

Enerji İletim Direklerinde Kullanılmak Üzere Lif Takviyeli Polimer Kompozit Kutu Profillerden Oluşan Konsollar Geliştirilmesi

Development of Cross-Arms from Fiber Reinforced Polymer Composite Square Tube Sections for Use in Overhead Power Transmission Towers

Burak Talha Kılıç¹, Eray Baran², Elif Köse³, Serap Cılız⁴

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
bkilic@metu.edu.tr

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
erayb@metu.edu.tr

³MİTAŞ Kompozit San. Tic. A.Ş.
ekose@mitascomposites.com

⁴MİTAŞ Yatırım A.Ş.
sciliz@mitastower.com

Özet

Cam lifli takviyeli polimer (CLTP) polimer malzemeler sahip oldukları üstün mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri sayesinde enerji nakil hattı direk yapılarında konvansiyonel çelik malzemesine karşı ciddi bir alternatif oluşturmaktadır. Direk yapısının tamamı bu tür malzemeden imal edilmiş profillerle üretilebileceği gibi, ihtiyaca bağlı olarak direklerin yalnızca konsol kısımları da kompozit profillerden üretilerek çelik direk gövdesine sabitlenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, enerji iletim direkleri için tam ölçekli CLTP konsollar üretilmiş ve mekanik yükleme altında test edilmiştir. Önerilen konsol, pultrüzyon tekniği ile polyster reçine ve cam lifleri kullanılarak üretilmiş ve 100x100mm kare kesite sahip üç adet CLTP kutu profil elemanından oluşturulmuştur. Kompozit elemanlar arasındaki bağlantılar çelik plaka ve civatalar ile sağlanmaktadır. Konsol tasarımı, 154kV havai iletim hattının bir parçası olan durdurucu tipi bir prototip direk dikkate alınarak yapılmıştır. Mekanik yükleme testleri sonucunda, tasarlanan konsolun yeterli yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Elektrik İletim Direkleri, Lif Takviyeli Polimer, Kompozit Konsol

Abstract

Fiber reinforced polymer (FRP) composite materials offer an alternative for conventional steel material in power transmission towers due to their superior mechanical, chemical and electrical properties. Depending on the condition, members produced from

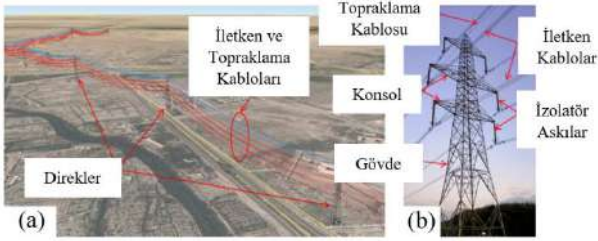
such composite materials can either be used for the production of the entire tower structure or composite cross-arms can be used together with a steel tower body. The present study is on the design, fabrication and full-scale mechanical testing of glass fiber reinforced polymer (GFRP) cross-arms to be used as part of energy transmission towers. The proposed cross-arm is composed of three GFRP tube members of 100x100mm square cross section. The GFRP profiles were fabricated from polyster resin and glass fibers by using pultrusion method. Connection between the composite members is provided by steel attachments and bolts. The cross-arm design is based on a tension type prototype tower that is part of a 154kV overhead transmission line. The test results showed that the cross-arm design has sufficient load carrying capacity.

Keywords: Overhead Transmission Line, Fiber Reinforced Polymer, Composite Cross-Arm

1. Giriş

Ülkemizde ve dünyada enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Nüfus artışı, yeni yerleşim yerlerinin kurulması, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler enerji artışı sebeplerinden bazıları olarak sayılabilmektedir. Günümüzde elektrik enerjisi nükleer, hidroelektrik veya termik santraller ile son yıllarda yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilmektedir. Temel olarak üretilen bu elektrik enerjisi, belirli aşamalardan geçerek nihai olan tüketiciye ulaştırılmaktadır. Bu temel süreçler içerisinde elektrik iletim ve dağıtım hatları önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye ve dünya genelinde

elektrik iletim hatlarının neredeyse tamamı, dağıtım hatlarının ise önemli bir kısmı havai hatlardan oluşmaktadır. Örnek bir havai enerji nakil hattı planlaması Şekil 1a'da gösterilmiştir. Havai hatlar günümüzde genellikle konvansiyonel çelik elemanlar kullanılarak oluşturulmuş çelik direkler arasında gerdirilmiş iletken kablolar ile oluşturulmaktadır. Enerji nakil hatlarında kullanılan konvansiyonel çelik direkler temel olarak 4 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; direk gövdesi, direk konsolları, iletken kablolar ve izolatör askılar (Şekil 1b). Direk gövdesi direklerin ana taşıyıcısını oluşturmaktadır ve genellikle çelik köşebentlerden oluşmaktadır. Direk konsolları ise hat yönünde iletken kabloların sabitlemesine olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda iletken kabloları direk gövdesine yeterli uzaklıkta tutarak elektrik enerjisinin direk gövdesine atlamasını engellemektedir. İzolatör askı setleri ise iletken kablolarla direk konsolları arasında elektrik izolasyonu sağlamak üzere kullanılmaktadır.



