

Enerji İletim Hattı Direklerinde Kullanılan Camper İletken Takımının Rüzgâr Etkisi Altında Davranışının Sonlu Eleman Yöntemi ile İncelenmesi

Finite Element Analysis (FEA) of a Jumper Conductor Set used in Power Transmission Line Towers under Wind Effect

Burak Talha Kılıç¹, Eray Baran², Mete Uzar³

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

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

³TEİAŞ İletim Hatları Müdürlüğü
mete.uzar@teias.gov.tr

Özet

Enerji iletim hattı durdurucu direklerinde kullanılan camper iletkenleri hatta dik yönde oluşan rüzgâr etkileri altında salınım hareketi yaparak direk gövdesine yakınlaşabilmekte ve hat açması durumu oluşabilmektedir. Bu durumu engellemek için camper iletkenleri orta noktalarından askı izolatörü ile direk konsoluna sabitlenmekte ve ilave olarak karşı ağırlık asılmaktadır. Bu çalışmada 420 kV iletim direklerinde kullanılan 1272 MCM ACSR tipi camper iletkeninin rüzgâr yükü altında davranışı ve karşı ağırlık büyüklüğünün ve konumunun bu davranışa olan etkisi sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında, iletken üzerine laboratuvar ortamında mekanik yüklemeler yapılarak eğilme rijitliği elde edilmiş, fiziki model üzerinde ölçümler yapılarak sehim profili belirlenmiştir. Böylelikle, sayısal analiz modelinin doğrulaması yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, camper iletkeninde rüzgâr etkisi ile oluşacak yan salınımların, karşı ağırlık büyüklüğünü ve konumunu değiştirerek kontrol edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Camper İletkeni, Enerji İletim Hatları, Sonlu Eleman Yöntemi

Abstract

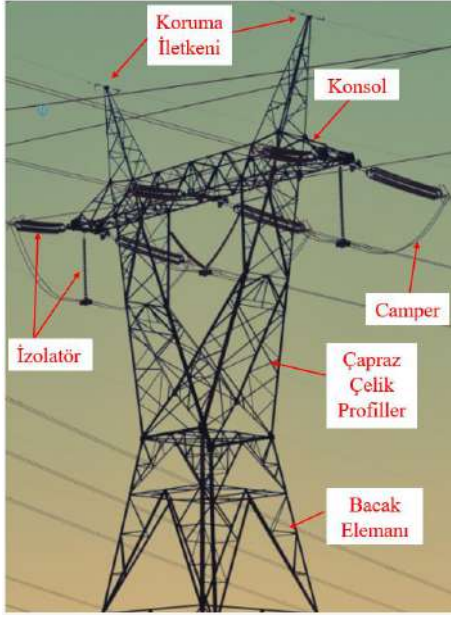
Wind-induced oscillation of jumper conductors used in tension-type power transmission line towers may cause a short circuit condition in certain cases. In order to prevent such a condition, oscillation of jumper conductors is controlled by some preventive measures, such as suspending the jumper conductor from the tower

cross-arm with an insulator and attaching a counterweight to the conductor. In this study, behavior of a 1272 MCM ACSR type jumper conductor set used in 420 kV power transmission lines under wind load and the effect of the counterweight size and position on this behavior were investigated by finite element analyses. Within the scope of the study, bending stiffness was obtained by mechanical loading on the conductor in the laboratory and the sag profile was determined by making measurements on the physical model. Thus, the numerical model was validated. The results of the analyses indicate that the wind-induced lateral oscillations in the jumper conductor can be controlled by arranging the counterweight size and position.

