığı İhtiyacı

Trapez Sac Kalıp sistemlerinin sıklık ihtiyacının belirlenmesi için gerekli olan veri bu sistemlerce desteklenen kirişlerin moment taşıma mukavemetidir. TSK sistemleriyle desteklenen kirişlerin moment taşıma mukavemeti üzerine geçmişte çeşitli çalışmalar yapılmış ve sabit moment altındaki kirişlerin burkulma momentinin hesaplanması için basit denklemler önerilmiştir [7, 15]. Her iki çalışmada da TSK'ler kayma diyaframları olarak modellenmiştir. Helwig ve Frank [8] de aynı sistemler üzerine çalışmalarda bulunmuş ve daha çeşitli yükleme koşullarını ve yüklerin uygulandığı yükseklikleri de göz önünde bulundurarak daha önce önerilen denklemlerde bazı değişiklikler öngörmüşlerdir. Helwig ve Frank'in kayma diyaframlarınca desteklenen kirişlerin burkulma momentini için önerdiği denklem şöyledir:

$$M_{cr} = C_b^* M_g + mG' s_d d \quad (2)$$

Çelik Köprü I-Kirişlerine Yanal Destek Sağlayan Trapez Sac Kalıpların Mukavemeti

Bu denklemde M_{cr} = Kayma diyaframıyla desteklenen kirişin burkulma momenti; C_b^* = Yükleme çeşidinin ve yük yüksekliğinin etkilerini içeren katsayı; M_g = Çıplak kirişin burkulma momenti; m = Yükün çeşidine göre değişen bir katsayı; G' = Kayma diyaframının etkin kayma modülüsü; s_d = Kirişi destekleyen kayma diyaframının boyu; ve d = Kirişin derinliğidir.

Herhangi bir destek sisteminin desteklediği yapısal elemanın istenilen taşıma kapasitesine ulaşması için ihtiva etmesi gereken sıklığa o destek sisteminin ideal sıklığı denilir. Bir TSK sisteminin ideal sıklığı 2 numaralı denklemden yola çıkılarak şöyle hesaplanır:

$$G'_{ideal} = \frac{M_u - C_b^* M_g}{m s_d d} \quad (3)$$

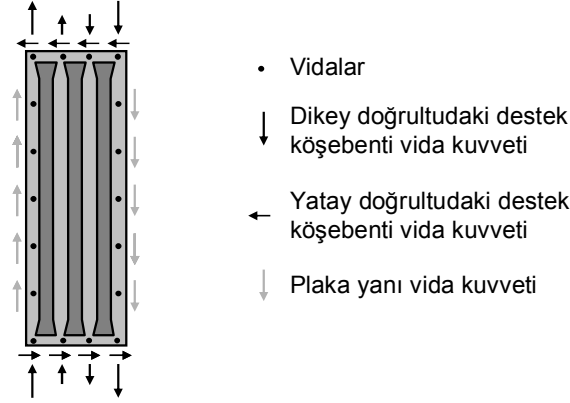
Bu denklemde M_u (veya M_{cr}) = Kayma diyaframıyla desteklenen kirişin tasarlanacağı veya taşıyacağı burkulma momenti; ve G'_{ideal} = Kayma diyaframının etkin ideal kayma modülüsüdür. Diğer değişkenlerin tanımları yukarıda verilmiştir. Bir başka deyişle M_u , çelik köprü kirişlerin inşa aşamasında taşıdığı yüklerin (kirişlerin zati ağırlığı, ıslak döşeme betonu ve inşa yükleri) ortaya çıkardığı momenttir. TSK'ler sadece inşa aşamasında destek elemanları olarak kullanılabilirler. Beton prizini aldıktan ve çelik kiriş ile beraber çalışmaya başladıktan sonra kirişlerin yanal desteğe ihtiyacı kalmaz.