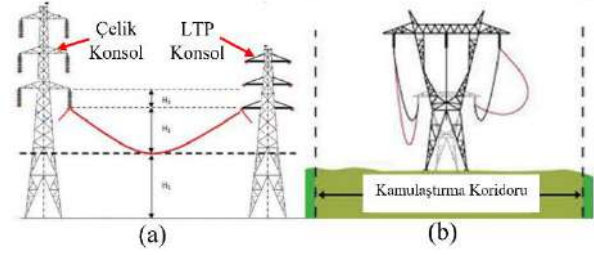
Şekil 1. (a) Enerji nakil hattı planlaması örneği; (b) Enerji nakil hattı direğinin temel bileşenleri

Günümüzde lif takviyeli polimer (LTP) kompozit malzemeler farklı sektörlerde çok sayıda uygulamada çelik malzemesine alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Karakteristik özellikleri bakımından LTP kompozit malzemelerin konvansiyonel çeliğe göre bazı avantajları bulunmaktadır. Kompozit malzemeler yüksek yük taşıma kapasitesinin yanı sıra düşük ağırlığa sahiptir. Çelik malzemelerde sıklıkla karşılaşılan yorgunluk ve kimyasal ataklara karşı, kompozit malzemeler yüksek durabiliteye sahiptir. Bu özelliklerinin yanı sıra düşük elektrik iletkenliği de dikkate alındığında LTP kompozit malzemelerin enerji nakil hattı direk yapılarında kullanımı oldukça büyük potansiyele sahiptir.

LTP kompozit malzemelerden üretilmiş profillerin enerji nakil hattı direk yapılarının tamamında veya konsol kısımlarında kullanılması ile direk ve konsol uzunlukları önemli seviyede kısalabilmekte ve hat için gerekli kamulaştırma koridoru daralabilmektedir (Şekil 2a, 2b). LTP kompozit malzemenin düşük elektrik iletkenliği sayesinde iletken kablolar nispeten kısa izolatör askı setleri kullanılarak konsol uçlarına sabitlenebilmektedir. Bu durumda, izolatörler salınımı azalacağından, direk üzerinde hat açması vakaları da azalabilecek ve nakil hattının güvenilirlik seviyesinde iyileşme elde edilebilecektir. LTP kompozit malzemelerin bahsedilen bu avantajları yeni yapılacak hatlarda kullanılacak direklerin yanı sıra mevcut hatlarda halen kullanılmakta olan direkler için de geçerlidir. Örneğin, mevcut direklerde konvansiyonel çelik profillerden üretilmiş konsolların LTP kompozit konsollarla değiştirilmesi

durumunda hatta kapasite artışı sağlanabilecek ve/veya hattın güvenilirlik seviyesi geliştirilebilecektir.

Bu çalışmada, pultrüzyon tekniği ile üretilmiş cam lifi takviyeli polimer (CLTP) kompozit kutu profiller kullanılarak 154 kV bir iletim hattı durdurucu direği için konsol yapısı tasarlanmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında tam ölçekli CLTP kompozit konsollar kritik yükleme durumları altında mekanik olarak test edilmiş ve performans değerlendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 2. (a) LTP kompozit konsol ve konvansiyonel çelik konsol uygulamalarının karşılaştırılması; (b) Nakil hattı kamulaştırma koridor genişliği

2. Literatür İncelemesi

Literatürde LTP kompozit profillerin enerji nakil hatlarında kullanımı ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar genel olarak malzeme testleri, komponent yükleme testleri, bağlantı testleri ve sayısal analizleri içermektedir.

Godat ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada cam lifi takviyeli polimer kompozit malzemeden üretilmiş farklı kesitler, eksenel basınç altında test edilmiştir (2013). Selvaraj ve diğerleri tarafından pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş CLTP elemanların kullanıldığı çapraz örgülü direklerin bir panelini temsil eden küçük ölçekli bir model üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir (2012). Alipour ve diğerleri tarafından yapılan sayısal çalışmada, 270 km uzunluğa sahip enerji iletim hattında bulunan direk konsollarının, silikon-kompozit izolatörler ile değiştirilerek 230 kV'dan 400 kV'a artırılması irdelenmiştir (2007). Vergara-Vazquez ve diğerleri, 400 kV kapasiteye sahip enerji iletim direklerinde kullanılan sıfır çubuklarının LTP profiller ile değiştirilerek, direk davranışını doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir (2019). Rao ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada bacakları 60 derecelik CLTP köşebent profilden, çapraz gergileri ise 90 derecelik CLTP köşebent profilden üretilmiş ve üçgen plana oturan üç adet telekomünikasyon kulesi üzerinde detaylı bir deneysel inceleme gerçekleştirilmiştir (2017). Wu ve diğerleri tarafından 500 kV kapasiteye sahip enerji iletim direklerinde kullanılmak üzere kompozit konsol tasarlanmış ve deneysel incelemesi gerçekleştirilmiştir (2020). Yapılan çalışmada kullanılan konsol iki adet yatay konumlandırılmış CLTP boru profil ve bir adet çapraz çelik halat izolatörden oluşturulmuştur. Literatüre bulunan bu çalışmalar LTP kompozit elemanların enerji nakil hattı ve telekomünikasyon direklerinde

kullanılmaları durumunda önemli faydalar elde edilebileceğini göstermektedir. Bunun yanında, mevcut çalışmaların silikon-izolatör konsol tasarımlarını ve direklerde kullanılmak üzere tasarlanan LTP elemanları kapsadığı görülmektedir. LTP kompozit elemanlardan oluşturulmuş ve bağlantı detaylarını içeren konsol yapıları üzerine çalışmaların eksikliği dikkat çekmektedir.

