



## HTLS İLETKENLERİN TEKNOEKONOMİK ANALİZİ

Yiğit AKYOL, Altuğ BOZKURT\*

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

HTLS İletkenler,  
Konvansiyonel İletkenler,  
Sıcaklık,  
Sehim,  
Maliyet.

### Öz

Yüksek gerilim iletkenleri, enerji talebinde göz önünde bulundurulması gereken en önemli unsurlardandır. Günümüzde elektrik enerjisine karşı artan talep, güç sistemlerinde kayıp artışı, hat kapasitelerinin yetersizliği, sehim vb. sorunları meydana getirmektedir. Bu sorunları çözümlerin birkaç yolu bulunmaktadır. Çözümlerden biri ise, günümüzde kullanılan konvansiyonel iletkenleri, Yüksek Sıcaklık Düşük Sehimli (HTLS) iletkenlerle değiştirerek, iletkenlerde sarkma (sehim) miktarını minimuma indirmek ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen HTLS iletkenler üzerinden daha fazla akım iletimi sağlanarak, mevcut durumdan daha fazla akım taşıma kapasitesi elde etmeyi amaçlamaktadır. Fakat bu işlemi yapmadan önce bir de bunun maliyet tarafı ele alınmalıdır. Bu çalışmada, konvansiyonel iletkenler ile HTLS iletkenler teknik ve ekonomik açıdan incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara baktığımızda da HTLS iletkenlerin teknik ve maliyet açısından birçok konuda konvansiyonel iletkenlere göre daha avantajlı olduğu görülmüştür.

## TECHNOECONOMIC ANALYSIS OF HTLS CONDUCTORS

### Keywords

HTLS Conductors,  
Conventional Conductors,  
Heat,  
Sag,  
Cost.

### Abstract

High voltage conductors are one of the most important elements to be considered in energy demand. The demand of electrical energy increases day by day, unfortunately it creates some problems (power loss, insufficient line capacities, sag etc.) on power systems. However, there is some methods to solve these problems. One of these methods is to minimize the amount of sag in the conductors by replacing the conventional conductors used with High Temperature Low Sag (HTLS) conductors. In addition, it aims to obtain more current carrying capacity than the current situation by providing more current transmission over HTLS conductors that can operate at higher temperatures. But, the installation of new line costs should be considered before decide to do it. In this study, conventional conductors and HTLS conductors are examined in terms of technical and economic terms. In terms of the results obtained, HTLS conductors have been found to be more advantageous in terms of technical and cost than conventional conductors.

### Alıntı / Cite

Akyol, Y., Bozkurt, A., (2022). HTLS İletkenlerin Teknoekonomik Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(3), 1128-1140.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Y. Akyol, 0000-0001-6096-5216  
A. Bozkurt, 0000-0001-6458-1260

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	20.02.2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.03.2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	18.05.2022
Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2022

### 1. Giriş (Introduction)

Dünya çapında artan nüfus sayısı ve yeni teknolojik gelişmeler, enerji talebini giderek arttırmakta (Albizu vd., 2005) ve enerji talebi 2050 yılında yaklaşık olarak iki katına çıkması öngörülmektedir (World Energy Outlook[WE0], 2021). Türkiye'ye baktığımızda ise TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi)'ın yayınladığı rapora göre, enerji talebi önümüzdeki 10 yıllık planlamada %3,8 artması beklenmektedir (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi[TEİAŞ], 2021). Bu enerji talebini karşılamada Türkiye'de ve daha birçok yerde fosil yakıtlar

\* İlgili yazar / Corresponding author: abozkurt@yildiz.edu.tr, +90-212-383-5834

günümüzde önemli bir ham maddedir. Fakat dünyaca ünlü bir akaryakıt şirketinin yaptığı araştırmaya göre dünya genelinde yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payı %10,3'ten %11,7'ye çıkarken, kömürün payı 1,3 puan düşerek %35,1 olarak açıklanmıştır. Bu oran, kömürün yıllardan sonra elektrik üretimi payındaki en düşük seviye olarak gözükmemektedir (British Petroleum[BP], 2021). Bu durum, yenilenebilir enerjinin ileri de fosil yakıtların sağladığı enerji arzından pay alabileceğini göstermektedir [Riba vd., 2020]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantı noktalarından çok uzakta ve dağınık biçimde bulunması şebekeye entegrasyonu konusunda problemler yaratmaktadır [Barrios vd., 2017]. Fosil yakıtlarla ilgili bir konuya daha değinmek gerekirse fosil yakıtla çalışan araçların yerini de yavaş yavaş elektrikli araçların alacak olması enerji talebinde bir artışa neden olacaktır (World Energy Outlook[WEO], 2021; Zheng vd., 2019).

Ülkemizde mevcut iletkenlerin ilk kullanıma tarihine bakıldığında 1950'li yıllarda karşımıza çıkmaktadır ve bu yıllarda ülkenin sadece %33'üne elektrik verilebilmektedir (Karabay vd., 2003; Özal, 2022). Bu da gösteriyor ki, bu yıllarda elektrik kullanımı daha yaygınlaşmamıştı. Büyük oranda hatların kurulumu ve mevcut iletkenlerin kullanımı yaklaşık olarak 30-40 sene önceye dayandığından dolayı, mevcut iletkenlerin kullanım ömrünü tamamlamak üzere olduğu ve yakın zamanda değişmesi gerektiğini göstermektedir (Beryozkina, 2019). Ülkemiz komşu ülkelerle enerji alışverişinde bulunmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2022). Bu nedenle mevcut iletkenlerin, yeni iletkenlerle değişmesi ve Avrupa kıtasına ve çevre ülkelere enerji alışverişi açısından entegre olmamız için yeni hatların kurulması önem arz etmektedir (Barrios vd., 2017). Fakat günümüzde yeni hatların kurulum hızı, elektrik enerjisi üretimindeki artışla maalesef paralel gidememektedir. Bundan dolayı yeni hat kurulması yerine mevcut iletkenin değiştirilmesi zaman ve maliyet açısından daha karlı olacaktır (Capelli vd., 2017; Capelli vd., 2016). Günümüzde enerji iletiminin havai hatlar yerine yer altı kablolarıyla yapılması durumunda maliyetler 3-10 kat arasında değişmektedir. Bu nedenle havai hatlar ile enerji iletimi daha ekonomik olmaktadır (Riba vd., 2020; Kishore ve Singal, 2014; Ghassemi, 2019). Ama havai hat kurmak da sanıldığı kadar kolay ve maliyetsiz bir yatırım değildir. En çok enerji talep eden yerler insan sayısının fazla olduğu yerlerdir (Kumar ve Rahangdale, 2018). Bu da yerleşimin sık olduğu yerlerde havai hat kurulmasını zorlaştırmaktadır ve maliyet açısından daha yüksek olsa da yeraltından kabloları götürmek daha kolay olmaktadır (Kumar ve Rahangdale, 2018). Havai hat kurulmaya çalışırken yasal ve çevresel açıdan da birtakım sorunlar ortaya çıkmaktadır. Uygun arazi bulunması, istiklal ve uygun hava koşulları gibi birçok etmen ortaya çıkmaktadır (Beryozkina, 2019; Capelli vd., 2016; Kishore ve Singal, 2014; Saudeger, 2017). Uzun yıllar önce yazılmış şartnamelerin ve mevzuatların değişmesi ve lisans (Filippone, 2014) alımlarının kolaylaşması gerekmektedir. Bu gibi yasal veya yasal olmayan pürüzlerden dolayı bir hattın kurulup devreye alınması sürecine kadar 10 yıldan daha fazla bir süre geçebilir ve yatırımcılar açısından bu süre pek tercih edilmeyebilir (Albizu vd., 2005; Zamora vd., 2001).