Daha önce de belirtildiği gibi bir destek sisteminin yeterli olabilmesinin iki koşulundan biri ötelenmeleri kontrol edebilmesidir. Ancak yukarıda gösterilen ideal sıklığa sahip bir destek elemanı büyük ötelenmelerin önüne geçemeyecektir. Helwig ve Yura [9] yaptıkları analitik bir çalışmada TSK ile desteklenen kirişlerde yanal ötelenmelerin kontrol edilmesi için TSK sisteminin sıklığının ideal sıklığın dört katı olması gerektiğini göstermişlerdir:

$$G'_{ideal} = 4 \frac{M_u - C_b^* M_g}{m s_d d} \quad (4)$$

2.3 Trapez Sac Kalıp Sistemlerin Kayma Mukavemeti

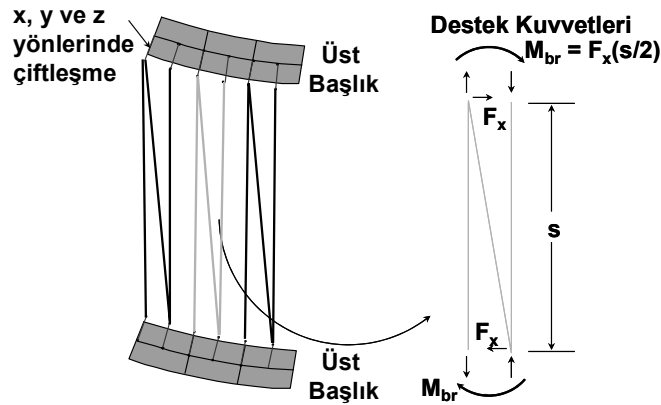
Trapez Sac Kalıp panel sistemlerin göçme sınır koşulları genellikle iki türdür: a) Birleşim vidalarının kayma kırılması; b) Birleşim vidaları etrafındaki sacın büzülmesi ve kopması [13, 4]. Bu göçme koşulları sebebiyle TSK sistemlerinin mukavemetlerinin hesaplanması için sac kalıpları hem kalıp uçlarında destek köşebentlerine hem de kalıp yanlarında birbirlerine bağlayan vidalardaki kuvvetlerin hesaplanması önem taşımaktadır. Şekil 5'de bir sac kalıp plakasındaki vidalar ve vidalardaki kuvvetler dağılımı görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi plakanın destek köşebentine bağlandığı vidalarda hem dikey hem yatay kuvvetler mevcutken, plaka yanlarındaki vidalarda sadece dikey kuvvetler ortaya çıkar.



Şekil 5 Bir Trapez Sac Plakasında Vida Kuvvetleri

2.4 Trapez Sac Kalıp Sistemlerin Mukavemet İhtiyacı

TSK sistemlerinin mukavemet ihtiyaçları Helwig ve Yura [9] tarafından bu sistemlerin kayma diyaframları gibi modellenmesiyle araştırılmıştır. Şekil 6'da Helwig ve Yura tarafından kullanılan kayma diyaframı modeli ve oluşan kuvvetler gösterilmektedir. Bu modelde kayma diyaframının sıklığı üç çubuk elemanından oluşan makaslarla modellenmekte ve yaklaşık olarak her üç makas bir sac plakaya denk gelmektedir. Ancak makaslar arasında bir bağlantı olmaması ve vidaların da ayrıca modellenememesi sebepleriyle bu model kullanılarak vida kuvvetleri doğrudan hesaplanamamaktadır. Helwig ve Yura [10]. vida kuvvetlerinin dolaylı yoldan hesaplanabilmesi için kiriş üst başlığına diyafram tarafından uygulanan birim moment (M'_{br}) için bir denklem geliştirmişlerdir:



Şekil 6 Helwig ve Yura'nın [9] Kayma Diyaframı Sonlu Elemanlar Modeli

$$M'_{br} = 0.001 \frac{M_u L C_r}{d^2} \quad (5)$$

Bu denklemde M_u = Kiriş etki eden moment; L = Diyaframla desteklenen kirişin boyu; C_r = Sağlanan sıklık/Gerekli sıklık oranına bağlı olan azaltım çarpanı; ve d = Kirişin derinliğidir. Ancak Eğilmez ve diğerleri [5] trapez sac kalıpların kabuk elemanlarla modellendiği bir sonlu elemanlar modeli kullanarak 5 numaralı denklemle hesaplanan vida kuvvetlerinin oldukça yüksek olduğunu göstermişlerdir.

3. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Trapez Sac Kalıp plakalarla desteklenmiş çelik köprü kirişlerin davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar programı ANSYS (2006) kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar çözümlerinin tutarlılığı çözümlene sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin temel özellikleri bu bölümde anlatılmaktadır.

3.1 Çelik I-Kirişler

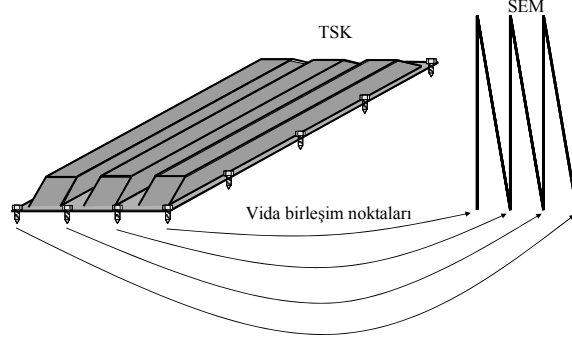
Çelik I-kesitler düzlem içi ötelenmelerin yanı sıra düzlem dışı eğilmeleri de modelleyebilen 8-düğüm noktalı dörtgen kabuk elemanlar tarafından modellenmiştir. Çözümlerinde doğrusal olmayan geometri ve elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Kabuk elemanlarda yüzlerin birbirine oranının 3'ten küçük olmasına özen gösterilmiştir.

3.2 Trapez Sac Kalıp Plakalar

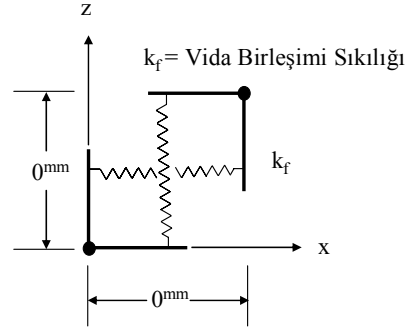
TSK plakaları kiriş üst başlığının yanal ötelenmesine kayma sıklıklarıyla direnç gösterirler. Bu yüzden de genel olarak kayma diyaframları olarak modellenmişlerdir. Bu çalışmada TSK plakaları Davies ve Bryan [3] tarafından önerilen bir kayma diyaframı modeliyle modellenmiştir. Bu modelde her bir plaka sac üç adet çapraz ve dört adet dik çubuk eleman içeren makaslarla modellenmiştir. Böylece her dik çubuğun iki ucuna vida modelleri yerleştirilebilmektedir. Şekil 7'de çelik köprü inşaatlarında sıklıkla kullanılan ucları kapalı tipik bir TSK plakası ve sonlu elemanlar modeli görülmektedir. Çapraz elemanların sayısı plaka uclarında kullanılan vida sayısına bağlı olarak değiştirilebilir. Bu çalışmada Eğilmez'in [4] deneylerinde kullanılan uclarında dörder vida bulunan sac plakalar modellenmiştir. Dik çubukların kayma sıklığına hiçbir katkısı yoktur. TSK sisteminin kayma sıklığı çapraz elemanların alanı değiştirilerek ayarlanmaktadır.

3.3 Vida Birleşimleri

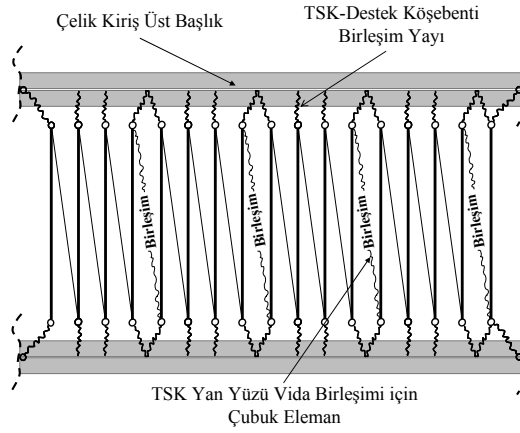
TSK'ler hem birbirlerine hem de kalıp uclarında destek köşebentlerine vidalarla bağlanırlar. Kalıp uclarındaki vida birleşimleri Şekil 8'de gösterildiği gibi boyutsuz yay elemanları olarak modellenmişlerdir. Bu elemanlar her iki yönde aynı sıklığa sahiptir. Sıklık değerleri Lutrell'in [14] önerdiği denklemlerle hesaplanmıştır. Bu yaylar bir taraftan kiriş üst başlığın orta düğüm noktasına diğer taraftan da sac kalıp modelinin Şekil 7'de gösterilen düğüm noktalarına bağlıdır.