3. CLTP Kompozit Konsol Tasarımı

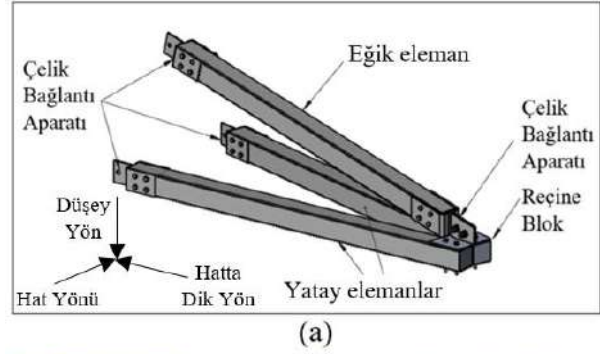
Çalışma kapsamında incelenen konsol CLTP kompozit malzemeden üretilmiş kutu profillerden oluşmaktadır. Tek yönde (0° boyuna yönde) cam lifleri kullanılarak pultrüzyon tekniği ile üretilmiş olan kompozit profiller 100x100 mm kare kesite ve 6 mm et kalınlığına sahiptir. Profillerde 0° haricindeki yönlerde rijitlik ve dayanım sağlamak üzere iç ve dış yüzeylerde ilave keçe takviyesi yapılmıştır. Üretim sonrası profillerden alınan küçük ölçekli numuneler üzerinde eksenel çekme testleri yapılmış ve eksenel çekme dayanımı 473 MPa, elastisite modülüsünün 31.2 GPa olarak belirlenmiştir.

Şekil 3a'da görüldüğü üzere, konsol yapısı iki yatay ve bir eğimli olmak üzere toplam üç adet kompozit elemandan oluşmaktadır. Kompozit elemanların kendi aralarındaki ve elemanlarla direk gövdesi arasındaki bağlantılar çelik aparatlar aracılığıyla sağlanmaktadır (Şekil 3b). Bu bağlantı aparatları kompozit elemanlara M12 çelik cıvatalarla sabitlenmiştir. Çelik bağlantı aparatlarının kompozit elemanlara sabitlendiği bölgelerde kompozit elemanlara takviye sağlamak üzere bu elemanların içerisine reçineden üretilmiş bloklar yerleştirilmiştir. Bu sayede, kompozit elemanların uçlarında bağlantı aparatlarını sabitlemek için kullanılan M12 cıvataların torklanması esnasında kompozit malzeme üzerinde oluşması muhtemel çatlama ve ezilmelerin kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, bu blokların kompozit profillere yapıştırılması ile bağlantı bölgesinin yük taşıma kapasitesi de artırılabilir. Konsol numunelerinin tamamında çelik bağlantı aparatları kompozit profillere sabitlemek için kullanılan tüm cıvatalara 30 N.m tork değerinde öngerme uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen kompozit konsol yapısının tasarımı, 154 kV bir enerji iletim hattı durdurucu direğinin 1770 mm uzunluğundaki orta konsolunu temel almaktadır (Şekil 4). Konsol yapısının servis ömrü boyunca maruz kalacağı kuvvetlerin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla "Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) Yönetmeliği" ve "TEİAŞ 154 kV Proje Teknik Şartnamesi" dikkate alınmıştır.

Direklerin maruz kalacağı buz ağırlığı, buzlu ve buzsuz rüzgâr yükleri, iletkenlerin buzlu ve buzsuz çekme durumları ile iletkenlerin farkı senaryolarda kopma durumlarını içeren çok sayıda yüklem kombinasyonu dikkate alınmıştır. Dikkate alınan yüklem kombinasyonları altında prototip direğin konsol ucuna etki eden yükler Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu yükler

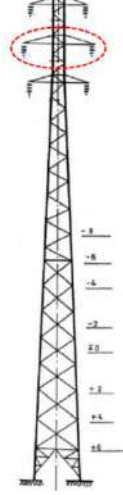
altında konsol elemanlarında oluşacak maksimum çekme ve basma kuvvetlerini belirlemek amacıyla sonlu elemanlar programı olan SAP2000 programı kullanılmıştır. Programda oluşturulan sayısal analiz modeli Tablo 1'de belirtilen 12 adet yüklem kombinasyonu altında incelenmiştir. Tabloda gösterilen toplam 12 adet yüklem durumundan her biri direğin servis ömrü boyunca maruz kalacağı bir duruma karşılık gelmektedir. Örneğin, Yükleme-E buz ile kaplanmış iletken üzerine hatta dik yönde rüzgâr etkimesi durumunu, Yükleme-F ise komşu direkler arasındaki iletkenin kopması durumunu temsil etmektedir. Dikkate alınan bu yüklem durumları arasında konsol elemanlarında en yüksek kuvvetleri oluşturan yüklem kombinasyonlarının "F" ve "H" yüklemeleri olduğu belirlenmiştir. Bu yüklemeler tabloda "Kritik Yüklem #1" ve "Kritik Yüklem #2" olarak belirtilmiştir. Kritik Yüklem #2 konsol yapısının bir yatay elemanında maksimum eksenel basma kuvveti, Kritik Yüklem #1 ise konsol yapısının eğik elemanında maksimum eksenel çekme kuvveti oluşturmaktadır.



