

GÖMÜLÜ ESNEK ÇELİK YAPILARA GENEL BAKIŞ VE TÜRKİYE'DEKİ UYGULAMALARI ÜZERİNE ÖRNEK İNCELEMELER

OVERVIEW OF BURIED FLEXIBLE STEEL STRUCTURES AND CASE STUDIES ON THEIR APPLICATIONS IN TÜRKİYE

Baturalp ŞENTÜRK¹, H. Onur YONCA², Onur BAŞAR³

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, konvensiyonel menfez, alt geçit, üst geçit, tünel ve köprü yapılarına bir alternatif olarak sunulabilen, koruge çelik malzemenin teknik özellikleri açıklanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda uygulaması gerçekleştirilen örnek vaka analizleri sunulmuştur. AASHTO, Swedish Design Method (SDM) ve Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) standartları tarafından oluşturulmuş koşullar ile yapılan koruge çelik uygulaması inşaat yapıları arasında en çok kullanılan sanat yapılarının bir alternatifidir. Kalınlığı 3-12mm arasında olan çelik saca verilen ondülasyon ile üretilen plakalara daha sonra galvaniz uygulaması yapılmasıyla bahsi geçen yapılar montajlanarak sahada oluşturulmaktadır. Üretilen bu yapılar, ilgili projelerin gerekliliklerine göre daha spesifik saha uygulamalarda da kullanılabilir. Bu uygulamalara örnek olarak çığ koruması, kaya düşmesi, ekolojik köprü, sıvı tankları, hangarlar ve maden sahaları verilebilir. Sonuç olarak, bu çözümün en büyük getirisinin betonarme yapı elemanlarına göre çok hızlı bir şekilde sahada imal edilebilmesi, maliyet yönünden betonarmeye göre genellikle daha uygun olması, sürdürülebilir bir malzeme olması, esnekliği ve servis ömrünün uzun olması olarak özetlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: koruge çelik, maliyet, sanat yapısı, hidrolik, köprü

ABSTRACT

Within the scope of this study, the technical characteristics of corrugated steel material, which can be offered as an alternative to conventional culverts, underpasses, overpasses, tunnels, and bridge structures, are explained. The case studies of applied projects are presented. Applying corrugated steel with the conditions established by AASHTO, Swedish Design Method (SDM), and Canadian Highway Bridge Design Code (CHBDC) standards is an alternative to the most widely used engineering structures among the construction structures. The plates produced with the corrugation given to the steel sheet with a thickness between 3-12mm are then galvanized in the factory and the structures mentioned above are assembled and formed on-site. These structures can be used also more specific field applications according to the requirements of the relevant projects. Examples of these applications include avalanche protection, rockfall, ecological bridges, liquid tanks, hangars, and mine sites. As a result, it is summarized that the greatest benefits of this solution are that it can be applied on site very quickly compared to reinforced concrete structural elements, it is generally more cost-effective than reinforced concrete, steel is a sustainable material, it is flexible and has a long service life.

Keywords: corrugated steel, cost, engineering structure, hydraulic, bridge

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, ViaCon, baturalp.senturk@viacon.com.tr

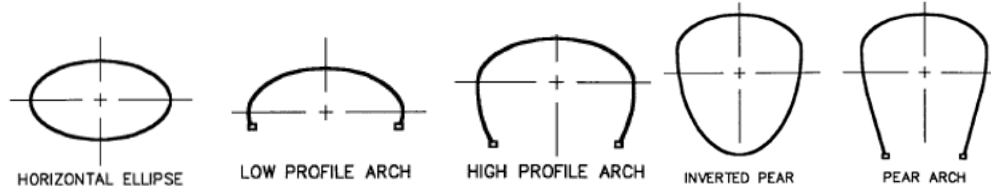
² İnşaat Yüksek Mühendisi, ViaCon, onur.yonca@viacon.com.tr (Sorumlu yazar) {Yazışma yapılacak yazar}