Keywords: Jumper Conductors, Power Transmission Line, Finite Element Method

1. Giriş

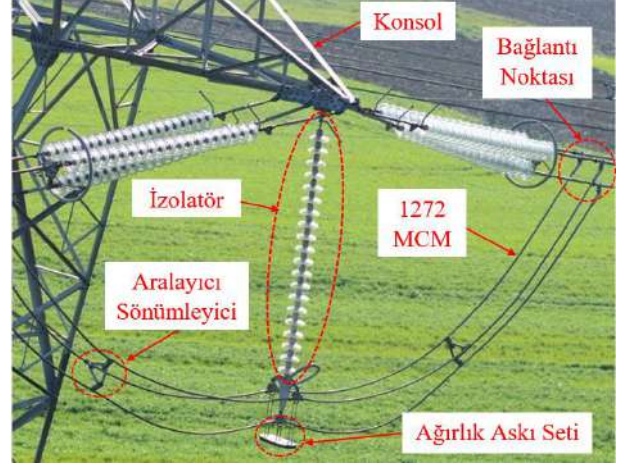
Ülkemizde ve dünya genelinde enerji iletiminin neredeyse tamamı havai hatlar ile gerçekleştirilmektedir. Havai hatlarda iletkenler, çoğunlukla çelik profillerden üretilmiş farklı ölçü ve yapısal özelliklere sahip direk yapıları ile taşınmaktadır. Hat üzerinden geçen enerji seviyesine ve hat içerisindeki görevine bağlı olarak direk yapıları değişiklik göstermektedir. Temel olarak iletim direkleri direk gövdesi, konsollar ve izolatörler olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Tipik bir enerji iletim hattı direk yapısının bileşenleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



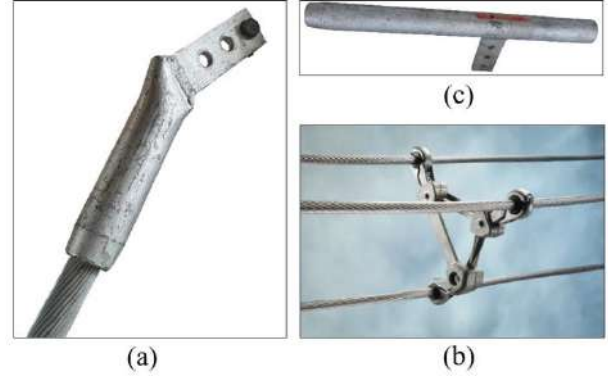
Şekil 1. Örnek bir enerji iletim direği ve temel bileşenleri

Konsol elemanları genellikle çelik profillerden oluşturulmuş ve temel amacı iletkenleri direk gövdesinden belirli bir mesafe uzaklıkta ve güvenli bir şekilde taşımak olan yapılardır. İletkenler çoğunlukla konsolların uç kısımlarına izolatörler aracılığı ile sabitlenmektedir. Askı ve gergi tipi izolatörler sahip oldukları düşük elektrik iletkenliği sayesinde iletkenleri direk yapısından yeterli fiziki mesafede tutarak gerekli izolasyonu sağlar.

Enerji nakil hatlarında durdurucu direklerde hat doğrultusunda direğin iki tarafında bulunan gergi izolatörleri arasında camper ("jumper") iletkeni kullanılarak direğin iki tarafındaki iletkenler üzerindeki enerji akışı sağlanmaktadır. İletim hattı durdurucu direklerinde camper iletkenlerin uzunluğunun nispeten fazla olduğu durumlarda bu iletkenler orta noktalarından bir izolatör kolu yardımıyla direk konsoluna sabitlenerek rüzgâr etkisi altında oluşacak salınımlar azaltılmaktadır. Yine aynı amaçla, camper iletkeni üzerine karşı ağırlık sabitlenmesi uygulaması da yapılmaktadır. Örnek bir camper iletkeni uygulaması ve bileşenlerinin detayı Şekil 2'de verilmiştir. 1272 MCM tipi iletken kullanılan bu örnekte, konsolun iki tarafında gergi izolatörleri, konsolun alt kısmından camper iletkeninin orta noktasına kadar ise askı izolatörü kullanılmaktadır. Camper askı izolatörünün alt ucunda bulunan ağırlık askı setine ağırlık plakaları yerleştirilmektedir. Bu şekilde ilave ağırlık kullanılmasının temel amacı hatta dik yönde oluşacak yüksek rüzgâr etkileri altında camper iletkeninin salınım hareketlerini kontrol altına almaktır. Camper iletkeni direğin iki tarafında bulunan iletkenlere topbaşı adı verilen bağlantı aparatları ile sabitlenmektedir. Ayrıca, belirli aralıklarla alüminyumdan oluşmuş aralayıcı sönümleyici yerleştirilerek (Şekil 3), kablolar arasında mesafenin korunması sağlanmaktadır.