Şekil 3. (a) Tasarlanan kompozit konsolun üç boyutlu görüntüsü; (b) Konsol uç bölgesi bağlantı detayı; (c) Konsol mesnet bölgesi bağlantı detayı

Enerji nakil hattı tasarımı için ülkemizde kullanılmakta olan yönetmelik ve şartnamelerde yapısal tasarım "Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT)" yöntemine göre yapılmaktadır. Bu tasarım yaklaşımında yük değerlerinin artırılması ve eleman dayanımlarının azaltılması ayrı ayrı yapılmayıp, tasarımdan bulunan bütün belirsizlikler ve güvenlik seviyesi tek bir güvenlik katsayısı ile temsil edilmektedir. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) Yönetmeliği ve TEDAŞ YG Dağıtım Hatları Proje Teknik Şartnamesinde belirtilen 1.5 güvenlik katsayısı dikkate alındığında konsol yapısının güvenli olarak taşıması gereken yük değerlerinin belirlenmesi için Tablo 1'de verilen yüklerin 1.5

katsayısı ile arttırılması gerekmektedir. Kritik Yükleme #1 ve Kritik Yükleme #2 için hesap edilen bileşke yükler sırasıyla 2530 kgf ve 2705 kgf'dur. Güvenlik faktörü dahil edildiğinde deneysel çalışmalarda hedeflenen minimum bileşke yük seviyeleri sırasıyla 3795 kgf ve 4060 kgf olmaktadır.



Şekil 4. Konsol tasarımı için dikkate alınan direğin sematik görüntüsü

Tablo 1. Farklı yükleme kombinasyonları altında konsol ucuna etki eden yükler

Yükleme No	Hatta Dik Yön (kgf)	Hat Yönü (kgf)	Düşey Yön (kgf)
Yükleme-A	-820	0	-1760
Yükleme-B	820	0	-1760
Yükleme-C	-820	0	-910
Yükleme-D	820	0	-910
Yükleme-E	-540	0	-2470
Yükleme-F (Kritik Yükleme #2)	90	2060	-1750
Yükleme-G	-90	2060	-1750
Yükleme-H (Kritik Yükleme #1)	540	0	-2470
Yükleme-J	-540	0	-2470
Yükleme-K	-510	750	-2290
Yükleme-L	510	750	-2290
Yükleme-M	0	0	-2470

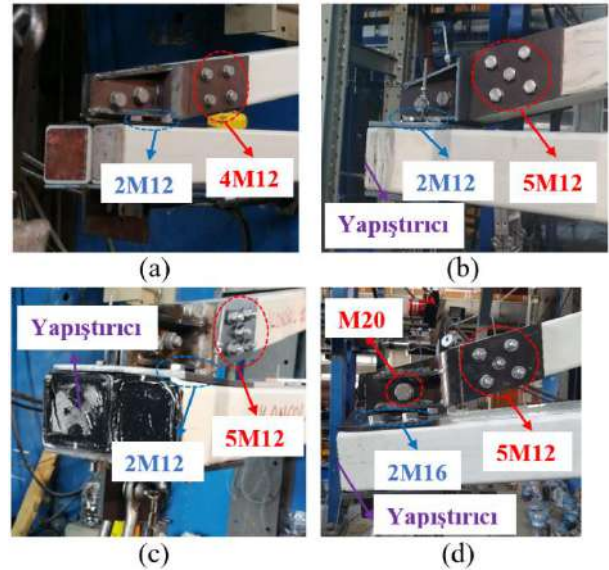
4. CLTP Kompozit Konsol Yükleme Testleri

Deneysel çalışma kapsamında, dört adedi Kritik Yükleme #1 ve iki adedi Kritik Yükleme #2 altında olmak üzere toplam altı adet tam ölçekli kompozit konsol testi yapılmıştır. Bu testler için Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında bir yükleme düzeneği hazırlanmış ve konsol numuneleri bu düzeneğe sabitlenerek yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında konsol ucunda uygulanan yük bir adet 5 ton kapasiteli yük

hücre ile, konsol uç bölgesinde oluşan yer değiştirme deplasman ölçer ile izlenmiştir. Ayrıca, kompozit eleman uçlarında kullanılan çelik bağlantı aparatları ile kompozit elemanlar arasındaki cıvatalı bağlantılarda oluşan kayma deformasyonları da ilave deplasman ölçerlerle izlenmiştir.

Çalışma kapsamında test edilen konsol numunelerinin özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Tabloda belirtildiği üzere, Kritik Yükleme #1 altında Konsol#1, Konsol#2, Konsol#3 ve Konsol#6 numuneleri, Kritik Yükleme #2 altında ise Konsol#4 ve Konsol#5 numuneleri test edilmiştir.