Artan talebe karşılık verebilmek için iki yöntemden biri olan, hat inşası, günümüz şartlarında yatırımcıları oldukça zorlamakta ve zorunlu kalmadıkça yatırım yapılmamaktadır. İkinci yöntem ise, mevcut hatların iletkenlerinin güç iletim kapasiteleri artırılmış yeni iletkenlerle değiştirilmesi daha avantajlı gözükmemektedir (Pirovano vd., 2014). Mevcut güç hatlarının iletim kapasitelerini artırmak için, mevcut yapılarda en az değişiklik (maliyet ve işçilik açısından) yaparak gerilimi veya akımı ya da her ikisini de yükselterek bu elde edilebilmektedir (Ardelean vd., 2011). Bu çözümler haricinde akım taşıma kapasitesini artırarak da mevcut hatların daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla akım iletilmesi sağlanabilmektedir (Shivashankar, 2017). Fakat iletim hatlarının güç iletim kapasitesini etkileyen faktörler vardır. Bunlar kontrolsüz güç akışı sınırı, kararlılık ve termal (ısı) sınırıdır (Bağrıyanık, 2000; Gorur vd., 2014; Arcia-Garibaldi vd., 2018). Termal sınır, sehim (sarkma) ve iletkenin tavlansıyla ilgili olduğu için bu hattın uzun ve güvenli çalışmasını da etkilemektedir (Karimi vd., 2018; CTC Global, 2022). Termal sınır aşıldığında mevcut iletkende bulunan alüminyum telleri tavlama nedeniyle dolayı, sünekliği artma ve sertliği azalma eğilimine girmektedir ve bu da toprak ile iletken arasında oluşan mesafeyi azaltmakta yani sehimi olumsuz yönde etkilemektedir (CTC Global, 2022; Kıstı, 2016; Rahman ve Kopsidas, 2018). Bundan dolayı çalışma sıcaklığı arttıkça iletkenin ve sıcaklıktan etkilenen diğer elemanların (izolatör gibi) kullanım ömrü azalmakta, iletkenin sarkması artmakta ve güç kayıpları gibi etkiler ortaya çıkmaktadır (CTC Global, 2022; Kıstı, 2016; IEEE Power and Energy Society, 2013). Bu nedenle belirtilen sorunlardan dolayı bilhassa da sehimden dolayı mevcut hatları daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırmak mümkün gözükmemektedir (Riba vd., 2020). Aynı zamanda daha büyük çaplı iletkenlerle değişim sağlanması da mevcut hattın üstünde daha fazla mekanik yük oluşturmaktadır. Bu yeni oluşan mekanik yükten dolayı, mevcut elemanların da değişmesi gerekmekte ve bu da ekstra maliyet ortaya çıkaracağı için ilk yapılacak yöntem olarak düşünülmemektedir (Riba vd., 2020). Bundan dolayı mevcut iletkenlerin, daha yüksek akım kapasitesine sahip ve yatay gerilimin, iletkenin birim ağırlığına oranı daha yüksek olan iletkenlerle değiştirilmesi gerekmektedir (Ardelean vd., 2011). Bu yönden bakınca ortaya çıkan şu ki hatların mevcut taşıma kapasitelerini artırmak gerekmektedir (Riba vd., 2020). Bu varsayımlar altında iletken seçimine bakarsak iki opsiyon olduğu görülmektedir. Ya mevcut iletkenlerin aynı sıcaklık altında çalışabilen ve kesiti eşit veya daha küçük çaplı iletkenle değiştirmek ya da ikinci bir seçenek olarak düşük sehimli (Pierre ve Heydt, 2012), daha düşük genleşme katsayısına sahip (Ardelean vd., 2011; Kwon ve Hedman, 2015) yüksek sıcaklıklarda daha fazla akım altında çalışabilen iletkenlerle yani Yüksek Sıcaklık Düşük Sehimli (HTLS) iletkenlerle, mümkün olduğunca

hatlarda bulunan elemanları değiştirmeden (Albizu vd., 2011; Nuchprayoon ve Chaichana, 2017), mevcut iletkenleri değiştirmektir. İkinci seçeneğe baktığımızda görüyoruz ki HTLS iletkenler hattın akım taşıma kapasitesini ve verimliliğini artıracak iletkenler olarak görülmektedir (Beryozkina, 2019). Ayrıca geleneksel iletkenlere baktığımızda genellikle 75 °C altında çalışırken, tüm HTLS iletkenler en az 150 °C altında çalışmaktadır (Riba vd., 2020). Hatta belli bir süre altında herhangi elektriksel veya fiziksel/mekaniksel özelliklerde bir değişiklik olmadan 250 °C altında da çalışmaktadırlar (Riba vd., 2020). İkinci seçeneğin, birinci seçenektan daha avantajlı olmasının iki temel nedeninden birincisi, mevcut hatta olabildiğince az eleman değişimi yapılacak olması, ikincisi ise, daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla akım taşıma kapasitesine sahip olduğundan dolayıdır (Riba vd., 2020). Bu nedenle HTLS iletkenler, ülkemizde en çok tercih edilen Çelik Özlü Alüminyum (ACSR) (Akgöl vd., 2018) iletkenlerin yerini almak için büyük bir potansiyele sahiptir (Rahman vd., 2017). HTLS iletkenler gibi hattın güç iletme (aktarım) kapasitelerini artıran iki seçenek daha bulunmaktadır. Bunlar kompakt iletim hatları ve 6 fazlı sistemlerdir (Dave vd., 2012). Fakat bunları uygulamak için iletim hattında büyük değişiklikler yapmak gerekir ve bu da maliyet açısından uygun olmayabilir (Dave vd., 2012).

Bu makale, HTLS iletkenlerini tanıtarak, avantajlarını, dezavantajlarını, mevcut iletkenlerden farklarını, maliyet analizlerini ve aynı zamanda bu karşılaştırmaları yaparken uzun yıllardır kullanılan mevcut iletkenleri de tanıtmayı amaçlamaktadır.

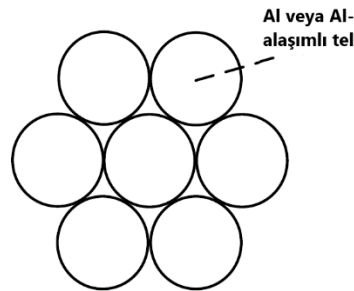
## 2. Havai İletim Hatlar İçin İletken Tipleri (Conductor Types for Overhead Transmission Lines)

Elektrik iletkenleri, güç sistemlerinin güvenilir ve verimli çalışmasını sağlarken (Nasuruddin vd., 2018), hattın akım taşıma kapasitesini büyük ölçüde belirlediğinden (Beryozkina, 2019), havai iletim hatlarında önemli rol oynamaktadır. Havai iletim ve dağıtım hatları için çıplak iletkenler, mekanik mukavemeti artırmak için genellikle çelik tellerle takviye edilen neredeyse saf alüminyum tellerden yapılmıştır (Riba vd., 2020). Konvansiyonel iletkenler, alüminyum iletkenler (AAC), tam alüminyum alaşımlı iletkenler (AAAC) ve çelik özlü alüminyum iletkenlerden (ACSR) oluşmaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı[MEB], 2022).

### 2.1. Konvansiyonel İletkenler (Conventional Conductors)

Tam Alüminyum İletkenler (AAC), iletkenliği artırılmış, birbiri üstüne örgü biçimde sarılmış tamamı alüminyumdan oluşan iletkenler olarak tanımlanmaktadır. Bu iletkenlerin kullanım alanları genellikle yerleşim alanlarında, kısa direk aralıklarının bulunduğu enerji iletim hatlarında ve yüksek korozyon direncine sahip olmasından dolayı denizcilik sektöründe kullanılmaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı[MEB], 2022).

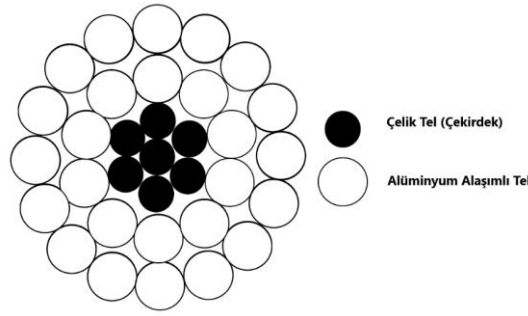
Tam Alüminyum Alaşımlı İletkenler (AAAC), alüminyum ve alüminyum alaşımlı teller içeren kompozit iletkenlerdir (IEEE Power and Energy Society, 2004). Bu iletkenin korozyon direnci, diğer konvansiyonel iletkenlerle karşılaştırıldığında korozyona karşı daha yüksek direnç göstermektedir. Ayrıca mekanik yönden incelendiğinde yüksek bir mekanik direnç gösterdiği ve ağırlık ve gergi oranının yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı enerji iletim ve dağıtım hatlarında tercih edilmektedirler (Milli Eğitim Bakanlığı[MEB], 2022; IEEE Power and Energy Society, 2004). Fakat içinde bulundurduğu alaşımdan kaynaklanan yüksek direnç nedeniyle, AAC iletkenlerinden daha yüksek güç kayıplarıyla karşı karşıya kalmaktadırlar (Mohtar vd., 2004). Şekil 1'de AAC ve AAAC iletkenlerinin enine kesiti görülmektedir.



Şekil 1. AAC ve AAAC iletkenlerinin enine kesiti (Cross-section of AAC and AAAC conductors) (Riba vd., 2020)

Çelik Özlü Alüminyum İletkenler (ACSR), % 6-40 oranında değişen tek tel ya da örgülü çelik özler üzerine sarılmış alüminyum tellerden (1350-H19) (Riba vd., 2020) meydana gelmektedirler (Milli Eğitim Bakanlığı[MEB], 2022). Çelik özlü iletkenlerin akla ilk gelen özellikleri hammadde olarak alüminyum kullanılmasından dolayı ağırlığının az olması, gerilme kuvvetinin yüksek olması ve diğer konvansiyonel iletkenlere göre daha az dayanak (mesnet) noktası bulunması nedeniyle hat mesafesinin diğer iletkenlere göre daha uzun olmasıdır. Bu özellikler sayesinde iletim hatlarında kullanılan iletkenlerden dayanıklılık ve uzun mesafelere iletim isteniyorsa, bu iletken tercih

edilmektedir. Ayrıca ülkemizde en çok kullanılan iletken tipidir. (Karabay ve Şen, 2022). ACSR iletkenlerin enine kesiti Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. ACSR iletkeninin enine kesiti (Cross-section of ACSR conductors) (Riba vd., 2020)