Şekil 2. Jumper iletken takımı bileşenleri



Şekil 3. (a), (b) Topbaşı bağlantı aparatları; (c) Aralayıcı sönümleyici

Ülkemizde takip edilen güncel uygulamada camper iletkenlerinde 100 kg karşı ağırlık camper iletkenin orta noktasına asılmaktadır. Bu çalışmada, karşı ağırlık seviyesi ve konumunun camper iletkenlerin yatay deplasman davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye'de kullanılan tipik bir camper iletkeninin sonlu eleman yöntemi ile sayısal modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu modeller kullanılarak, farklı karşı ağırlık kütlesi konumları için camper iletkeninin salınım hareketleri incelenmiş ve performans değerlendirmesi yapılmıştır. Sonlu eleman modelinde kullanılan kablo sehim profili ve kesit bilgileri varsayımları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında 1272 MCM ACSR iletken kullanılarak oluşturulan tam ölçekli fiziki düzenek üzerinde yapılan ölçümlerle doğrulanmıştır.

2. Literatür İncelemesi

Yan ve diğerleri tarafından Çin'de yapılan bir çalışmada, 500 kV kapasiteye sahip enerji iletim direkleri ve direk elemanları sonlu eleman yöntemi ile modellenerek rüzgâr yükü altında dinamik olarak analiz edilmiştir (2010). Çalışma kapsamında stokastik rüzgâr alanları dikkate alınarak şartnamelerinde bulunan dinamik rüzgâr yükü katsayısının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Thomas ve Peyrot tarafından yapılan bir çalışmada, rijit kabul edilen direkler arasında bulunan iletkenlerin kopma durumları

önerilen numerik yöntem ile araştırılmıştır (1982). Bu çalışmada izolatör ve iletkenler kablo elemanları olarak modellenmiştir. Klasik modellemeye ek olarak bir miktar basınç gerilmesi karşılayabilen kablo elemanları geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında rüzgâr, iletken kopması gibi yüklemelerin yanı sıra ve iletkenlerin titreşim durumları dinamik analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. McClure ve Lapointe sonlu eleman yöntemi kullanarak iki adet iletim hattı direğini iletken kopması sonucu oluşan dengesiz yükleme ve iletkenlerde buz dökülmesi durumlarını dikkate alarak incelemiştir (2003). Çalışmada kullanılan sayısal analiz modelinde iletkenler sadece çekme kuvveti taşıyabilen lineer elastik elemanlar olarak modellenmiştir. Jamaledine ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada küçük ölçekli ve iki açıklıklı bir iletim hattı modeli laboratuvar ortamında kurulmuş ve buz dökülmesini temsil eden durum altında test edilmiştir (1993). Yapılan fiziksel modelin sayısal analiz modeli de oluşturulmuş ve statik yükleme altında analiz edilmiştir. Modelleme esnasında, iletkenler sadece çekme kuvveti taşıyan kafes elemanı olarak modellenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak iletim hatlarında bulunan iletkenler kopma durumları ve buz dökülmesi gibi dengesiz yükleme yaratan durumlar için incelenmiştir. Rüzgâr gibi daha karmaşık ve dinamik karaktere sahip yükleme durumlarının eksikliği dikkat çekmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda modelleme esnasında yapılan basitleştirme ile genel olarak iletkenler sadece çekme bazı durumlarda ise çekme ve bir miktar basınç kuvveti taşıyabilen elemanlar olarak modellenmiştir. Gerçek durum düşünüldüğünde, özellikle rüzgârın etki yönüne göre iletkenlerin eğilme rijitliğinin davranışı önemli seviyede etkileyebilecek bir parametre olduğu bilinmektedir. Son olarak, yapılan çalışmaların birçoğu sayısal modellere dayanmakta olup, fiziksel model ile doğrulanmış çalışmaların çok az sayıda olduğu gözle çarpılmaktadır.