Kritik Yükleme #1 altında test edilen numunelerden Konsol#1 numunesinde eğik elemanın alt ve üst ucunda dörder adet M12 cıvata kullanılmış, yatay elemanlar ise ikişer adet M12 cıvata yardımı ile alt uç bağlantı plakasına sabitlenmiştir (Şekil 5a). Konsol#2 ve Konsol#3'te ise Konsol#1 numunesinden farklı olarak eğik elemanın uç bağlantı bölgelerinde kullanılan M12 cıvata sayısı dörtten beşe çıkarılmıştır (Şekil 5b ve 5c). Aynı zamanda, yine Konsol#1 numunesinden farklı olarak, kompozit elemanların uçlarında kullanılan reçine blok ilave mukavemet sağlanması amacıyla bu elemanların içerisine epoksi bazlı yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Bu amaçla kullanılan kimyasal yapıştırıcının kurlenme teknikleri Numune#2 ve Numune#3'te farklılık göstermektedir. Konsol#6 numunesinde, davranışı geliştirmek amacıyla bazı bağlantı detayı değişiklikleri uygulanmıştır. Eğik elemanın alt ucunu bağlantı aparatına bağlamak için kullanılan iki adet M16 cıvata bir adet M20 cıvata ile değiştirilmiştir (Şekil 5d). Aynı şekilde, yatay elemanların uç kısımlarında kullanılan M12 cıvataları M16 cıvatalarla değiştirilmiştir. Kompozit elemanların mesnet bağlantıları için beşer adet M12 cıvata kullanılmış ve Numune#3'te kullanılan kurlenme tekniği ile reçine bloklar kompozit elemanlara yapıştırılmıştır.



Şekil 5. Kritik Yükleme #1 altında test edilen konsol numuneleri: (a) Konsol#1; (b) Konsol#2; (c) Konsol#3; (d) Konsol#6

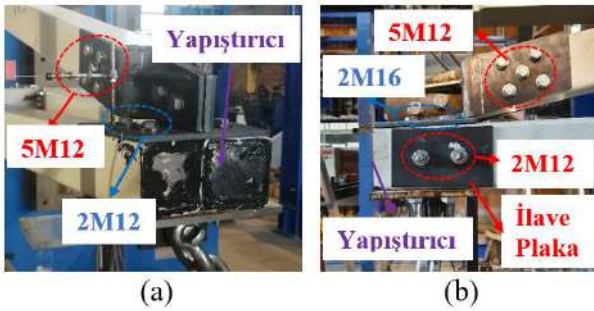
Tablo 2. Konsol numunelerinde kullanılan bağlantı detayları

Numune #	Kritik Yükleme #	Eğik Eleman		Yatay Elemanlar		Reçine Blok Yapıştırması	İlave Revizyon
		Eleman Alt Uç Bağlantısı	Eleman Üst Uç Bağlantısı	Konsol Uç Bağlantısı	Mesnet Uç Bağlantısı		
Konsol#1	#1	4M12	4M12	2M12	4M12	Yok	Yok
Konsol#2	#1	5M12	5M12	2M12	4M12	Var ⁽¹⁾	Yok
Konsol#3	#1	5M12	5M12	2M12	4M12	Var ⁽¹⁾	Yok
Konsol#4	#2	5M12	5M12	2M12	4M12	Var ⁽¹⁾	Yok
Konsol#5	#2	5M12	5M12	2M16	4M12	Var ⁽¹⁾	Var ⁽²⁾
Konsol#6	#1	5M12	5M12	2M16	4M12	Var ⁽¹⁾	Var ⁽³⁾

(1) Konsol#2 ve Konsol#3'te aynı tür yapıştırıcı fakat farklı küreme teknikleri kullanılmıştır. Konsol#3, Konsol#4, Konsol#5 ve Konsol#6 aynı reçine blok revizyonunu içerir.

(2) Yatay elemanlar konsol uç bağlantı aparatına ilave olarak iki adet çelik plaka M12 civata yardımı ile sabitlenmiştir.

(3) Eğik elemanın konsol uç bölgesi çelik bağlantı plakasına iki adet M16 yerine bir adet M20 civata ile sabitlenmiştir.

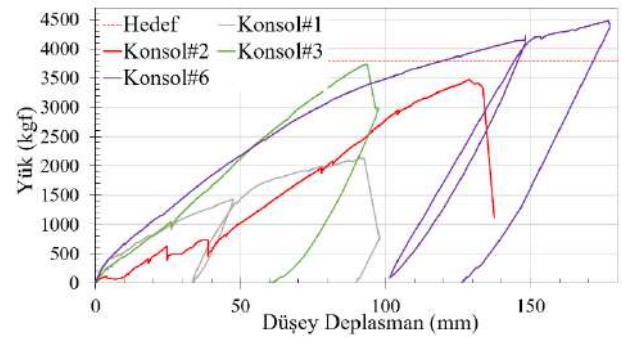


Şekil 6. Kritik Yükleme #2 altında test edilen konsol numuneleri: (a) Konsol#4; (b) Konsol#5