³ İnşaat Yüksek Mühendisi, ViaCon, onur.basar@viacon.com.tr

1. GİRİŞ

Geleneksel betonarme yöntemler inşaat sektöründe hayli geniş yer kaplamakta ve yeni teknolojilerin sektöre dahil olmasıyla birlikte ya gelişmekte ya da değişmektedir. Betonarmenin de bir bileşeni olan çelik ise, kendi endüstrisini bağımsız bir şekilde de sürdüren, doğaya betona göre çok daha saygılı, sürdürülebilir bir yapı malzemesi olmasının yanında kimi alanlarda betonun, betonarmenin, taşın veya ahşabın yerini çoktan almış ve hatta sektördeki gelişimini her geçen gün geliştirmektedir. Koruge çelik ise geoteknik uygulamalarında, levha çeliğin rijitlik parametrelerini arttırmak amaçlı olarak çelik saca verilen ondülasyonla belirli bir genlik ve derinlik değerleri belirlenerek üretilmektedir. Koruge çeliğin üretim ve sahada uygulanma detaylarını içeren metotlar başta ABD, Kanada ve İsveç ülkeleri tarafından geliştirilen şartnamelerle resmileştirilmiş ve bir kurallar sistemine bağlanmıştır.

Proje özelinde üretilen koruge çelik plakalar, sahada cıvatalarla monte edilerek tasarımda belirlenen şekli hazırlanmakta ve uygulama sahasına yerleştirilmektedir. Bu yöntem ile birlikte, hidrolik konuların geçerli olduğu veya sadece geçiş amaçlı kullanılacak olan ve istenilen açıklığa veya hidrolik debiye sahip çelik menfezler veya köprüler tasarlanabilmekte; otoyollarda veya demir yollarında, bisiklet geçişleri, üstgeçitler, alt geçitler, tüneller, depo alanları, hangarlar vb. ihtiyaç alanına göre birçok konu özelinde koruge çelikten kesitler oluşturulmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki çeliğin esnekliği yanında mukavemet özelliklerini koruyabilmesi için yapı açıklığının ve yapı üstündeki yüklemeye veya dolgu miktarının yapıya uygun ayarlanması, yapının en iyi şekilde çalışması için kritik bir öneme sahiptir (AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 2020). Bu noktada, analitik yöntemlerle kontrolü gerçekleştirilen yapının, detaylı çalışmaları sırasında PLAXIS 2D sonlu elemanlar programından faydalanılmaktadır. Şekil 1’de tipik enkesitler sunulmaktadır.

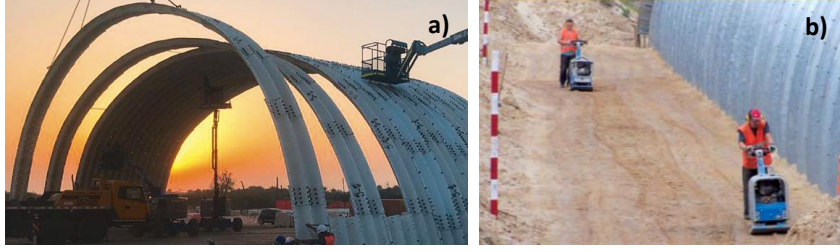


Şekil 1. Koruge çelik yapıların tipik enkesitleri (AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 2020)

2. KORUGE ÇELİK YAPILARIN ÇÖZÜMLERİNE AİT DETAYLAR

Koruge çelik yapısı projelendirmesi öncesinde, sahanın geoteknik değerlendirilmesinin yapılabilmesi adına zemin araştırmalarına ait veriler derlenir ve geoteknik çalışmalar gerçekleştirilir. Bu aşamada, yapı altında yapı, dolgu ve hareketli yükler sebebiyle oluşacak olan ilave gerilme artışından kaynaklı bir taşıma gücü veya oturma probleminin olup olmadığı kontrol edilir. Yapının servis performansını etkileyecek olumsuz bir durum oluşması durumunda zemin iyileştirmesi veya yapısal çözümler önerilir. Tamamen kapalı (rounded) veya açık yapılar olarak teşkil edilebilen çok plakalı koruge çelik yapılarda, yapının açık olarak tercih edilmesi durumunda temelleri yüzeysel veya derin temel olabilir. Derin temel seçimi, yukarıda açıklandığı gibi zeminde meydana gelen taşıma kapasitesi veya oturma problemlerinde tercih edilebilir. Koruge çelik yapılar teknik yeterlilikleri sağlamak adına farklı uygulamalara tabi olabilmektedirler. Bunlardan en temel olanı sac kalınlığıdır. Genellikle 3-12mm arasındaki kalınlıkta tercih edilen sac çelik kalınlıkları gerektiği zaman çift kat koruge çelik sacın üst üste montelenmesi ile kalınlaştırılabilir.