3. 1272 MCM ACSR Camper İletkeninin DeneySEL ve Sayısal İncelemeleri

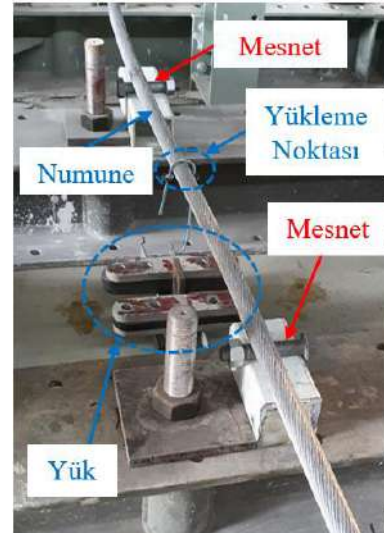
Camper iletkeninin davranışının sayısal analiz modeline gerçekçi bir şekilde yansıtılmasını sağlamak üzere üç aşamalı bir çalışma yapılmıştır. Birinci aşamada, 1272 MCM ACSR iletkeni üzerinde eğilme testi yapılarak, eğilme rijitliği elde edilmiştir. İkinci aşamada, iletken laboratuvar ortamında iki rijit mesnet arasında sabitlenerek zati ağırlık altında sehim profili elde edilmiş ve elde edilen bu profil sayısal analiz programının verdiği değerlerle kıyaslanmıştır. Üçüncü ve son aşamada ise, karşılaştırılması yapılan numuneye laboratuvar ortamında ilave düşey yükler uygulanmış ve yapılan ölçümler sonucunda sehim profilleri oluşturulmuştur. Bu çalışmaların ardından, sonlu eleman yöntemi kullanılarak laboratuvarında incelenen iletken parçasının sayısal modeli oluşturulmuş ve aynı yüklemeler sayısal modelde de uygulanarak, iletkenin yükleme altındaki deneysel ve sayısal davranışları kıyaslanmıştır.

3.1. 1272 MCM ACSR Camper İletkeninin Eğilme Rijitliğinin Belirlenmesi

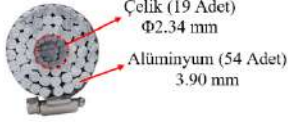
Literatürde kablo elemanları genel olarak yalnızca eksenel çekme rijitliğine sahip olup basınç ve eğilme rijitliği bulunmayan elemanlar olarak dikkate alınmaktadır. Bu basitleştirme mühendislik hesaplarının karmaşıklığını büyük ölçüde azaltmaktadır. Fakat 1272 MCM gibi kompozit ve büyük kesit alanına sahip olan iletken kablolarda eğilme rijitliği davranışa büyük ölçüde etki etmektedir. Her ne kadar iletken kesitini oluşturan alüminyum ve çelik teller arasında aderans olmadığı kabul edilse de tellerin spiral şeklindeki sarımlı ve sürtünme sebebi ile eğilmeye karşı kabul edilir düzeyde rijitlik oluşmaktadır.

1272 MCM ACSR camper iletkenin eğilme rijitliğini belirlemek amacıyla Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında kurulan basit mesnetli kiriş düzeneği (Şekil 4) ile yükleme testi yapılmıştır. Test edilen iletkenin kesit görüntüsü ve teknik özellikleri Şekil 5'te verilmiştir. Deney süresince iletken numuneye uygulanan yük seviyeleri ve numunenin orta noktasında yüke bağlı olarak gerçekleşen deplasmanlar kaydedilmiştir. Yükleme testinde ölçülen yük (P) ve deplasman (Δ) değerleri kullanılarak Denklem 1'e göre iletkenin eğilme rijitliği (EI) hesaplanmıştır. 1272 MCM ACSR iletkenin bu şekilde belirlenen eğilme rijitliği 1.854×10^8 kN/m'dir. Eğilme rijitliğinin değeri temel olarak iletkeni oluşturan malzemelerin elastisite modülünün (E) ve iletken kesitinin atalet momentinin (I) büyüklüğüne bağlıdır.