Yukarıda olumlu özelliklerini saydığımız ACSR iletkenlerin olumsuz özelliklerine de bakmak gerekirse, iletkenlerin ortasında bulunan ve mukavemeti artıran galvanizli çelik teller, belli bir sıcaklıktan sonra genişleşerek uzamaya başlamakta ve bu uzama nedeniyle ek elektrik direnci oluşmaktadır. Bu da sıcaklığı artırmakta ve iletkeni aşırı ısıtarak güç kayıplarına neden olmakta ve daha fazla sehim oluşturmaktadır (Shivashankar, 2017). ACSR iletkenlerde sıcaklıktan dolayı oluşabilecek sorunları belli bir oranda sınırlamak için ya sehim sınırlandırılmakta ya da alüminyum şeritler tavlama işleminden geçirilerek sorunlar ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır (Exposito vd., 2007). Fakat iletkenlerin nominal çalışma sıcaklıkları aşıldığı durumlarda tavlama işleminden dolayı iletkenlerin kullanım ömrü dramatik bir şekilde düşmektedir (Exposito vd., 2007). Ayrıca, normal çalışma aralığı 70-90 °C arasında olan ACSR iletkenlerinin alüminyum telleri, sıcaklığın 90 °C'nin üstüne çıktığı durumlarda (Nogales vd., 2009; Albizu vd., 2010), tavlama işleminden dolayı daha yumuşak hale gelir ve bundan dolayı sarkma, ek elektrik direnci gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır (Shivashankar, 2017; IEEE Power and Energy Society, 2013; Hill ve Bryant, 2013). Bu sorunu önlemek için ACSR iletkenleri çalışması, 0,6 m/s rüzgâr hızının altında 75 °C ile sınırlandırılmıştır (Kopsidas, 2009). Bundan dolayı da akım taşıma kapasitesi olumsuz yönde etkilenmektedir (Nasuruddin vd., 2018). Ancak çelik öz/çekirdek 250 °C sıcaklığa maruz kalsa bile, çekme mukavemeti bu durumdan etkilenmemiştir (IEEE Power and Energy Society, 2013). Ayrıca yaklaşık 50-60 yıl kadar önce ACSR tipi iletkenler en önemli hat malzemeleri olarak tanınmaktaydı (Kenge vd., 2016). Ancak bu iletkenler kompozit yapıda olmalarından dolayı çevre etkilerine açık olmaları bir dezavantaj olarak görülmektedir. Bundan dolayı farklı malzemelerin (Alüminyum teller-çelik öz gibi) tek bir iletkeni oluşturan parçalar olması farklı iklim koşullarında galvanik korozyonu tetiklemesinden dolayı tercih edilmemekte ve yine korozyon nedeniyle kullanım ömürlerinin önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmektedir. Bu olumsuz özelliklere rağmen ACSR iletken kullanılmak istenirse, ekstra bir maliyetle galvanizli çelik tellerin üzerine gres yağı sürülerek ve belli bir kat PVC (Polivinil klorür) ile sararak korozyondan korunması sağlanmaktadır (Karabay ve Şen, 2022).

Havai hat iletkenlerin seçiminde pek çok faktör ele alınmaktadır. Dikkat edilmesi gereken en önemli faktör, iletkenlerin çalışacağı bölgenin coğrafi şartları ve hava koşullarıdır. Çünkü iletkenler seçileceği zaman, buz yükü haritasına bakılmakta, rüzgâr hızı dikkate alınmakta, etrafında bu iletkene etki edebilecek volkanik gaz ya da endüstriyel gaz var mı diye araştırılmaktadır. Ayrıca topraktan çıkan ve korozyon oluşturabilecek gaz var mı diye de kontrol edilmektedir. Bunlara ek olarak bölgenin yıl içinde hangi sıcaklık değerlerine ulaştığı ve denize yakın olup olmadığı da bakılan diğer etmenlerdir (Karabay ve Şen, 2022). Bu faktöre ek olarak, iletkenin kendi maliyeti ve tedarik maliyeti de seçim yaparken ele alınan etmenlerden birisidir (Yasaranga vd., 2017). Bir diğer faktör ise, ülkenin güvenlik prosedürleri ve iç pazarda iletken üreticilerinin kalkındırılmak istenmesi de iletken seçiminde öne çıkan hususlardandır (Karabay ve Şen, 2022).

Şehirleşmenin hızla arttığı bu yıllarda, enerji talebi de aynı oranda artmaktadır. Fakat bu enerjiyi sağlayacak altyapı aynı oranda artmamaktadır. Ayrıca aşırı şehirleşmeden dolayı da yeni bir hat kurmak neredeyse imkansız hale gelmiştir. Bu söylemler, nüfusları 10 milyonun üzerinde olan şehirleri için geçerlidir. Tüm bunlar ele alındığında, bu enerji taleplerini karşılamak için mevcut iletim hatlarının akım taşıma kapasitelerinin artması gerekmektedir. Bu ihtiyaçtan dolayı da “Yüksek Sıcaklık Düşük Sehimli” iletkenler (HTLS iletkenler) ortaya çıkmıştır (Karabay ve Şen, 2022).

## 2.2. HTLS İletkenler (HTLS Conductors)

HTLS iletkenler, sehim ve sınırlı akım taşıma kapasitesi sorunlarını çözmek için ortaya çıkan iletkenlerdir (Shivashankar, 2017). Bir havai hatta, 80 km'ye kadar olan kısa havai hatların güç taşıma kapasitesi nominal sıcaklıkla, 80 ila 300 km aralığında uzunluğu olan hatlar gerilim kararlılığıyla sınırlandırılabilirken, 300 km üzerinde olan hatlarda ise, durağan kararlılık durumu (steady-state stability) kritik bir faktör haline gelmektedir

(Dawson ve Knight, 2016). HTLS iletkenlerinin ACSR iletkenlerinden farklarına bakacak olursak, daha yüksek sıcaklıklar altında çalışabilmesi, daha iyi bir gerilme mukavemetine sahip olması ve daha düşük termal genişleme katsayısına sahip olması yani sehim ve iletkenin uzaması yönünden avantaj sağlaması ilk olarak akla gelenlerdir. Bunlara ek olarak, HTLS iletkenlerin, ACSR iletkenlerinin iki katı kadar akım taşıma kapasitesi bulunmaktadır (Exposito vd., 2007; Silva ve Bezerra, 2012; Misaghi ve Barforoushi, 2017). İki iletkeninde hemen hemen aynı empedans değerlerine sahip olduğu gözükmekte ve HTLS iletkenlerin, çok yüksek sıcaklıklarda (210-250 °C) çalıştırıldığında elektrik dirençlerinin arttığı ve bu nedenle güç iletim kapasitesinin düştüğü gözükmektedir (Exposito vd., 2007). Ayrıca HTLS iletkenlerin uzun iletim hatlarında yaşadığı gerilim düşüşü bu iletken açısından olumsuz bir özelliktir (Lauria ve Quaia, 2017). Bunlardan dolayı HTLS iletkenler, genellikle kısa iletim hatlarında tercih edilmesi daha doğru gözükmektedir (Riba vd., 2020). Tüm bunları dikkate alarak, HTLS iletkenlerinin ana dezavantajlarına bakarsak, bunlar artan güç kayıpları nedeniyle oluşan yüksek işletme maliyetleri ve ayrıca iletken maliyetleri olduğu görülmektedir (Nuchprayoon ve Chaichana, 2018). Ek olarak, HTLS iletkenlerinin birçok avantajlarına rağmen hala yeni bir iletken ve zorlu çalışma koşulları altında ne gibi tepkiler göstereceğini veya doğal çalışma ortamlarında uzun süreli çalışmalarda ne gibi sorunlar çıkartabileceğini iletkenin tam olarak yaygınlaşmamasından dolayı yatırımcıların bir kısmı hala kullanımı konusunda tereddütler yaşamaktadır (Waters vd., 2017).