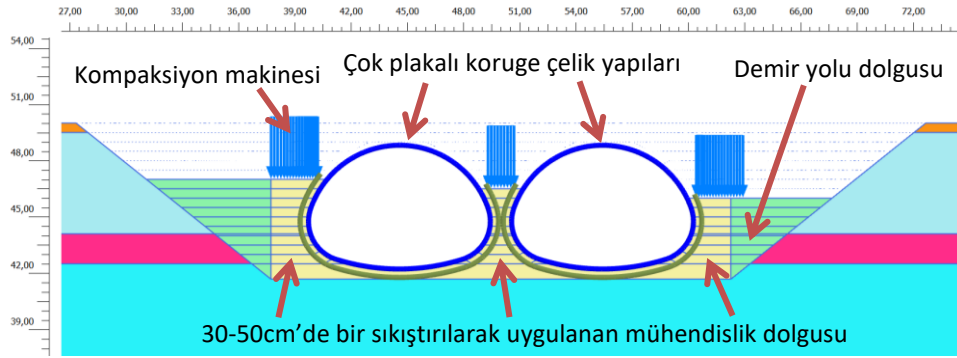
Koruge çelik yapısı oldukça ince bir kalınlığa ve kalınlığına oranla büyük boyutlara sahip olduğu için oldukça hassas davranmakta ve kolay bükülme davranışı göstermektedir. Bu narin ve esnek davranış, plakaların sahada montajlanması ve yapı çevresinin mühendislik dolgusuyla kaplanması durumunda uygulama zorluğu oluşturmaktadır. Bu durumlarda azami özen gösterilmelidir. Mühendislik dolgusu, yapının kenarlarından itibaren tepe noktasını belirli bir seviyede geçecek kadar uygulanır. Burada önemli olan noktalar, mühendislik dolgusunun şartnamelerde belirtilen zemin parametrelerine sahip olması, korugasyon derinliğine göre dane boyutlandırmasının doğru seçilmesi, 30-50cm kalınlıkta tabakalar halinde dökülüp bu tabakaların $I_s = \%85-100$ oranında sıkışmasını sağlamaktır (AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 2020). Şekil 2’de, yapının inşaat aşamasındaki plakaların bağlanma işlemi ve mühendislik dolgusu uygulaması sunulmaktadır.



Şekil 2. a) Plakaların bağlanması aşaması b) Mühendislik dolgusu uygulanması aşaması

3. ÖRNEK VAKA İNCELEMESİ-1

Bu bölümde, ilk iki bölümde açıklanan koruge çelik yönteminin uygulandığı proje örneği olarak Malatya-Diyarbakır Hattı KM:263+530 arasında yer alan Hasırcı demir yolu alt geçidi çalışmaları hakkında detaylar sunulmaktadır. Hasırcı alt geçidi, üstünden demir yolu geçecek ve tünellerin içinden araç geçişi yapılacak şekilde tasarlanmıştır. Bu proje kapsamında beklenen azami gabari yüksekliği ve yol genişliği değerlendirme altına alınmış ve kapalı bir kesit ile ilgili yeterlilikler sağlanmıştır. Yapının analizlerinde sonlu elemanlar programı olan PLAXIS 2D'den yararlanılmıştır. Analizler kademeli şekilde gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta arazinin geçici kazısı yapılmış, daha sonra sırasıyla koruge çelik yapının imalatı, mühendislik dolgularının ve demir yolunun imalatı, hareketli yük uygulaması ve pseudo-statik deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te yapının çevresindeki mühendislik dolgusu yapıldığı sıradaki görüntüye ait enkesit sunulmaktadır.