$$EI = \frac{PL^3}{48\Delta} \quad (1)$$



Şekil 4. İletken kesitinin eğilme rijitliğinin belirlenmesi için kullanılan test düzeneği ve numunesi



Teknik Özellikler:	
Ortalama İletken Çapı (mm)	35.10
Çelik Alanı (mm ²)	81.71
Alüminyum Alanı (mm ²)	645.10
Ağırlık (kg/m)	2.137

Şekil 5. 1272 MCM ACSR iletkeninin kesit görüntüsü ve teknik özellikleri

3.2. Sayısal Modelden Elde Edilen Sehim Profiline Deneysel Ölçüm ile Doğrulanması

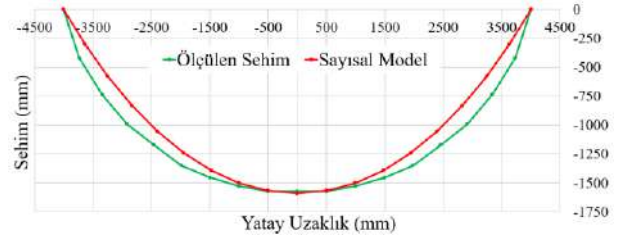
Sonlu eleman analizlerinde kablo elemanların başlangıç geometrisinin deformasyon davranışı üzerinde önemli farklılıklar yarattığı görülmektedir. Camper iletkenin zati ağırlık altındaki başlangıç profilinin gerçekçi olarak belirlenmesi amacıyla laboratuvarda 9 m uzunluğa sahip tam ölçekli 1272 MCM ACSR iletken parçası temiz açıklık 8 m olacak şekilde iki rijit mesnet arasında yerleştirilmiş ve bu iletken numunesi üzerinde sabit oda sıcaklığında sehim ölçümleri yapılmıştır. Oluşturulan düzeneğin görüntüsü Şekil 6'da verilmektedir. İletken numunesinin mesnetlere bağlantısı, iletim hattı direklerinde camper iletkeninin uç bağlantıları için kullanılan topbaşı elemanlarla yapılmıştır. Topbaşı elemanların rijit mesnetlere bağlantısı için kullanılan yöntem dikkate alındığında, iletken uçları düzlem içerisinde mafsal tipi mesnet özelliğine sahipken, düzlem dışında ankastre tipi mesnet özelliği göstermektedir. Mesnetler arasında bulunan referans çizgisi dikkate alınarak iletkenin konumun 1 m aralıklarda lazer metre ile ölçülerek sehim profili belirlenmiştir.



Şekil 6. Camper iletken sehim profilinin belirlenmesi için kullanılan test düzeneği

Laboratuvarda fiziki modeli kurulan iletken numunesinin sehim profilinin sayısal olarak belirlenmesi amacıyla SAP2000 bilgisayar programı kullanılarak analiz modeli hazırlanmıştır. Analiz modelinde, SAP2000 programının kütüphanesinde hazır bulunan kablo elemanı kullanılmış ve bu elemanlara 1272 MCM ACSR iletkenin gerçekçi kesit özellikleri atanmıştır. SAP2000 programı ile sayısal