Şekil 7 TSK, Sonlu Elemanlar Modeli ve Modelde Vida Birleşim Noktaları



Şekil 8 Sac Kalıp Uçlarında Kalıp-Destek Köşebenti Vida Birleşim Modeli



Şekil 9 Sonlu Elemanlar Modeli

Çelik Köprü I-Kirişlerine Yanal Destek Sağlayan Trapez Sac Kalıpların Mukavemeti

TSK plakalarının birbirlerine vidalandığı yan yüzlerindeki vida birleşimleri ise çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Çubuk eleman tüm sonlu elemanlar modelinin gösterildiği Şekil 9'da görüldüğü gibi her makas birleşim yerinde soldaki makasın üst sağ köşesinden sağdaki makasın alt sol köşesine uzanmaktadır. Çubuk elemanların sıklığı, birleşim yüzeyinde bulunan vidaların toplam sıklığına eşittir. Şekil 9'da makaslar birleşim yerlerinde birbirlerinden ayrı, yukarıda bahsedilen çubuk elemanlar çapraz, kalıp uclarındaki vida birleşimleri de boyutları varmış gibi gösterilmişlerdir. Ancak bu gösterim şekli sadece modelin daha kolay anlaşılması içindir. Gerçekte makas uçları ve vida birleşimleri kiriş üst başlığının tam ortasında, makasların birleşim yüzlerindeki dik çubuklarla yan yüzey vida birleşimi sıklığını modelleyen çubuklar üst üste bulunmaktadır.

3.3 Sonlu Elemanlar Çözümlerinin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar çözümlerinin doğrulaması çözümlerinin Eğilmez'in [4] bir burkulma deneyiyle karşılaştırılarak yapılmıştır. Sözü edilen burkulma Şekil 10'da deney düzeneği görülen bu deneyde TSK'lerle desteklenmiş iki adet 15 metre boyunda W760×134 köprü kirişi basit mesnetlerinden L/3 mesafelerinden yüklenmiş ve kirişleri burkulma davranışı izlenmiştir (L = kirişin boyu). Deneyde destek köşebentlerinin yumuşatıcı etkisini azaltmak için dört adet sıklık köşebenti Şekil 11'de görüldüğü gibi kullanılmıştır. Kullanılan sac kalıbın et kalınlığı 1.22 mm'dir.