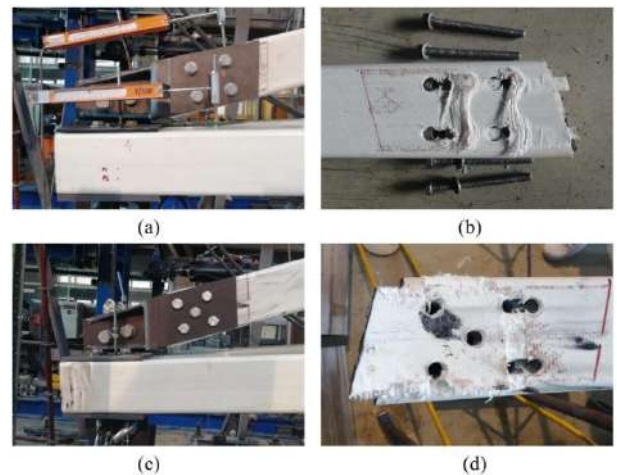
Kritik Yükleme#2 altında test edilen iki numuneden biri olan Konsol#4 daha önce açıklanan Konsol#3 ile tamamen aynı bağlantı detaylarına sahip iken diğer numune olan Konsol#5'te davranışı iyileştirmek amacıyla bazı bağlantı bölgesi revizyonları uygulanmıştır (Şekil 6a ve 6b). Konsol#5'te yatay elemanların uç bölgesine ilave olarak iki adet çelik plaka ikişer adet M12 civata yardımı ile sabitlenmiştir. Aynı zamanda, konsol uç kısmında bulunan çelik bağlantı plakasını yatay elemanlara sabitlemek için iki adet M12 civata yerine iki adet M16 civata kullanılmıştır (Şekil 6b).

Kritik Yükleme#1 altında test edilen konsol numunelerinde konsol ucunda ölçülen düşey yöndeki deplasmanın numuneye uygulanan bileşke yük ile değişimi Şekil 7'de gösterilmektedir. Daha önceden bahsedildiği üzere, bu yükleme durumu için hedef yük değeri $2530 \times 1.5 = 3795$ kgf'dur. Konsol#1'de 2130 kgf yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Ulaşılan bu yük değeri hedef yük seviyesinin %56'sına karşılık gelmektedir (Tablo 3). Konsol yapısını oluşturan elemanlarda oluşan hasar durumu Şekil 8'de gösterilmektedir. Eğik eleman alt ucunda kesme kuvveti kaynaklı civata delikleri çevresinde yırtılmalar oluşmuştur (Şekil 8b). Bu şekildeki hasar sonucunda çelik bağlantı aparatı ile kompozit eleman arasında göreceli kayma oluşmuştur (Şekil 8a). Aynı zamanda,

konsol uç bölgesinde bulunan çelik plakada eğilme deformasyonu gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Kritik Yükleme#1 altında konsol numunelerinin yük-deplasman grafikleri



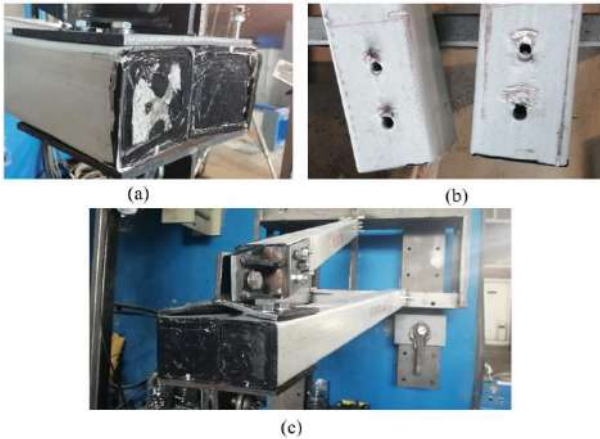
Şekil 8. Kritik Yükleme#1 altında elemanlarda oluşan hasarlar: (a), (b) Konsol#1; (c), (d) Konsol#2

Numuneler üzerinde uygulanan bağlantı revizyonları sonucunda Konsol#2 ve Konsol#3'te sırasıyla 3475 kgf ve 3735 kgf yük değerlerine (%92 ve %98 kapasite/hedef oranlarına ulaşılmıştır). Diğer bir deyişle, Konsol#1 ve

Konsol#3 numuneleri dikkate alındığında, bağlantı bölgesinde reçine blok ile kompozit eleman arasında güçlü aderans oluşturulması ve bir adet M12 civatanın eklenmesi yük taşıma kapasitenin %75 oranında artmasını sağlamıştır. Kompozit eleman ve reçine blok arasında sağlanan aderans, konsol elemanı bağlantı bölgesinde cıvata delikleri etrafında ilave kesme kuvveti dayanımı kazandırmıştır. Konsol#2 testinde, 3475 kgf kuvvetine ulaşıldığı anda eğik elemanın alt ucunda cıvata delikleri çevresinde ezilme ve yırtılma oluşmuştur (Şekil 8d). Kompozit eleman üzerinde bağlantı bölgesinde meydana gelen ezilme ve yırtılmalar sonucunda çelik bağlantı aparatı ile kompozit eleman arasında oluşan kayma Şekil 8c'de gösterilmiştir. Konsol#1 ve Konsol#2'den farklı olarak, Konsol#3'te eğik elemanın alt ve üst ucunda herhangi bir hasara rastlanmazken, yüksek basma kuvveti altında kalan yatay elemanların cıvata delikleri çevresinde ezilmeler oluşmuştur (Şekil 9b). Aynı zamanda, reçine blok ve kompozit eleman arasında kayma meydana gelmiş ve kompozit elemanın köşe noktalarında yırtılmalar oluşmuştur (Şekil 9a). Kritik Yükleme #1 altında test edilen son numune olan Konsol#6 numunesinde yük taşıma kapasitesinin hedef yükün %18 üzerinde olduğu görülmüştür. Bu numunede 4480 kgf yük değerine ulaşıldığında eğik ve yatay elemanlarda gözle görülür herhangi bir hasara rastlanmamıştır. Konsol ucunda bulunan çelik bağlantı plakasında eğilme deformasyonu gözlemlenmiştir (Şekil 9c).