olarak belirlenmiş sehim profilinin laboratuvarda oluşturulan fiziki model üzerinde belirlenen profille karşılaştırılması Şekil 7'de verilmektedir. İletken üzerinde oluşan maksimum sehim değerleri dikkate alındığında sayısal model ile deneysel ölçümlerin aynı sonuca ulaştığı görülmektedir. Mesnet bölgelerine doğru gidildikçe iki sehim profili arasında bir miktar fark olduğu görülmektedir. Bu farklılığın temel sebebinin laboratuvar modelinde iletkenin mesnetlerinde kullanılan bağlantı detayı olduğu düşünülmektedir. Mesnetlerde kullanılan topbaşı elemanların sahip oldukları geometriden dolayı ve ayrıca bu elemanların iletkenin dönmeye karşı tam olarak serbestlik sağlamadığından dolayı sayısal modelde kullanılan mesnetlenme koşulundan farklı bir durum yaratmaktadır. Ayrıca, sayısal modelde kullanılan sehim hesabında iletkenin eğilme rijitliği ve zati ağırlık seviyesi hesaba katılmamaktadır. Fiziki model ile sayısal model arasındaki bu farklılıklar dikkate alındığında her iki modelden elde edilen sehim profilleri arasındaki farklılığın da kabul edilebilir düzeyde olduğu düşünülmektedir. Bu sonuç, SAP2000 modeli ile belirlenen sehim profilinin, 420 kV camper iletkeninin rüzgâr yükü altındaki sonlu eleman analizinde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.



Şekil 7. Camper iletkeni için zati yük altında deneysel ve sayısal olarak belirlenen sehim profilleri

3.3. 1272 MCM İletkeninin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modellenmesi ve Yük Altında Davranışının Doğrulanması

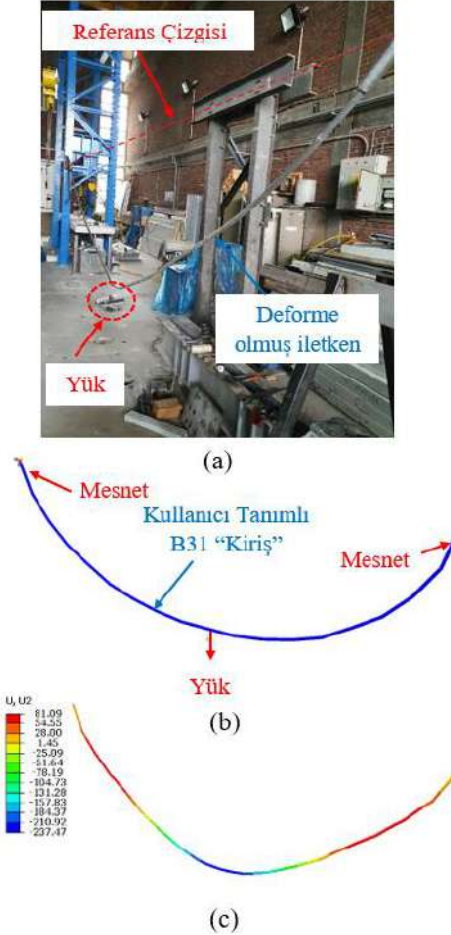
Camper iletken üzerine ağırlık asılması durumunda iletken profilinde oluşacak değişimin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla laboratuvarda oluşturulmuş fiziki modelde iletkenin orta noktasına farklı büyüklüklerde ağırlıklar asılmış ve iletken boyunca oluşan sehim profili sabit oda sıcaklığında ölçülmüştür (Şekil 8a). Bu şekilde, ilave ağırlık altında deneysel olarak belirlenen iletken deformasyon şekilleri camper iletkeninin detaylı sayısal analiz modelinin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır.

Camper iletkeninin detaylı sayısal analizleri Abaqus CAE bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla kullanılan sayısal modelin bir görüntüsü Şekil 8b'de verilmektedir. Sayısal analiz modeli oluşturulurken iletkenin başlangıç geometrisi olarak Şekil 7'de gösterilen ve laboratuvarda kurulmuş olan fiziki model üzerinde yapılan ölçümlere dayanan profil kullanılmıştır. Bu başlangıç geometrisi iletkenin zati ağırlığının etkisini içermiş olduğundan modelde iletken elemanlarına ilave bir zati ağırlık atanmamıştır.