HTLS iletkenler genellikle karbon fiber kompozit öz ve trapez şeritli alüminyum teller adında iki ana bileşenden meydana gelirler. Burada trapez şeritli alüminyum teller bir saç örgüsüne benzetilmektedir. Bu da alüminyum teller arasında boşluğu en aza indirerek aynı iletken çapına sahip konvansiyonel iletkenlerde (genellikle yuvarlak şeritli alüminyum tel kullanılır) bulunan alüminyum tel miktarından daha fazla tel koymamızı sağlamaktadır (Kıstı, 2016; Nasuruddin vd., 2018) ve bu da iletilen akım miktarını artıran unsurdur (Shivashankar, 2017). Bunlara ek olarak, alüminyum telleri trapez şekline getirdiğimiz de yuvarlak şekilde olduğu gibi mekanik olarak ayrı ayrı çalışmazlar ve bundan dolayı teller arasında mekanik aşınma olabildiğince azalmaktadır (Kıstı, 2016). Ayrıca trapez şeritli alüminyum teller, alüminyum alaşımından daha yumuşak olmasına rağmen, elektrik iletkenliği yüksek tavllanmış 1350-O tipi alüminyumdan meydana gelmekte ve bu da iletkeni elektrik gücünü iletmede daha verimli hale getirmektedir (Nasuruddin vd., 2018). Yeni tip iletkenlerde kullanılan tavllanmış alüminyum teller, eski tip iletkenlerde kullanılan alüminyum tellerle aynı kimyasal bileşime ve daha az çekme mukavemetine sahip olmasına rağmen, elektriksel ve mekaniksel bir kayıp olmadan 250 °C'nin üzerinde çalışmaya devam etmektedirler (Riba vd., 2020). HTLS iletkenlerinde kompozit öz, karbon fiber ve etrafında onu korozyondan koruyan ve çevreleyen fiberglas malzemeden, çekirdek ise birçok kompozit özün yan yana gelmesiyle oluşmaktadır. HTLS iletkenlerin çekirdeği, ACSR iletkeninin çelik malzemeden yapılmış çekirdeği ile karşılaştırıldığında, bize esneklik, daha düşük ağırlık, düşük genişleme katsayısı, korozyona karşı yüksek direnç, daha yüksek çekme kuvveti (Shivashankar, 2017) ve daha düşük sehim avantajları sağlamaktadırlar (Nasuruddin vd., 2018). Ayrıca bunlara ek olarak diğer bir karşılaştırma verisi de, HTLS iletkenler, nominal çalışma değerlerinin dışına çıktığında ve belli bir süre bu çalışma koşullarında çalıştığında kullanım ömürlerinde bir düşüş yaşanmamaktadır (Riba vd., 2020). Tüm bu farklara baktığımızda, HTLS iletkenlerin çekirdeğinin sağladığı mekanik avantaj bu iletkenler için olumlu özellikler göstermektedir (Nasuruddin vd., 2018). Birbirine yakın çap değerlerinde bulunan HTLS iletkenler ile ACSR iletkeninin, teknik özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** HTLS iletkenler ile ACSR iletkeninin teknik özellikleri (Mechanical and electrical characteristics of ACSR and HTLS conductors) (Yasaranga, 2015).

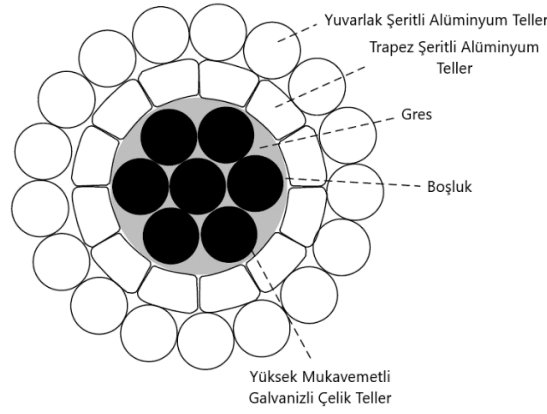
İletken Tipi		ACSR	G(Z)TACSR	(Z)TACIR	ACCC
İletken	Dış Kısmı	Sert Çekilmiş Alüminyum	Sert Çekilmiş Alüminyum	Tavlanmış Alüminyum	Tamamen Tavlanmış Alüminyum
		1350-H19	1350-H19	ZTAL	1350-0
	İç Kısmı	Çelik	Ekstra Kuvvetlendirilmiş Çelik	Alüminyum Kaplı Nikelli Çelik	Kompozit Öz
İletken Adı		Zebra	Drake	413-410	Drake
Çap	mm	28,62	27,8	28,5	28,14
Kesit Alanı	mm <sup>2</sup>	484,5	469,5	413,4	519,7
Kopma Kuvveti	kN	131,9	149,2	130,4	183,3
Birim Ağırlık	kg/km	1,621	1,616	1,625	1,565
Öz (Core) Dayanma Sıcaklığı	°C	170	200	300	>300
Çekme Mukavemeti (ksi)	Alüminyum	23-25	23-25	24-27	6-14
	Öz	200-210	220	160-195	330-375
İletkenlik	%	61	60	60	63
Isıl Uzama Katsayısı (x10 <sup>-6</sup> )	Alüminyum	23,04	23,04	23,04	23,04
	Öz	11,52	11,52	3,78	1609
Elastisite Modülü (MPa/100)	Alüminyum	427	517	466	480
	Öz	351	212	293	128
AC Direnç (75 °C)	Ω/km	0,0815	0,0878	0,0968	0,0662
Max. Çalışma Sıcaklığı	°C	75-85	150-210	210-230	180
Yüklenme Akımı	A	817	1503	1378	1600

HTLS iletkenlerin fiziksel özelliklerine baktığımızda, ACSR iletkenlerle çok benzer olduğu görülmektedir. İletkenle ilişkili hat üzerinde bulunan elemanlar/aksesuarlar değişiklik yapmadan kullanılabilir ama yine de yüksek sıcaklık uygulandığında ne gibi bir reaksiyon vereceği testlerle incelenmesi gerekmektedir (Beryozkina, 2019).

Günümüzde birçok HTLS iletken bulunmaktadır. Bu çalışmada, Isıya Dayanaklı Zirkonyum-Alüminyum Alaşımli İletken Çelik Takviyeli ((Z)TACSR), “Gap” tipi Isıya Dayanaklı Zirkonyum-Alüminyum Alaşımli İletken Çelik Takviyeli (G(Z)TACSR), Isıya Dayanaklı Zirkonyum-Alüminyum Alaşımli İletken Nikelli Çelik Takviyeli ((Z)TACIR), Tavlanmış Alüminyum İletken Çelik Takviyeli (ACSS/ACSS(TW)), Alüminyum İletken Kompozit Takviyeli (ACCR) ve Alüminyum İletken Kompozit Özlü (ACCC) adlı iletkenler ele alınmıştır (Riba vd., 2020).

ACSR iletkenleriyle aynı yapıya sahip olan (Riba vd., 2020) (Z)TACSR iletkenleri, çekirdekte galvanizli çelik tellere ve çekirdeğin üstünde ise, Isıya Dayanaklı Zirkonyum-Alüminyum Alaşımli Teller ((Z)TAL) olarak da bilinen ısıya dayanıklı alüminyum-zirkonyum alaşımli tellere sahiptir. Isıya dayanıklı olduğunu iletkenlerin adlarının içinde T harfi bulunmasından da anlayabilmekteyiz (Karabay ve Şen, 2022). Hem Isıya Dayanaklı Alüminyum Alaşımli Teller (TAL) hem de (Z)TAL telleri, ACSR iletkenlerde kullanılan alüminyum tellerle hemen hemen aynı mukavemet ve iletkenliğe sahiptir. Ayrıca her ikisi de, birbirine yakın termal uzama performansları sundukları için sehim konusunda dezavantajlı gözükmemektedirler (Riba vd., 2020). Teknik özellikleri göz önüne aldığımızda ACSR iletkenleri 70-90 °C aralığında çalışırken, (Z)TACSR iletkeni 150-200 °C aralığında çalışabilmektedir. Ayrıca (Z)TACSR iletkeni, akım taşıma kapasitesi, konvansiyonel ACSR iletkenine göre iki kat daha fazladır. Bu iki veriye ve yukarıdaki mekaniksel değerlendirmelere baktığımızda görülüyor ki, eğer sehim problemi yaşanmayacak ve iki kat daha fazla akım taşınacaksa konvansiyonel iletkenlerin yerini alması hem işçilik hem de maliyet açısından avantajlı olacaktır (Karabay ve Şen, 2022).

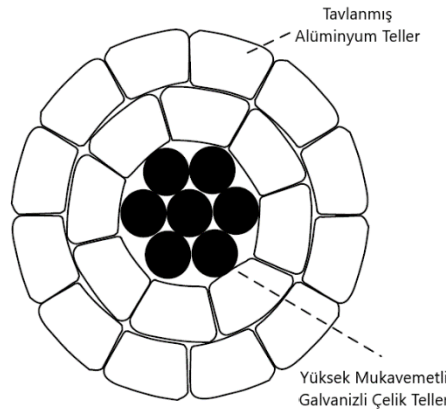
G(Z)TACSR iletkenler, çelik teller arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek için ısıya dayanıklı gres ile doldurulmuştur. İletkenin adında bulunan G harfi ise gap yani boşluk anlamına gelmektedir. Trapez şeritli alüminyum şeritler ile çelik teller arasında da boşluklar bulunmaktadır. Bu iletkenlerde sehim olayı azdır ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilen iletkenlerdir (Riba vd., 2020). G(Z)TACSR iletkenlerin enine kesiti Şekil 3’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.** G(Z)TACSR iletkeninin enine kesiti (Cross-section of G(Z)TACSR conductors) (Riba vd., 2020)

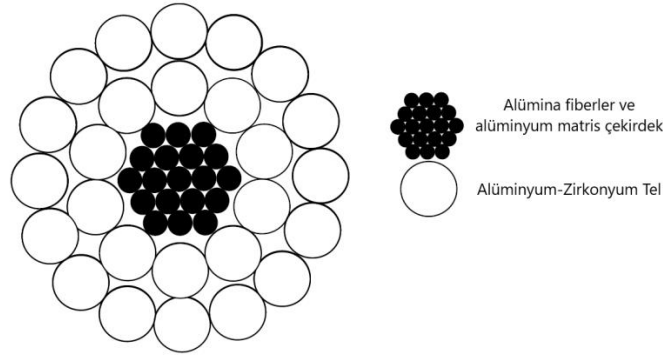
(Z)TACIR iletkeni ise hemen hemen ACSR iletkenleriyle aynı özelliklere sahiptir. İkisinin arasında farklar kaplama tabakası olarak çinko kullanarak alüminyum-zirkonyum alaşımı ile çelik teller (alüminyum kaplı Invar alaşımı (CTE'si azaltılmış demir-nikel alaşımı)) arasındaki korozyonu önlemeye çalışmaktadır (Riba vd., 2020).