Tablo 3. Konsol numunelerinin deney sonuçları

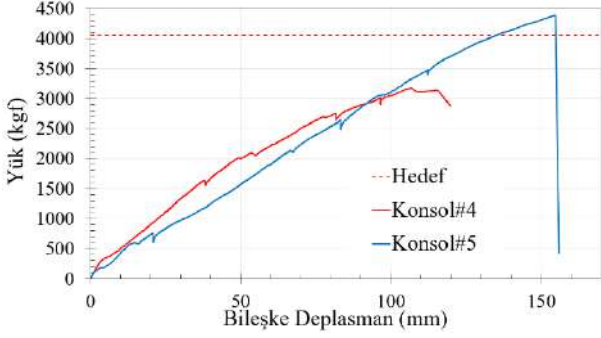
Numune#	Kritik Yükleme #	Hedef Yük (kgf)	Yük Kapasitesi (kgf)	Kapasite/Hedef
Konsol#1	#1	3795	2130	56%
Konsol#2	#1	3795	3475	92%
Konsol#3	#1	3795	3735	98%
Konsol#4	#2	4060	3175	78%
Konsol#5	#2	4060	4380	108%
Konsol#6	#1	3795	4480	118%



Şekil 9. Kritik Yükleme#1 altında elemanlarda oluşan hasarlar: (a), (b) Konsol#3; (c) Konsol#6

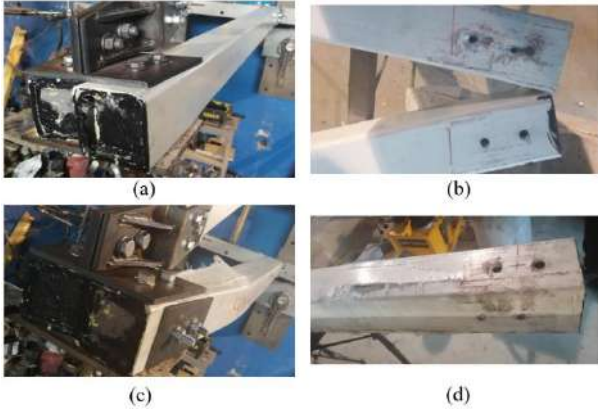
Kritik Yükleme#1 altında yüksek basma kuvveti etkisi altında olan yatay elemanlarda çelik bağlantı aparatlarını kompozit profillere sabitlemek için kullanılan civataların sayısının ve çapının artırılması konsol yapısının yük taşıma kapasitesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Davranışta oluşan bu iyileşmenin sebebi cıvata etrafında kompozit elemanların ezilme ve yırtılma dirençlerinin artmış olmasıdır. Aynı zamanda, yatay elemanların ucunda çelik aparatlar arasındaki bağlantının iki adet M16 civatadan bir adet M20 cıvataya dönüştürülmesi konsol uç bağlantısını zorlayan ilave momenti ortadan kaldırarak bu bölgede dönme hareketini serbest hale getirmiştir. Konsol#6'da oluşan davranış iyileşmesinin bir sebebi de bu şekilde serbest hale gelen dönme hareketidir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, reçine bloğun kompozit elemanlara yapıştirılarak oluşturulan numunelerde (Konsol#3 ve Konsol#6), yük kapasitesinin yanı sıra başlangıç rijitliğinin de diğer numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Son olarak, kapasite/hedef oranı nispeten yüksek olan Konsol#3 ve Konsol#6 dikkate alındığında yükleme sonunda meydana gelen kalıcı deformasyon sırasıyla 60 mm ve 123 mm olarak ölçülmüştür.

Kritik Yükleme#2 altında test edilen iki konsol numunesinin yük-deplasman grafikleri Şekil 10'da verilmiştir. Konsol#4 ve Konsol#5'te ölçülen maksimum yük değerleri, $2705 \times 1.5 = 4060$ kgf hedef yükün sırasıyla %78'i ve %108'ine karşılık gelmektedir. Bu yükleme durumunda eğik elemana kritik olmayacak seviyede çekme kuvveti etki ederken, yükleme yönünde olan yatay eleman çok yüksek seviyede basma kuvvetine maruz kalmaktadır. Konsol#4 3175 kgf yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Deney sonunda basma etkisi altında olan yatay elemanda cıvata delikleri etrafında ezilme ve yırtılmalar gözlemlenmiştir (Şekil 11b). Ayrıca, elemanın köşe noktalarında yoğun gerilme dağılımı kaynaklı gövde-flanş arasında kırılmalar oluşmuştur (Şekil 11a). Aynı elemanda, yapıştirılarak eleman içerisine yerleştirilmiş olan reçine blokta bir miktar kayma meydana gelmiştir. Konsol#5 4380 kgf yük taşıma kapasitesine ulaşarak hedeflenen yük değerinin %8 üzerine çıkmıştır. Yüksek basma kuvvetine maruz kalan yatay elemanda M12 civataların M16'ya yükseltilmesi aynı zamanda iki adet M12 cıvata eklenmesi, kapasite artışına doğrudan katkı sağlamıştır. Aynı zamanda, ilave olarak yerleştirilen çelik plakalar, dayanıma katkıda bulunarak, bu bölgede oluşması muhtemel, ezilme, yırtılma ve gövde-flanş ayrılmasını engellemiştir. Bu konsol testinde yük taşıma kapasitesini belirleyen hasar tipinin, basma kuvveti etkisinde olan yatay elemanda meydana gelen burkulma olduğu görülmüştür (Şekil 11c, 11d).