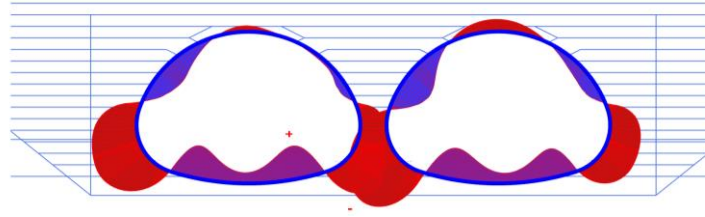
Şekil 3. Hasırcı alt geçidine ait dolgu çalışması (PLAXIS 2D)

Projelendirmedeki yapı detayları aşağıda sunulmaktadır:

- Projede kullanılan koruge çelik 7mm sac kalınlığına sahiptir. Bu kalınlığın yapı içinden 1mm kalınlıktaki kısmı, yapı servis ömrü boyunca uğrayacağı korozyon nedeniyle çalışma yetisini kaybedeceğinden rezerv pay olarak bırakılmış, boya uygulaması yapılmış ve yapılan analizlerde yapının servis ömrü olan 100 yıl sonra bile yapının kalan 6mm kalınlığındaki çelikle çalışmaya devam edeceği gösterilmiştir. Yapı kestane şekilli kesit olup açıklığı 9.56m, yüksekliği 6.46m, taban boyu 21.41m, tavan boyu 14.07m olarak belirlenmiştir. Çelik plakaların korugasyon boyutları 381x140mm olarak verilmektedir. Demir yolu dolgusunun yol kenarına 1H:1V eğimle dökülüyor olmasından dolayı, tüplerin giriş ve çıkış kısımları aynı eğimle bitirilmiştir. Yapı üstünden itibaren 0.92m kalınlığında bir mühendislik dolgusuyla balast alt kotuna kadar dolgu yapılması, yapının stabilitesi açısından yeterli görülmüştür. Yapı içerisinden araç geçişi için tasarlanan temiz açıklık 4.65x7m olarak planlanmıştır. Yapı altında bulunan Az Siltli Kumlu Çakıl biriminin yüksek mukavemetinden dolayı zeminde iyileştirmeye gerek duyulmamıştır. Zemine ait parametreler saha verileri doğrultusunda $E'=33 \text{ MPa}$, $c'=1 \text{ kPa}$, $\phi'=40^\circ$ olarak tespit edilmiştir.
- Analiz sonuçlarına göre kimi kritik durumlar, yapının iç stabilite sağlaması için değerlendirilmiştir. Yapının statik olarak en zorlandığı "peaking" (dolgunun yapı üst kotunu geçmediği son dolgu aşaması), demir yolunun tamamlandığı maksimum ölü yük ve hareketli yük durumlarından trenin etkisinin en çok hissedildiği durumlarda (hareketli yük sınıfı olarak LM71 yükleme modeli kullanılmış

ve yük kombinasyonları AASHTO’da belirtildiği şekilde uygulanmıştır), FEM analizinden elde edilen yükler ve kuvvetler çeliğin kendi dayanım kriterleriyle karşılanmıştır. Her iki tüp için de elde edilen sonuçlara göre, yapıların çalışma kapasitesi en kritik yükleme durumunda %66 olarak elde edilmiştir. Yapının deplasman değerleri de FEM sonuçlarında tespit edilmiş olup 4.13cm değerindeki deplasmanın, $0.02xD$ (yapı açıklığı) (CHBDC 7.6.5.2, 2019) değerinin ve demir yolu dolgularında izin verilebilen maksimum 5.00cm deplasman sınırının içinde kaldığı görülmüştür (TCDD, 2021).