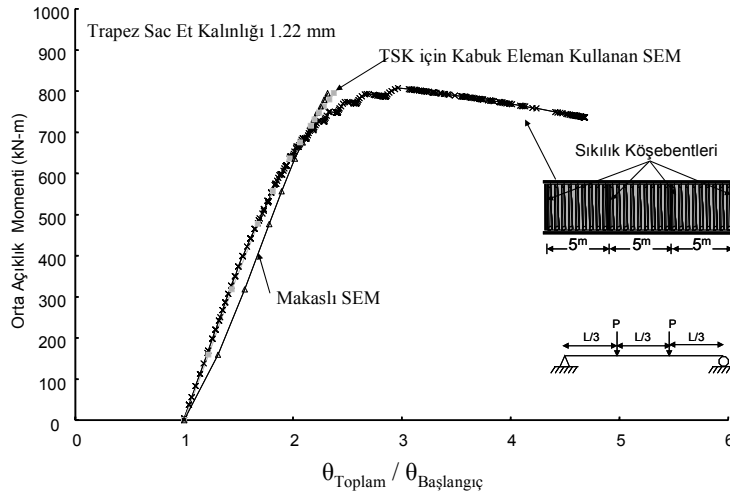
Şekil 10 Eğilmez'in [4] Deney Düzeneği

Şekil 11'de W760×134 kirişlerinden birinin burkulma davranışı hem bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar modelinin hem de daha önceki çalışmalarda kullanılan sac kalıbın kabuk elemanlarla modellendiği sonlu elemanlar modelinin [5] davranışıyla karşılaştırılmaktadır. Diğer kiriş de benzer bir davranış göstermiştir. Dikey ekseninde kirişin orta noktasına etki eden moment, yatay ekseninde de kiriş orta noktasındaki toplam dönme miktarının yine bu noktadaki başlangıç dönmesine oranı gösterilmektedir. Toplam dönme miktarı yüklenme öncesi kiriş çarpıklığı sebebiyle kirişte bulunan başlangıç dönme miktarı

ile yükleme neticesinde oluşan dönme miktarının toplamıdır. Şekil 11’de kabuk elamanların kullanıldığı modelin burkulma davranışının deney sonuçlarıyla neredeyse birebir örtüştüğü görülmektedir (elastik bölgede). Bu çalışmada kullanılan makaslı modelin burkulma davranışı ise deney sonuçlarıyla mükemmel olmasa bile iyi oranda örtüşmektedir (elastik bölgede). Ayrıca modelin sıklığının deney sisteminin sıklığından daha az olması vidalardaki kuvvetlerin olduğundan daha büyük hesaplanmasına sebep olacaktır.

Kullanılan her iki model de elastik malzemelerden oluştuğu için deneyde vida birleşimlerinin yüksek yüklerde akması sebebiyle gözlenen inelastik kısım sonlu elemanlar çözümlerinde gözlemlenmemektedir. Ancak bu, tasarım yöntemi geliştirilmesi aşamasında bir sorun teşkil etmeyecektir. Bunun sebebi TSK destek sistemlerinin inşa aşaması için, yani kirişlerin düşük gerilmeler altında oldukları durumlar için tasarlanacak olmalarıdır.

Şekil 11’de gözlenen bir başka bulgu da 210 MPa gerilmelerde (660 kN-m orta açıklık momenti) toplam dönmenin başlangıç dönmesine oranının 2 olduğudur. Kiriş kararlılığında ötelenmelerle ilgili genel kabul tasarlanan yükler sebebiyle oluşan dönmenin kirişin başlangıç dönmesini aşmaması gerektirir. Yani toplam dönmenin başlangıç dönmesine oranının 2 olmasıdır. Bu kabul göz önüne alındığında TSK sistemlerin kirişlere yeterli yanıl desteği sağladığı anlaşılmaktadır.



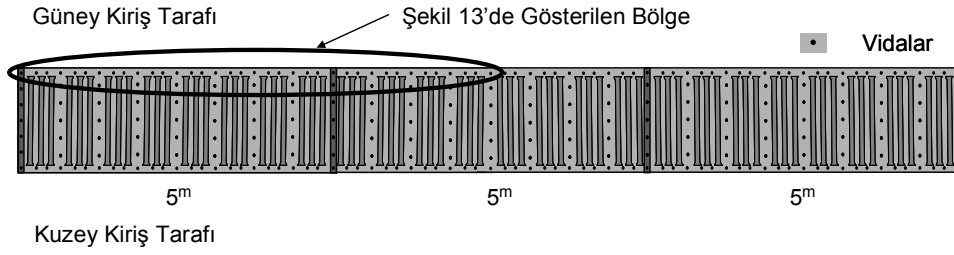
Şekil 11 Sonlu Elemanlar Çözümlerinin Eğilmez'in (2005) Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