ACSS ve Trapez Telli ACSS iletkenlerinin çekirdekleri, galvanizli, alüminize edilmiş veya zincaluminum Mischmetal kaplamalı (çinko alaşımı—%5 alüminyum kaplama) (IEEE Power and Energy Society, 2013) yüksek mukavemet sağlayan bir çekirdektir. Bu çekirdeğin üstünde ise tavllanmış 1350-0 alüminyum teller bulunmaktadır (Riba vd., 2020). Alüminyum iletkenler hiç beklenmedik bir anda sorun çıkarabilirler. Bu sorunlardan bir tanesi ise, rüzgârın yaptığı titreşimlerden dolayı alüminyum tellerde oluşan yorgunluktur. Diğer bir sorun ise, aşırı yüklenmenin olduğu zamanlarda oluşan aşırı iletken sıcaklıklarıdır. Bu sorunlarla baş etmede ACSS iletkenlerin kendine has özellikleri bulunmaktadır. Ayrıca bu avantajları elde etmesinde alüminyum tellerin tavlama işlemi görmüş olmasından dolayıdır. Ayrıca ACSS iletkenlerin sürekli çalışma sıcaklığı 200 °C civarındadır. Fakat çekirdek alüminize edildiği zaman ise, bu sıcaklık 260 °C'lere kadar çıkmaktadır (Domínguez vd., 2014; Thrash, 2001). ACSS iletkeninin enine kesiti Şekil 4'de verilmiştir.



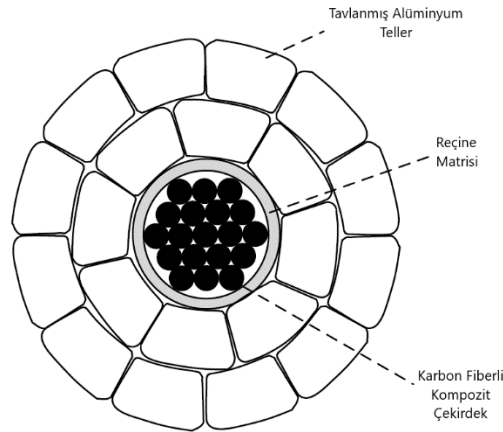
**Şekil 4.** ACSS/TW iletkeninin enine kesiti (Cross-section of ACSS/TW conductors) (Riba vd., 2020)

ACCR iletkenleri (Shivashankar, 2017), kompozit bir çekirdek (alümina fiberler ve alüminyum matris çekirdek) ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip (Z)TAL telleri içermektedir (Riba vd., 2020). Bundan dolayı yüksek sıcaklıklarda düşük sehim ve yüksek bir akım kapasitesi göstermektedirler (Riba vd., 2020). ACCR iletkenleri, nominal çalışma sıcaklığı 210 °C olup (Albizu vd., 2005; Rahman vd., 2017), acil durumlarda 240 °C'ye kadar çıkmaktadırlar (Domínguez vd., 2014). ACCR iletkenlerinin enine kesiti Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5. ACCR iletkeninin enine kesiti (Cross-section of ACCR conductors) (Riba vd., 2020)

ACCC iletkenler, sertleştirilmiş bir polimer reçine matrisine gömülü cam ve karbon fiberden yapılmış yüksek mukavemetli kompozit bir çekirdeğe sahiptir. Ortasında bulunan karbon fiber çekirdeği, esnekliği artırmak ve galvanik korozyonu önlemek için cam fiberlerle çevrelenmiştir. ACCC iletkenlerde karbon fiber özün bulunmasından dolayı iletken düşük termal uzama katsayısına sahip olmaktadır. Bu da yüksek sıcaklıklarda sarkmayı sınırlandırırken aynı zamanda buz yükü ve şiddetli rüzgâr var olduğunda bu koşullara da kolayca dayanıklılık gösterebilmektedir (Riba vd., 2020). Ayrıca ACCC iletkenlerin çekirdeği de tavllanmış trapezoidal alüminyum tellerle çevrelenmiştir. ACCC iletkenler, konvansiyonel iletkenlere göre akım taşıma kapasitesi ve güç kaybı değerlerine baktığımızda daha avantajlı olduğu görülmektedir (Shivashankar, 2017). ACCC iletkenlerde kullanılan alüminyum teller, ACSR iletkenlerinde kullanılanlara göre daha yumuşak ve daha iletkendir. Mekanik yönden bu dezavantajı absorbe etmek için çekirdek devreye girerek aradaki farkı kapatmaktadır. ACCC iletkenlerinin çalışma sıcaklığı 180-200 °C aralığındadır (Rahman vd., 2017). ACCC iletkenlerin enine kesiti Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. ACCC iletkeninin enine kesiti (Cross-section of ACCC conductors) (Riba vd., 2020)

### 3. Maliyet Karşılaştırması (Cost Comparison)

İletim hatlarına yapılan yatırımlar yüklü bir sermaye gerektirmektedir. Yaklaşık 40 yıllık faydalı ömürleri olduğundan dolayı (Kamboj ve Dahiya, 2011), yatırım kararlarının güç sistemi üzerinde uzun vadeli bir etkisi bulunmaktadır (Lumbreras ve Ramos, 2016). Varlık (faydalı) ömrü, yük büyüme tahmini, gelecek öngörüler, sermaye değeri, maliyet-fayda analizi vb. faktörlerin iletim hatlarının kurulmasında önemli etkileri bulunmaktadır (Riba vd., 2020). Bunlara ek olarak, iletken tipi seçimi de önemli bir faktördür. Çalışmanın devamında da görüleceği gibi, mevcut iletkenlerin yerini, HTLS iletkenlerin alması yatırım maliyetinde kâr sağladığı (Misaghi ve Barforoushi, 2017) gibi yatırım süresini de azaltmaktadır (Domínguez vd., 2014).

Mevcut iletim hatlarının HTLS iletkenlerle değiştirilmesi, özellikle de tam kapasite altında çalışırken daha iyi iletim kapasitesi ve daha düşük iletim kayıpları sunabildiklerinden dolayı işletme maliyetlerini düşürürler (Nasuruddin vd., 2018). Ayrıca mevcut iletkenlerin yerini almaya aday olan bu iletkenler, mevcudun yerine geçeceği için yeni hat inşa edilmesi gerekmemektedir (Domínguez vd., 2014). Direklere ve iletkenlere uygun arazi arayışına (Favuzza vd., 2015), uzun inşaat sürelerine ve işçilik maliyetlerinin düşünülmesine gerek olmadığından dolayı maliyete büyük oranda katkıda bulunmaktadır (Nasuruddin vd., 2018). Fakat HTLS iletkenleri, ACSR iletkenlerine göre daha yüksek maliyetli (yaklaşık 2-3 katıdır) iletkenlerdir ve bu da yatırım açısından soru işareti



bırakan bir unsurdur (Tokombayev ve Heydt, 2015). Hatta HTLS iletkenlerinin satın alma maliyeti, iletim hattı için gereken sermaye yatırımının %30'unu oluşturmaktadır (Akgöl vd., 2018; Lauria ve Quiaia, 2017). Ayrıca HTLS iletkenler, yüksek sıcaklıkta çalışmasından dolayı artan güç kayıpları ve uzun iletim hatlarında kullanıldığında yaşanan gerilim düşüşleri nedeniyle kısa iletim hatlarında tercih edilmektedir (Lauria ve Quiaia, 2017). Ancak Kuzey Amerika'da da uygulandığı gibi, HTLS iletkenler, nominal çalışma sıcaklığını aşmadan çalışmaya devam ederlerse, güç kayıpları, ampasite değeri pik yaptığında ortaya çıkan güç kaybı değerleri gibi olmayacaktır. Bundan dolayı iletkenlerden geçecek akımın ve iletken sıcaklığının maksimum çalışma sınır değerleri sadece acil durumlarda kullanılacak ve güç kayıplarından dolayı oluşan ek maliyetleri de minimuma indirmiş olacaktır (Tokombayev ve Heydt, 2015).

ACSR iletken maliyetini (kurulum ve aksesuarlar/elemanlar dahil) baz alarak HTLS iletkenlerinin maliyetlerini gösteren değerler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** ACSR iletkeni baz alınarak HTLS iletkenlerinin maliyeti (Relative costs of ACSR conductors with respect to HTLS conductors) (Riba vd., 2020; Domínguez vd., 2014; Mateescu vd., 2011)

İletken Tipi	ACSR	ACSS	G(Z)TACSR	(Z)TACIR	ACCC	ACCR
Maliyet Çarpanı	1,0	1,1-1,5	2	3,5	5-7	10

ACSR iletkenine göre HTLS iletken maliyetleri incelendiğinde, en düşük iletken maliyeti ACSS iletkeninde, en yüksek iletken maliyeti ise ACCR iletkeninde oluşmaktadır.