- İç kuvvet kontrollerinde, yapının burkulma mukavemeti, plaka çeper dayanım mukavemeti, plaka bağlantısında kullanılan cıvatalara gelen kuvvetler ve yapının eğilme mukavemetine bakılmıştır. Şekil 4’te yapılara etkiyen $50kNm/m$ moment değerine karşılık $520kN/m$ değerinde aksel kuvvet değeri, en kritik durumda (hareketli yükün iki yapı arasında konumlandığı anda) oluşmakta ve yapıda eğilme davranışı meydana getirdiği gösterilmiştir.



Şekil 4. Yapıların maksimum moment anında eğilme davranışı

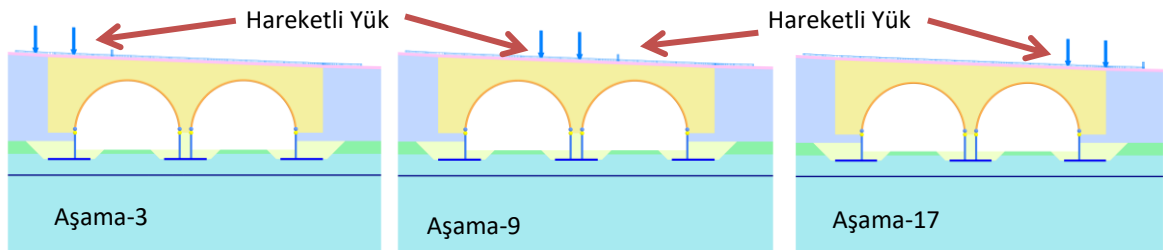
Şekil 5’te Hasırcı alt geçidinin uygulama öncesi ve sonrasında çekilmiş fotoğrafları sunulmaktadır.



Şekil 5. Hasırcı alt geçidinin önceki ve mevcut hali

4. ÖRNEK VAKA İNCELEMESİ-2

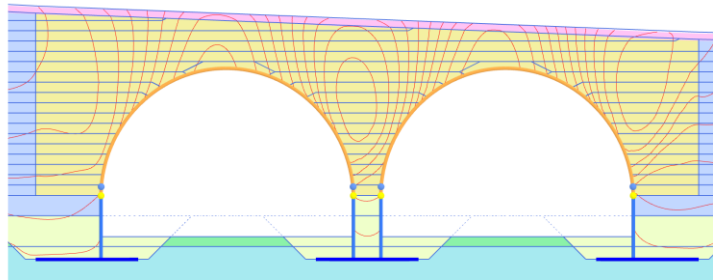
Bu bölümde, koruge çelik yönteminin uygulandığı ikinci bir proje örneği olarak Viranşehir çevre yolu projesi KM:2+000.834’te yer alan Viranşehir köprüsü çalışmaları hakkında detaylar sunulmaktadır. Viranşehir köprüsü üstünden karayolu geçecek şekilde Çırçır (Dubali) Deresi üzerinde tasarlanmıştır. Bu proje kapsamında nehirdeki taşkın debisi dikkate alınarak yeterli alanı sağlayacak genişlikte bir kesit seçilmiş ve açık bir kesit (üç adet betonarme temelli) ile ilgili yeterlilikler sağlanmıştır. Yapının analizlerinde sonlu elemanlar programı olan PLAXIS 2D’den yararlanılmıştır. Analizler kademeli şekilde gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta betonarme temeller imal edilmiş, daha sonra sırasıyla koruge çelik yapının imalatı, mühendislik dolgularının ve karayolunun imalatı ve hareketli yük uygulaması analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6’da yapının üzerinden hareketli yük geçişi sırasındaki aşamaya ait enkesit sunulmaktadır.