4. BULGULAR

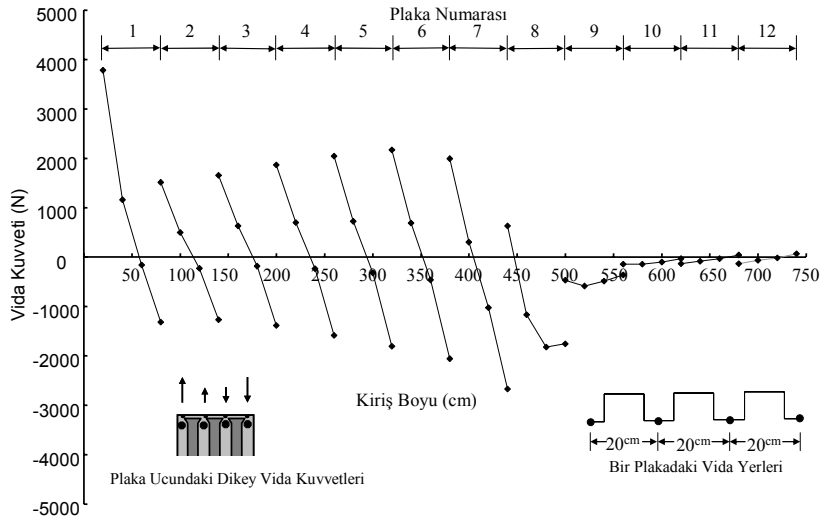
Bu bölümde makaslı sonlu elemanlar modeli (Şekil 9) çözümlerinden elde edilen vida kuvvetleri sunulacaktır. Daha önce de bahsedildiği gibi çelik köprü I-kirişleri, yanıl desteğe inşa aşamasında beton dökülürken ihtiyaç duyarlar. Bu aşamada kirişlerde oluşan gerilmeler genellikle 150-200 MPa aralığındadır. Yukarıda çözümlene sonuçları verilen

Çelik Köprü I-Kirişlerine Yanal Destek Sağlayan Trapez Sac Kalıpların Mukavemeti

W760×134 kiriş modelinde vida kuvvetlerine bu aralığın biraz üzerinde bir gerilmede, 210 MPa (660 kN-m orta açıklık momenti), bakılacaktır. Sadece kalıp uçlarında kalıp-destek köşebenti vida birleşimindeki dik kuvvetler gösterilecektir. Bu birleşimdeki yatay kuvvetler ile kalıp yan yüzleri vida birleşimindeki dikey kuvvetlere kritik olmadıkları için burada yer verilmemiştir.



Şekil 12 Kirişleri Destekleyen TSK'lerin ve Vida Bağlantılarının Planı



Şekil 13 Kalıp-destek Köşebenti Dikey Yöndeki Vida Birleşim Kuvvetleri

Şekil 12'de TSK'lerle desteklenmiş W760×134 kirişlerinin planı gösterilmektedir. Şekilde vidalar siyah noktalar olarak belirtilmiştir. Her kalıbın ucunda dört adet vida bulunmakta ve köşelerdeki vidalar iki kalıba birden tutturulmaktadır. Kalıp plakaların yan yüzlerinde kalıplar beşer vidayla birbirlerine bağlanmışlardır. 15 metrelik kiriş boyunca toplam 24 kalıp bulunmaktadır. Şekil 13'de güney kirişinin ilk yarısındaki kalıp-destek köşebenti vida kuvvetleri gösterilmiştir. Vida kuvvetleri orta açıklık itibarı ile simetriktir. Burada

gösterilen vida kuvvetleri dağılımında göze çarpan bulgu vida kuvvetlerinin mesnetten orta açıklığa doğru bir süre arttığı ardından daha düşük değerlerde sabit kaldığıdır. Bu dağılımın sebebi kiriş boyunun ilk çeyreğinde kayma ötelenmelerinin yüksek olması ve kalıpların da kayma ötelenmelerine maruz kalmalarıdır. Ancak orta açıklığa yaklaştıkça kayma ötelenmeleri de azalmakta, kalıplar şekil değiştirmeden yanal olarak ötelenmekte ve bu sebeple vida kuvvetleri düşmektedir. İlk kalıbın köşesindeki vidada yüksek bir kuvvet gözlenmiştir ve bunun sebebi araştırılmaktadır.