230 kV gerilim altında, 11,5 km uzunluğunda tek demet, çift devre ve ACSR iletkenlerinin var olduğu iletim hattının akım taşıma kapasitesi iki katına çıkarılmak istenmektedir. İlk aşamada iki tane plan akla gelmektedir. İlk akla gelen plan, mevcut direkleri değiştirerek ve çift demetli hale getirerek, ACSR iletkenlerini kullanmaya devam etmektir. İkinci plan ise, ufak değişiklikler yaparak, mevcut direkleri ve HTLS iletkenleri (ZTACIR, GTACSR, ACSS, ACCR ve ACCC) kullanarak akım iki katına çıkarılabilmektedir. Bunun için maliyet analizi yapılırsa, ilk plana göre hareket edilirse, mevcut durumda direklerin yıkım, yapım ve kurulum maliyetleri toplam maliyetlerin %25 ile %33 aralığında olduğu görülürken, ikinci plana göre hareket edilirse, bu maliyetlerin yüzdesi toplam maliyetlerin %1 ile %2'sini oluşturduğundan ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Yine ilk plana baktığımızda ACSR iletkenlerinin iletken maliyeti %9 iken, ikinci planda HTLS iletkenlerin iletken maliyeti %5,3 ile %12,5 aralığında değişmektedir. Güç kayıplarından dolayı oluşan maliyetlere baktığımızda, ACSR iletkenlerinin %67,4 iken, HTLS iletkenlerinin maliyetleri ise, %86,4 ile %93,5 aralığında değişmektedir. Bu verilerden de anlaşılacağı gibi, güç kayıplarından oluşan maliyet en önemli maliyet olarak gözükmektedir (Nuchprayoon ve Chaichana, 2018). Tablo 3'de bu maliyetler verilmiştir.

**Tablo 3.** İletken tipine göre maliyet oranları (Relative costs of types of conductors) (Riba vd., 2020; Nuchprayoon ve Chaichana, 2018)

		Maliyet Yüzdesi (%)			
		Yıkım	Yapım+Kurulum	İletken	Güç Kayıpları
İletken Tipi	ACSR	%1,1	%22,5	%9	%67,4
	HTLS (5 Tip)	%0,4-0,7	%0,7-1,2	%5,3-12,5	%86,4-93,5

Portekiz'de gerçekleştirilen çalışmada, talep artışı ve N-1 analizi için 3 tane proje ele alınarak ACSR ve ACCC iletkenleri arasında maliyet analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda mevcut sistemlerin ACSR yerine ACCC iletkenleriyle değişmesi yatırım ve işletme maliyetleri açısından %16,3 ile %43,8 avantaj sağladığı görülmektedir (Moreira ve Lopes, 2017).

İrlanda'da gerçekleştirilen çalışmada, 25 yıl boyunca 85 km uzunluğa sahip 220 kV'lik bir hat ele alınmıştır. ACSR iletkenlerinin yerini HTLS iletkenleri alırsa ne gibi sonuçlar elde edilebileceği araştırılmış ve şu sonuçlara varılmıştır. HTLS iletkenlerinin kullanılmasının maliyet yönünden %60 daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada kullanılan HTLS iletkenleri ele alırken, güç kayıplarından dolayı oluşan maliyetlerin, iletkeni satın alırken ve kurulumdan dolayı oluşan maliyet arasında farklılık göstermediği görülmüştür. ACSR iletkenler incelendiğinde bu aradaki fark 1,3 ile 6 kat arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Kavanagh ve Armstrong, 2010).

Sri Lanka'da gerçekleştirilen çalışmada, Zebra ACSR iletkeni ile HTLS iletkenleri (GAP, ZTACIR)'nin 30 yıl aynı şartlarda kullanılırsa maliyet karşılaştırmasının nasıl olabileceğine dair bir çalışma yapılmıştır. Burada iletim hattı maksimum 600 A çeken 50 km uzunluğundaki çift devre bir hattır. ZTACIR iletkeni, ilk yatırımı en pahalı olmasına

rağmen, güç kayıpları ve CO<sub>2</sub> emisyonlarından oluşan maliyetler neredeyse hiç yokken ve her yıl ekstra tasarruf sağladığından dolayı 30 senelik sürede çok avantajlı olduğunu kanıtlamıştır. Fakat burada işletme, bakım, yapım ve kurulum maliyetleri ele alınmamıştır (Yasaranga vd., 2017).

Bir başka çalışmada maksimum 1 kA kapasiteli, %53 yük oranına ve 230 kV gerilime sahip 100 km'lik deneysel bir iletim hattı var olduğu düşünülmeye istenmektedir. Burada konvansiyonel iletken olarak ACSR (Drake) iletkeni kullanılmaktadır. Bu mevcut iletim hattı kapasitesi maksimum 1,6 kA kapasiteye çıkarılmaya istenmektedir. Mevcut iletkenin yerini ACCC iletken aldığı hat kayıplarının yaklaşık 73 MWh/yıl azaldığı görülmüştür. Ayrıca 28,8 milyon\$/yıl üretimden tasarruf sağlanmıştır (Hill ve Bryant, 2013).

Diğer bir çalışmada, altı iletim hattını nominal çalışma sıcaklıklarının üstünde bir sıcaklığa maruz bırakarak, işletme maliyetlerine ve yatırımın geri ödeme sürelerine ilişkin bir etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. İncelemeye bakıldığında geri ödeme süresi 7 ile 31,5 yıl arasında değişmektedir. Sıcaklık ve yük arttığında işletme maliyetlerinde düşüş ve daha kısa geri ödeme süreleri olması beklenmektedir (Tokombayev ve Heydt, 2015).

Konvansiyonel ACSR iletken ile ACCC iletkenin güç kayıpları yönünden incelendiği çalışmada, iletkenler iki aşamada ele alınmıştır. İlk aşama için, her iki iletkende kendi nominal sıcaklık değerlerinde devreye alınmış ve ACCC iletkenin güç kaybı ACSR iletkenin güç kaybından %25 daha az olduğu ortaya çıkmıştır. İkinci aşama için ise, her iki iletkende çalışabilecekleri maksimum akım ve sıcaklıkta devreye alınmış (ACCC için 210 °C (2114 A), ACSR için 85 °C (902 A)) ve ACCC iletkenin güç kaybı, ACSR iletkeninden %450 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Kumar ve Rahangdale, 2018).

Örnek çalışmalar incelendiğinde, iletkenin üzerinden geçen akım arttıkça, daha yüksek çalışma sıcaklığı ve elektrik direnci ortaya çıkmakta (Tokombayev ve Heydt, 2013) ve güç kayıpları da akımın karesine bağlı olduğundan dolayı (Tokombayev ve Heydt, 2015) önemli ölçüde artmaktadır. Fakat iletim hattı düşük yük faktörleriyle çalıştığında, HTLS iletkenlerindeki güç kayıpları ACSR iletkenlerine kıyasla daha da azaltılabilir. Bu nedenlerden dolayı, güç kayıplarını ve buna bağlı oluşabilecek maliyetleri sınırlandırmak için, iletkenlerin nominal çalışma sıcaklıkları geçilmemelidir. Ayrıca güç kayıplarından dolayı oluşan maliyetler, bütün maliyetler (yıkım, inşaat, kurulum, iletken, güç kayıpları ve arazi maliyetleri) arasında en önemlisidir. Bir önceki paragrafta da açıkça görüldüğü gibi nominal değerlerin dışına çıktığı zaman güç kayıpları fazlasıyla artmakta ve emniyet marjı kalmamaktadır. Bundan dolayı, iletkenlerin üzerinden yüksek akımlar çekmek yerine nominal akım taşıma kapasitesi altında çalıştırarak, acil durumlarda ekstra akım taşınabilecek bir marj bırakılması esneklik yaratacaktır. Yine daha önce de bahsedildiği gibi Kuzey Amerika'daki uygulama bu konu hakkında en iyi örnektir (Nuchprayoon ve Chaichana, 2017; Tokombayev ve Heydt, 2015). Güç kayıplarından dolayı ortaya çıkan maliyet önemli olmakla beraber yatırımcının diğer maliyet kalemlerini de dikkate alması gerekmektedir (Barthold vd., 2008).

Yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Fakat şebekelere entegrelerinde sorunlar çıkmakta ve bu da yenilenebilir enerji kaynaklarının, sisteme katkı verememesini ve olası maliyet düşüşlerini engellemektedir. Kısaca bu sorunlardan bahsetmek gerekirse, yenilenebilir enerjinin dağıtım sistemine entegre olurken bu sırada yük akışı, kısa devre ve koruma koordinasyon yapısının değişmesi gerekmekte ve bu değişimden dolayı enerji sistemlerinde önemli miktarda gerilim ve güç dalgalanmaları yaşanmakta ve adalasma meydana geldiği zamanda frekans ve gerilimde önemli miktarda değişimler gözlenmektedir (Çetinkaya, 2014). Ayrıca bu sorunlarla ilgili olarak yenilenebilir enerjinin şebekeye entegrasyonunda üretilen pik değerler sistem açısından sıkıntı oluşturabileceği düşünülürse, bu enerji kaynağı sisteme sokulmayabilir. Sisteme entegre edilmemesinin diğer bir nedeni olarak da konvansiyonel iletkenin kullanıldığı ve maksimum çekeceği akımın veya nominal çalışma sıcaklığının aşılabileceği durumlarda bu iletkenlerin kullanım ömürlerini olumsuz yönde etkilediği için sisteme dahil edilmeyebilirler. Yine bu sorunları çözmek adına HTLS iletkenleri mevcut iletkenlerin yerini alarak sıcaklık ve akım değerlerini yükselterek şebekeye entegrasyonları sağlanabilmektedir. Özetle, yenilenebilir enerji kaynaklarının ürettiği enerji, mevcut havai hatlarla taşınmaktadır (Ippolito vd., 2018). Fakat daha önce de bahsedilen sorunlardan dolayı, eğer ki sorun iletkenin kapasitesiyle ilgili bir sorun ise, HTLS iletkenleriyle bu sorun kolayca çözülebilmektedir (Favuzza vd., 2015). Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan sorunlar çözülebilirse, elektrik fiyatlarında düşüş ve talebi karşılamadaki esneklik payı elektrik piyasası için olumlu özellikler getirmesi öngörülmektedir (Riba vd., 2020).

Yeni hat inşasının birçok nedenden dolayı uzun yıllar sürebileceği gözlemlenmektedir. Yapılan maliyet analizlerine bakıldığında görülmüyor ki, tüm güç kayıplarına rağmen HTLS iletkenlerinin iyi bir alternatif oluşturacağı gözlenmektedir. Ayrıca doğru bir plan ve nominal çalışma aralıklarına dikkat edilirse güç kayıplarından dolayı oluşan maliyetlerinde bir nebze kontrol altına alınabileceği görülmektedir (Gorur vd. 2014).

Enerji tüketicileri, mevcut sistemlerde enerji kesintisi olmadan, düşük maliyetli elektrik kullanmak, elektrik üreticileri ve dağıtıcıları da kurdukları hatların uzun süreli ve düşük işletme maliyetiyle, birim enerji fiyatlarının düşük olmasını sağlamaya ve kârlarını artırmaya çalışmaktadırlar. Bundan dolayı kullanım ömrü dolan ya da sistemin gerekliliklerini artık karşılayamayan iletkenlerin değişmesi, enerji üretim yerlerinin iletim hattına yakın olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonu ve iyi bir iletim altyapısı enerji maliyetlerini düşürme de büyük önem taşımaktadır (Gorur vd. 2014).

#### 4. Sonuç (Result)

Bu çalışmada, mevcut havai iletim hatlarının, mevcut taşıma kapasitelerini HTLS iletkenlerle artırılıp artırılamayacağına ve bunun maliyet analizinin nasıl olacağına dair kapsamlı literatür taraması sunulmuştur. Konvansiyonel ACSR iletkenleri yerine HTLS iletkenlerinin kullanılmasının avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Düşük termal uzama katsayısından dolayı düşük sehim ve düşük elektrik direnci olması, iyi bir gerilme kuvveti sunması ve akım taşıma kapasitesinin daha yüksek olması avantajları arasında sıralanabilir. Yüksek iletken maliyetleri ve artan güç kayıpları ve bu kayıplardan dolayı oluşan işletme maliyetleri dezavantajları arasında yer almaktadır. İletkenleri, nominal çalışma sıcaklığının altında çalıştırarak bu dezavantajların bir bölümü giderilebilir.

Maliyet bakımından incelendiğinde, HTLS iletkenlerinin talep artışından dolayı ortaya çıkan mevcut iletkenlerin yetersizliğini çözmek adına önemli bir alternatif olduğu, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme dahil edilmesinde yarar sağladığı, üretimin pik yaptığı zamanlarda yüksek akım taşıma kapasitesinden dolayı sistemi rahatlattığı, düşük yük faktörlerinde düşük güç kayıplarının olduğu ve yeni bir hat inşası sorununa çözüm olabileceğini göstermektedir. Tüm bunlarda yıkım, inşaat, kurulum, iletken, güç kayıpları, arazi ve işletme maliyetleri konusunda HTLS iletkeninin tipine (ACSS mi ACCC mi vs.) göre yararlar sağladığı, bir yatırım yapılacağı zaman HTLS iletkeninin tipine göre ekonomik analiz yapılması gerektiği gözlenmiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde yürütülmekte olan “Yüksek Gerilim Enerji İletim Hatlarında Yüksek Sıcaklık Düşük Sehimli İletkenin Kullanımı” başlıklı lisansüstü tezi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

#### Kaynaklar (References)

- Akgöl, O., Kıstı, E.A., Karaaslan, M., Ünal, E., 2018. Kompozit Özlü Alüminyum İletkenlerin (ACCC) üretilmesi ve iletkenliğinin yükseltilmesi için yapılan çalışmalar. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(2), 657-669.
- Albizu, I., Fernandez, E., Mazon, A.J., Bedialauneta, M., Sagastabeitia, K., 2011. Overhead conductor monitoring system for the evaluation of the low sag behavior. In 2011 IEEE Trondheim PowerTech, 1-6.
- Albizu, I., Mazón, A.J., Valverde, V., Buigues, G., 2010. Aspects to take into account in the application of mechanical calculation to high-temperature low-sag conductors. IET generation, transmission & distribution, 4(5), 631-640.
- Albizu, I., Mazon, A.J., Zamora, I., 2005. Methods for increasing the rating of overhead lines. In 2005 IEEE Russia Power Tech, 1-6.
- Arcia-Garibaldi, G., Cruz-Romero, P., Gómez-Expósito, A., 2018. Future power transmission: Visions, technologies and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 285-301.
- Ardelean, I., Oltean, M., Florea, G., Mateescu, E., Mărginean, D., Kilyeni, Ş., Bărbulescu, C., 2011. Case study on increasing the transport capacity of 220 kV DC OHL Iernut-Baia Mare by reconditioning using LM technologies. In 2011 IEEE PES 12th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO), 1-7.
- Bağrıyanık, F.G., 2000. Enerji iletim sistemlerinde 3-faz-6-faz dönüşümlerinin iletim kapasitelerine etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Barrios, H., Schrief, A.B., Schnettler, A., 2017. A network reinforcement method based on bottleneck indicators. In 2017 IEEE Manchester PowerTech, 1-5.
- Barthold, L.O., Douglass, D.E., Woodford, D.A., 2008. Maximizing the capability of existing AC transmission lines. CIGRE, Session 2008, 2008, 1-8.
- Beryozkina, S., 2019. Evaluation study of potential use of advanced conductors in transmission line projects. Energies, 12(5), 822.