Şekil 6. Viranşehir köprüsüne ait sıralı hareketli yük uygulaması (PLAXIS 2D)

Projelendirmedeki yapı detayları aşağıda sunulmaktadır:

- Projede kullanılan koruge çelik, 7mm sac kalınlığına sahiptir. Bu kalınlığın yapı içinden 1mm kalınlıktaki kısmı, yapı servis ömrü boyunca uğrayacağı korozyon nedeniyle çalışma yetisini kaybedeceğinden rezerv pay olarak bırakılmış ve yapılan analizlerde yapının servis ömrü olan 100 yıl sonra bile yapının kalan 6mm kalınlığındaki çelikle çalışmaya devam edeceği gösterilmiştir. Betonarme temellere monte edilen açık kesit koruge çelik yapıların açıklığı 12.45m, yüksekliği 7.96m, taban ve tavan boyu 47.84m olarak belirlenmiştir. Çelik plakaların korugasyon boyutları 381mm x 140mm olarak verilmektedir. Yapıların girişi ve çıkışı 90° olarak tasarlanmıştır. Köprü üstündeki yolun eğiminden dolayı analizler minimum ve maksimum dolgu yüksekliklerine göre yapılmıştır. Bu yükseklikler sırasıyla 1.30m ve 2.70m olarak belirlenmiştir. Yapı altından akan derenin debisine göre (Veriler DSİ GAP 15. Bölge Müdürlüğü'nden alınmıştır) yapı ıslak alanı belirlenmiş ve $A=81.55m^2$ yeterli görülmüştür. Yapının üstüne serilen ve yapı bölgesini kaplayan HDPE geomembran ve çift kat geotekstil ile yukarıdan gelen sular dışarıdaki drenaj borularına aktarılmakta ve mühendislik dolgusunun içine yerleştirilen drenaj borularıyla da ekstra drenaj önlemleri alınmaktadır. Gerekli görülmesi halinde, plakaların birleşim yerlerinin uygun yapı kimyasalları ile kaplanmasıyla sızdırmazlık sağlanabilmektedir.
- Yapı altında bulunan Ayrışmış Bazalt biriminin yüksek mukavemetinden dolayı zeminde iyileştirmeye gerek duyulmamıştır. Zemine ait parametreler saha verileri doğrultusunda $E'=385 \text{ MPa}$, $c'=120 \text{ kPa}$, $\phi'=20^\circ$ olarak tespit edilmiştir.
- Örnek Vaka-1'de bahsedilen kritik durumlar bu projede de değerlendirilmiştir. Hareketli yük sınıfı olarak H30-S24 kamyon yükleme modeli kullanılmış ve yük kombinasyonları AASHTO'da belirtildiği şekilde uygulanmıştır. FEM analizinden elde edilen yükler ve kuvvetler çeliğin kendi dayanım kriterleriyle karşılanmıştır. Her iki yapı için de elde edilen sonuçlara göre, yapıların çalışma kapasitesi en kritik yükleme durumunda %87 olarak elde edilmiştir. Yapının deplasman değerleri de FEM sonuçlarında tespit edilmiş olup 1.43cm değerindeki deplasmanın, $0.02xD$ (yapı açıklığı) (CHBDC 7.6.5.2, 2019) değerinin ve karayolu dolgularında izin verilebilen maksimum 76mm deplasman sınırının içinde kaldığı görülmüştür (Farnsworth vd., 2008). FEM sonuçlarında temel oturmaları da dikkate alınmakta olup, zeminin oturma davranışı için gerekli çalışmalar yapılmakta ve elde edilen oturma değerlerinin yapıya ve duruma göre yapı üstündeki yola etkisi de değerlendirilmektedir. Nihai durumda yapının rölatif oturma değerlerine bakarak yukarıda bahsedilen deplasman kriterleri göz önünde bulundurulmaktadır.
- İç kuvvet kontrollerinde, yapının burkulma mukavemeti, plaka çeper dayanım mukavemeti, plaka bağlantısında kullanılan cıvatalara gelen kuvvetler ve yapının eğilme mukavemetine bakılmıştır. Açık yapılarda yapı-zemin arasında oluşan pozitif kemerlenmenin etkisiyle ölü ve hareketli yüklerin doğrudan tabana aktarıldığı ortaya çıkmaktadır. İlgili görsel Şekil 7'de sunulmaktadır. Yapıların temel tabanında oluşan en büyük gerilme 396kPa değerinde olup, bu değer en kritik durumda (hareketli yükün iki yapı arasında konumlandığı anda) oluşmaktadır. Yapılan geoteknik değerlendirme sonucunda zeminin taşıma kapasitesi 745kPa olarak belirlenmiştir. Zeminde taşıma gücü ve oturma problemleri beklenmemektedir.