Şekil 10. Kritik Yükleme#2 altında konsol numunelerinin yük-deplasman grafikleri

Çalışma kapsamında toplam altı adet konsol numunesi test edilmiş olup bağlantı bölgesinde yapılan değişikliklerin konsol yapısının davranışı üzerine olan etkisi detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Yapılan konsol deneylerinin yük taşıma kapasiteleri ve kapasite/hedef oranlarını Tablo 3'te özetlenmiştir. Kritik Yükleme#1 altında Konsol#6 numunesi hedef yük seviyesinin %18 üzerine çıkararak yeterli performans göstermiştir. Benzer şekilde, Konsol#5 numunesi Kritik Yükleme#2 altında hedef yük seviyesinin %8 üzerine çıkararak yeterli yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, kompozit elemanların bağlantı bölgelerinde kullanılan cıvata sayısı ve çapının artırılması ile, bağlantıların kuvvet kapasitesinin arttığı ve konsol yapısının mekanik performansının iyileştiği görülmüştür. Ayrıca, kompozit elemanların uç bölgelerinde reçine blokların kompozit elemanların içerisine yüksek kesme mukavemetine sahip yapısal yapıştırıcı ile yapıştırılmasının, konsol yapısının yük taşıma kapasitesini önemli seviyede arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 11. Kritik Yükleme#2 altında elemanlarda oluşan hasarlar: (a), (b) Konsol#4; (c), (d) Konsol#5

5. Sonuçlar

LTP polimer malzemeler sahip oldukları üstün mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri sayesinde enerji nakil hattı direk yapılarında konvansiyonel çelik malzemesine karşı ciddi bir alternatif oluşturmaktadır. Direk yapısının tamamının bu tür malzemedan imal edilmiş profillerle üretilebileceği gibi, ihtiyaca bağlı olarak direklerin yalnızca konsol kısımları da kompozit profillerden üretilerek çelik direk gövdesine sabitlenebilmektedir.

LTP kompozit profillerden üretilmiş konsolların enerji nakil hattı direklerinde kullanımı ile izolatör boylarının yanı sıra konsol boyları ve direk yükseklikleri de azaltılabilecektir. Bu sayede, yeni yapılacak hatlar için kamulaştırma koridoru genişliği azalabilecek veya mevcut hatlardaki direklerde konvansiyonel çelik profillerden üretilmiş konsolların LTP kompozit konsollarla değiştirilmesi durumunda hatta kapasite artışı sağlanabilecek ve/veya hattın güvenilirlik seviyesi geliştirilebilecektir. Bu çalışmada, CLTP kompozit kutu profiller kullanılarak 154 kV bir iletim hattı durdurucu direği için konsol yapısı tasarlanmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Tam ölçekli CLTP kompozit konsol numuneleri üzerinde kritik yükleme durumları kullanılarak yapılan mekanik yükleme deneyleri, özellikle kompozit elemanların uç bölgelerinde kullanılan cıvatalı bağlantıların konsol yapısının mekanik performansını önemli seviyede belirlediğini göstermiştir. Bu bağlantılarda uygulanan iyileştirmeler sonucunda konsol yapısının performansı iyileştirilmiş ve gerekli yük kapasitesi seviyelerine ulaşılabilmektedir.

6. Kaynaklar

- Alipour, H. J., Aminnejad, S., & Jazaeri, M. (2007, April). "Decreasing the Right of Way of transmission lines by using towers with polymer insulation arms". In 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (pp. 571-576). IEEE.
- Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) Yönetmeliği, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2000.
- Godat, A., Légeron, F., Gagné, V., & Marmion, B. (2013). "Use of FRP pultruded members for electricity transmission towers". *Composite Structures*, 105, 408-421.
- Rao, N. P., Rokade, R. P., & Balagopal, R. (2017). "Failure investigation of GFRP communication towers". *Engineering Failure Analysis*, 79, 397-407.
- Selvaraj, M., Kulkarni, S. M., & Babu, R. R. (2012). "Structural evaluation of FRP Pultruded Sections in overhead transmission line Towers". *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 2(3), 943-949.
- Vergara-Vazquez, J. C., Ramirez-Vazquez, I., Hernandez-Valdez, A., Hernandez-Corona, R., Brito-Luisillo, A., & Ponce-Noyola, D. (2019). "Replacing steel members with composite members on transmission towers". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 172(1), 26-40.
- Wu, K., You, Q., Gu, X., & Peng, Y. (2020, March). "Experimental Research of Mechanical Behaviour of GFRP Cross Arm of 500kV Transmission Tower". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 774, No. 1, p. 012100). IOP Publishing.

154 kV Proje Teknik Şartnamesi, TEİAŞ Genel Müdürlüğü Enerji İletim Hatları Proje ve Tesis Dairesi Başkanlığı.