- British Petroleum[BP]. Statistical Review of World Energy 2021. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (Erişim Tarihi: 27.01.2022).
- Capelli, F., Riba, J.R., Gonzalez, D., 2016. Thermal behavior of energy-efficient substation connectors. In 2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 104-109.
- Capelli, F., Riba, J.R., Sanllehi, J., 2017. Finite element analysis to predict temperature rise tests in high-capacity substation connectors. IET Generation, Transmission & Distribution, 11(9), 2283-2291.
- CTC Global. Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC Conductors. [https://ctc-media.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/20181218185439/Engineering\\_Transmission\\_Lines\\_with\\_ACCC\\_Conductor.pdf](https://ctc-media.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/20181218185439/Engineering_Transmission_Lines_with_ACCC_Conductor.pdf) (Erişim Tarihi: 27.01.2022)
- Çetinkaya, H.B., 2014. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Şebekeye Entegrasyonu. 2. Uluslararası İstanbul Akıllı Şebekeler Kongre ve Fuarı, 2014, 72-75.
- Dave, K., Mohan, N., Deng, X., Gorur, R., Olsen, R., 2012. Analyzing techniques for increasing power transfer in the electric grid. In 2012 North American Power Symposium (NAPS), 1-6.
- Dawson, L., Knight, A.M., 2016. Transmission line length, operating condition and rating regime. In 2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 1-6.
- Domínguez, A.H., Escobar, A., Gallego, R.A., 2014. Transmission expansion planning considering conductor proposals with different wire size and technology. In 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA), 1-6.
- Exposito, A.G., Santos, J.R., Romero, P.C., 2007. Planning and operational issues arising from the widespread use of HTLS conductors. IEEE Transactions on Power Systems, 22(4), 1446-1455.
- Favuzza, S., Ippolito, M.G., Massaro, F., Paterno, G., Puccio, A., Filippone, G., 2015. A new approach to increase the integration of RES in a mediterranean island by using HTLS conductors. In 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 272-277.
- Filippone, G., Ippolito, M.G., Massaro, F., Puccio, A., 2014. On the roadmap to Supergrid in Sicily: LIDAR technology and HTLS conductors for uprating the 150 kV lines. In IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, 1-5.
- Ghassemi, M., 2019. High surge impedance loading (HSIL) lines: A review identifying opportunities, challenges, and future research needs. IEEE Transactions on Power Delivery, 34(5), 1909-1924.
- Gorur, R., Heydt, G.T., Hedman, K., Olsen, R., 2014. Making the economic case for innovative HTLS overhead conductors. PhD Thesis, Washington State University, Tempe, Arizona.
- Hill, T., Bryant, D., 2013. Experience and benefits of using high temperature low sag (HTLS) overhead conductors. In 24th AMEU Technical Convention, 2013, 1-5.
- IEEE Power and Energy Society. 1283-2013-IEEE guide for determining the effects of high-temperature operation on conductors, connectors, and accessories. 2013. New York.
- IEEE Power and Energy Society. IEEE guide to the installation of overhead transmission line conductors. IEEE Std 524-2003 (Revision of IEEE Std 524-1992) 2004, 1-141, 2004.
- Ippolito, M.G., Massaro, F., Cassaro, C., 2018. HTLS Conductors: A Way to Optimize RES Generation and to Improve the Competitiveness of the Electrical Market—A Case Study in Sicily. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2018(4), 1-10.
- Kamboj, S., Dahiya, R., 2011. Application of GPS for sag measurement of overhead power transmission line. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 3(3), 268-277.
- Karabay, S., Şen, A. Enerji nakil hatlarının ekonomik ömürlerinin tamamlanması safhasında kullanılacak yeni nesil havai hat iletkenleri ve malzemeleri. [https://makinecim.com/bilgi\\_1046\\_enerji-nakil-hatlarinin-ekonomik-omurlerinin-tamamlanmasi-safhasinda-kullanilabilecek-yeni-nesil-havai-hat-iletkenleri-ve-malzemeleri](https://makinecim.com/bilgi_1046_enerji-nakil-hatlarinin-ekonomik-omurlerinin-tamamlanmasi-safhasinda-kullanilabilecek-yeni-nesil-havai-hat-iletkenleri-ve-malzemeleri) (Erişim Tarihi: 27.01.2022)
- Karabay, S., Yılmaz, M., Zeren, M., 2003. AA-6101 alaşımının yüksek gerilim çıplak havai hatlarında AAAC iletkeni olarak kullanımı. Metalurji Dergisi, 132, 56-32.
- Karimi, S., Musilek, P., Knight, A.M., 2018. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 600-612.
- Kavanagh, T., Armstrong, O., 2010. An evaluation of High Temperature Low Sag conductors for uprating the 220kV transmission network in Ireland. In 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, 1-5.
- Kenge, A.V., Dusane, S.V., Sarkar, J., 2016. Statistical analysis & comparison of HTLS conductor with conventional ACSR conductor. In 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) 2955-2959.
- Kıstı, E., 2016. Kompozit özlü alüminyum iletkenlerin (ACCC) üretilmesi ve iletkenliğinin yükseltilmesi için yapılan çalışmalar. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Kishore, T.S., Singal, S.K., 2014. Optimal economic planning of power transmission lines: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 949-974.
- Kopsidas, K., 2009. Modelling thermal rating of arbitrary overhead line systems. PhD Thesis, The University of Manchester, United Kingdom.
- Kumar, M., Rahangdale, M.R., 2018. Comparative analysis of ACSR and HTLS conductor. International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering, 4(5), 29-35.
- Kwon, J., Hedman, K.W., 2015. Transmission expansion planning model considering conductor thermal dynamics and high temperature low sag conductors. IET Generation, Transmission & Distribution, 9(15), 2311-2318.
- Lauria, D., Quaia, S., 2017. An investigation on line loadability increase with high temperature conductors. In 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 645-649.
- Lumbreras, S., Ramos, A., 2016. The new challenges to transmission expansion planning. Survey of recent practice and literature review. Electric Power Systems Research, 134, 19-29.

- Mateescu, E., Marginean, D., Florea, G., Gal, S.I.A., Matea, C., 2011. Reconductoring Using HTLS Conductors. Case study for a 220 kV double circuit transmission LINE in Romania. In 2011 IEEE PES 12th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO), 1-7.
- Milli Eğitim Bakanlığı [MEB]. Havai Enerji Hatları. [https://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Havai%20Enerji%20Hatları.pdf](https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Havai%20Enerji%20Hatları.pdf) (Erişim Tarihi: 27.01.2022)
- Misaghi, F., Barforoushi, T., 2017. Evaluation of regulatory impacts on investments of distributed generation and upstream network under uncertainty: a new stochastic bi-level model. *CIREN-Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 2744-2748.
- Mohtar, S.N., Jamal, N., Sulaiman, M., 2004. Analysis of all aluminum conductor (AAC) and all aluminum alloy conductor (AAAC). In 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004. 100, 409-412.
- Moreira, L., Lopes, A., 2017. Use of high-temperature conductors in existing lines: economic and environmental benefits. *CIREN-Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 481-486.
- Nasuruddin, N.B.A., Ariffin A.B., Ryuta, O., 2018. High temperature low sag (HTLS) overhead transmission line conductor. 22nd Conf Electr Power Sup Ind CEPSE, 1-8.
- Nogales, S.C., Miñana, J.A.L., Alonso, A., Comech, M.P., García-Gracia, M., Martín, E., 2009. HTLS and HVDC solutions for overhead lines uprating. In Proc. of the 11th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering, 2009, 1-5.
- Nuchprayoon, S., Chaichana, A., 2017. Cost evaluation of current uprating of overhead transmission lines using ACSR and HTLS conductors. In 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/I&CPS Europe), 1-5.
- Nuchprayoon, S., Chaichana, A., 2018. Performance comparison of using ACSR and HTLS conductors for current uprating of 230-kV overhead transmission lines. In 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/I&CPS Europe), 1-5.
- Özal, T. Elektrifikasyon Planı ve Türkiye'de Elektrik Enerjisinin İstikbali Hakkında Düşünceler. [https://www.emo.org.tr/ekler/403e002e8df6f9c\\_ek.pdf?dergi=410](https://www.emo.org.tr/ekler/403e002e8df6f9c_ek.pdf?dergi=410) (Erişim Tarihi: 27.01.2022).
- Pierre, B.J., Heydt, G.T., 2012. Increased ratings of overhead transmission circuits using HTLS and compact designs. In 2012 North American Power Symposium (NAPS), 1-6.
- Pirovano, G., Mazzarella, F., Posati, A., Piccinin, A., Scarietto, S., 2014. Creep behaviour of high temperature low sag conductors. *Cigré Sess*, 2014, 1-14.
- Rahman, S.A., Kopsidas, K., 2018. Impact of simplified convection model in overhead lines thermal rating calculation methods. In 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 1-9.
- Rahman, S.S., Azeem, A., Ahammed, F., 2017. Selection of an appropriate waste-to-energy conversion technology for Dhaka City, Bangladesh. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(2), 99-104.
- Riba, J.R., Bogarra, S., Gómez-Pau, Á., Moreno-Eguilaz, M., 2020. Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 1103-1134.
- Saudeger, K., 2017. Enerji iletim hatlarında kullanılan direklerdeki gelişmeler. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Shivashankar, G.S., 2017. Overview of different overhead transmission line conductors. *Materials Today: Proceedings*, 4(10), 11318-11324.
- Silva, A.A.P., Bezerra, J.M.B., 2012. Applicability and limitations of ampacity models for HTLS conductors. *Electric Power Systems Research*, 93, 61-66.
- Thrash, F.R., 2001. ACSS/TW-An improved high temperature conductor for upgrading existing lines or new construction. In 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262), 1, 182-185.
- Tokombayev, A., Heydt, G.T., 2013. High temperature low sag (HTLS) technologies as upgrades for overhead transmission systems. In 2013 North American Power Symposium (NAPS), 1-6.
- Tokombayev, A., Heydt, G.T., 2015. High temperature low sag upgrades and payback for the economic operation improvement of power transmission systems. *Electric Power Components and Systems*, 43(3), 345-355.
- Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı. Bulgaristan Enerji Sektörü. [https://ticaret.gov.tr/data/5b8a43355c7495406a2276c0/2017\\_Bulgaristan\\_Enerji.pdf](https://ticaret.gov.tr/data/5b8a43355c7495406a2276c0/2017_Bulgaristan_Enerji.pdf) (Erişim Tarihi: 27.01.2022)
- Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi [TEİAŞ]. 2021-2030 Talep Tahmin Raporu. <https://webapi.teias.gov.tr/file/538d66ee-4d9e-4711-a29c-1e31dae54e8f?download> (Erişim Tarihi: 27.01.2022).
- Waters, D.H., Hoffman, J., Hakansson, E., Kumosa, M., 2017. Low-velocity impact to transmission line conductors. *International journal of impact engineering*, 106, 64-72.
- World Energy Outlook [WEO]. 2021 yılı raporu. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf> (Erişim Tarihi: 27.01.2022).
- Yasaranga, H.B.D., 2015. Techno economic analysis of the use of high temperature low sag (HTLS) conductors in the Sri Lanka's transmission system. PhD Thesis, The University of Moratuwa, Sri Lanka.
- Yasaranga, H.B.D., Wijayapala, W.D.A.S., Hemapala, K.T.M.U., 2017. Techno economic analysis of the use of high temperature low sag (HTLS) conductors in the Sri Lanka's transmission system. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 50(1).
- Zamora, I., Mazon, A.J., Eguia, P., Criado, R., Alonso, C., Iglesias, J., Saenz, J.R., 2001. High-temperature conductors: a solution in the uprating of overhead transmission lines. In 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502), 4, 6.
- Zheng, Y., Niu, S., Shang, Y., Shao, Z., Jian, L., 2019. Integrating plug-in electric vehicles into power grids: A comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 424-439.