Şekil 7. Yapılarda oluşan pozitif kemerlenme durumu

Şekil 8'de Viranşehir köprüsünün uygulama sonrasında çekilmiş fotoğrafları sunulmaktadır.



Şekil 8. Viranşehir köprüsünün mevcut hali

5. SONUÇLAR

Çok plakalı koruge çelik yapılar inşaat sektöründe son zamanlarda küçük ve büyük sanat yapılarının yerine kullanılmaya başlanmaktadır. Geleneksel betonarme yapılara göre çoğu zaman maliyet ve zaman avantajıyla koruge çeliklerin sektörde yayılımı son derece hızlı şekilde ilerlemektedir. Bu bildiri kapsamında koruge edilmiş çeliğin teknik detayları açıklanmış; uygulamaya dayalı olarak ise iki adet örnek vaka analizleri sunulmuştur. Bu vaka analizlerinde görüldüğü üzere koruge çelik yapılarda doğru yapı kalınlıkları, açıklıklar, yükseklikleri, gerekli ise ıslak alanları, yapı üstünden yeterli dolgu kalınlığı seçilmesi durumunda statik bir problem gözlemlenmemiştir. Yine yapılar gerekliliğe veya tasarımcının tercihine göre açık kesit olup betonarme/çelik temellere monte edilebilir veya kapalı kesit tercih edilip temel ihtiyacı ortadan kaldırılabilir. Koruge çelik yöntemiyle, geleneksel betonarme sanat yapılarına göre, özellikle büyük yapılarda, %30-40 seviyelerinde daha az maliyetli yapılar imal edilebileceği, sahada imkanı varsa demir yolu veya karayolu trafiği hiç kesilmeden imalatların yapılabileceği, prefabrikasyon avantajı sayesinde sahada çok hızlı imalat yapılabileceği, 32m açıklıklara kadar yapıların imal edilebileceği genel çalışmalarla ortaya koyulmuştur. Bunun yanı sıra sistemin dezavantajları arasında 25 m açıklıktan fazla açıklıklarda uygulanmasının zorluğu, etrafında Bölüm-2’de ifade edilen özelliklerde nitelikli bir dolguyu zorunlu kılması, proje kısıtlarının büyük genişlikli ve düşük yükseklikli yapı gerektirdiği durumlarda kemerlenme davranışının sağlanamaması gibi tasarım zorlukları sayılabilir. Bu durumda, yapım kolaylığı ve hızı gibi genel giderlere olumlu ekonomik getiri sağlayacak konular göz önünde bulundurulmadığı takdirde, sistem konvansiyonel sistemlere kıyasla daha yüksek maliyetli olmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu bildiri de aktarılan projelerin içerik sahibi ve tüm veri hakları kendinde saklı olan ViaCon Group şirketine, tasarımda emeği geçen M.Sefa Apaydın, H.Arda Sarıgöl, Selcan Alan, Gözde Gerçek ve Şeyma Nur Keçebaş’a, pazarlamada, üretimde ve uygulamada emeği geçen diğer tüm ViaCon Türkiye çalışanlarına teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR

- Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO (2020), “LRFD Bridge Design Specifications”, 9th Edition, ISBN: 978-1-56051-738-2.
- Canadian Standards Association CSA Group (2019), “Canadian Highway Bridge Design Code CHBDC”, Edition of CSA S6:19, ISBN: 978-1-4883-1414-8.
- Farnsworth, C. B., Bartlett, S. F., Negussey, D., Stuedlein, A. W. (2008), “Rapid Construction and Settlement Behavior of Embankment Systems on Soft Foundation Soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134:3(289).
- Pettersson, L., Sundquist, H. (2014), “Design of Soil Steel Composite Bridges”, KTH Royal Institute of Technology, 5th Edition, ISSN: 1103-4289.
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları TCDD (2021), “Jeolojik-Jeoteknik, Geoteknik Proje, Rapor ve Paftalarda Dikkat Edilecek Hususlar”, TCDD Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.