Vida birleşimlerinin mukavemeti Eğilmez [4] tarafından yapılan deneylerle ortaya çıkarılmıştır. Bu deneylere göre 1.22 mm kalınlığındaki bir sac kalıbın kalıp-destek köşebenti vida birleşimi mukavemeti 8417 N'dir. Görüldüğü gibi 210 MPa gerilme yaratan yükler altında vida birleşimlerinde oluşan kuvvetler bu değer kadar altındadır.

5. ÖZET VE SONUÇ

Bu çalışmada çelik köprü I-kirişlerine yanal destek sağlayan Trapez Sac Kalıp sistemlerinin vida birleşimindeki kuvvetler çubuk elemanlardan oluşan basit bir kayma diyaframı modeliyle hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar modelinin doğrulaması literatürdeki burkulma deneyleri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmanın ilerleyen safhalarında analitik çalışmalara devam edilecek ve TSK sistemlerinin mukavemet ihtiyacının belirlenmesi için bir yöntem geliştirilmeye çalışılacaktır.

Kaynaklar

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2004), Load and Resistance Factor Design (LRFD) Bridge Design Specifications, Third Edition, Washington, D.C.
- [2] Currah, R. M. (1993), "Shear strength and shear stiffness of permanent steel bridge deck forms," M. S. Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- [3] Davies J. M., and Bryan E. R. (1982). Manual of stressed skin diaphragm design, *John Wiley and Sons*, New York.
- [4] Eğilmez, O. Ö. (2005). "Lateral bracing of steel bridge girders by permanent metal deck forms," Ph.D Dissertation, University of Houston, Houston, Texas.
- [5] Eğilmez, O. O., Todd A. Helwig, and Reagan Herman. (2006a). "Strength requirements of permanent metal deck forms used for lateral bracing of steel bridge girders," Proceedings of the 2006 International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Instituto Superior Tecnico Press, Lisbon, Portugal, September 6-8, V. 2, 1045-1052.
- [6] Eğilmez, O. Özgür, Todd A. Helwig, and Reagan Herman. (2006b). "Stiffness requirements for metal deck forms used for stability bracing of steel bridge girders," Proceedings of the 2006 Annual Technical Session & Meeting, Structural Stability Research Council, San Antonio, Texas, February 8-11, 203-222.

Çelik Köprü I-Kirişlerine Yanal Destek Sağlayan Trapez Sac Kalıplarının Mukavemeti

- [7] Errera, S., and Apparao, T. (1976). "Design of I-shaped beams with diaphragm bracing," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 102(4), 769-781.
- [8] Helwig, T. A. and Frank, K. H. (1999). "Stiffness requirements for diaphragm bracing of beams," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 11, 1249-1256.
- [9] Helwig, T. A. and Yura, J. (2007). "Beam bracing behavior of shear diaphragm systems," Proceedings of Structural Stability Research Council Annual Stability Conference, New Orleans, Louisiana, April 18-21, 355-374.
- [10] Helwig, T. A. and Yura, J. (2008). "Shear diaphragm bracing of beams. II: Design requirements," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 134, No. 3, 357-363.
- [11] Helwig, Todd A., O. Özgür Eğilmez, and Charles A. Jetann. (2005). "Lateral bracing of bridge girders by permanent metal deck forms," Texas Department of Transportation Research Report Number 0-4145-1, January 2005.
- [12] Jetann, C. A. (2003). "Stiffness and strength of metal bridge deck forms with stiffened connection details," M. S. Thesis, University of Houston, May.
- [13] Luttrell, L. D. (1981). Steel deck institute diaphragm design manual, First Edition, Canton, Ohio.
- [14] Luttrell, L. D. (2004). Steel deck institute diaphragm design manual, Third Edition, Canton, Ohio, 2004.
- [15] Nethercot, D., and Trahair, N., "Design of diaphragm-braced I-beams," *Structural Division*, ASCE, Vol. 101(10), 1975, pp. 2045-2061.
- [16] Winter, G. (1958). "Lateral bracing of columns and beams," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 84, No. ST2, Proc. Paper 1561, 1-22.