Tablo 1. 1272 MCM ACSR iletkeni için sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme ve geometrik özellikler

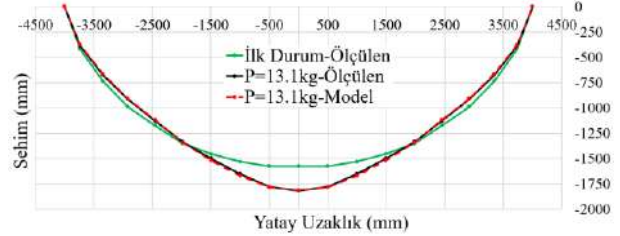
$E_{\text{ç}}$ (GPa)	E_a (GPa)	$A_{\text{ç}}$ (mm ²)	A_a (mm ²)	$n=E_a/E_s$	A_d (mm ²)	EA_d (N.m)	I_d (mm ⁴)	EI_d (N/mm)
200	200	81.71	645.1	0.35	879	6.15E+07	2648	1.85E+08

a: Alüminyum, ç: çelik, d: dönüştürülmüş

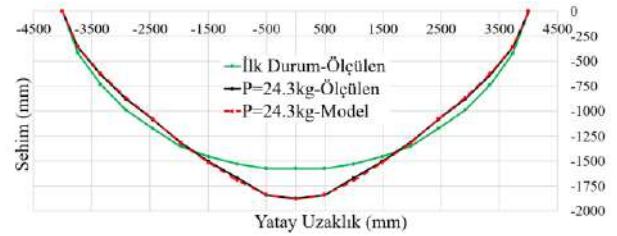


Şekil 8. (a) İlave ağırlık altında deforme olmuş camper iletkeni; (b) Sayısal analiz modelinin görüntüsü; (c) Sayısal modelin tahmin ettiği deformasyon şekli

Oluşturulan modelin uç noktaları düzlem içerisinde mafsallık özellikleri taşıırken, düzlem dışı yönde ankastre mesnet özelliklerine sahiptir. İletkenin modellenmesi için programın kütüphanesinde hazır bulunan B31 tipi çubuk elemanları kullanılmıştır. 1272 MCM ACSR iletkeninin kesiti alüminyum ve çelik tellerden oluştuğundan kompozit bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, kesitin aksel ve eğilme rijitliklerinin hesabı için dönüştürülmüş kesit yaklaşımı kullanılmıştır. Bu sayede kesitin eşdeğer alan ve eşdeğer atalet momenti değerleri doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Tablo 1’de verilen eşdeğer kesit özellikleri Abaqus programında kullanıcı tanımlı profil oluşturularak ilgili elemanlara atanmıştır. Analiz türü olarak “Dynamic, Implicit” adımı kullanılmış ve yükleme türü olarak “Yarı Durağan Yükleme (Quasi-Static Loading)” seçilmiştir. Yapılan analizler sonrasında, iletkenin orta noktasından uygulanmış 13.1 kg ilave yük altında modelde oluşan deformasyon şekli örnek olarak Şekil 8c’de verilmiştir.



Şekil 9. 13.1 kg ilave yük altında deneysel ve sayısal olarak belirlenmiş sehim profilleri



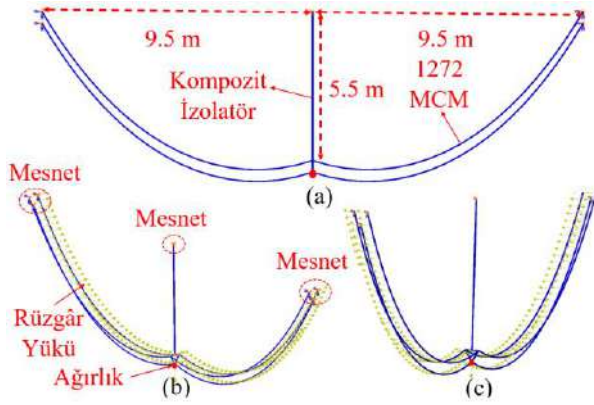
Şekil 10. 24.3 kg yük altında deneysel ve sayısal olarak belirlenmiş sehim profilleri

Sonlu eleman analizleri ile, 13.1 kg ve 24.3 kg ilave ağırlık uygulanması durumunda iletken üzerindeki her bir düğüm noktasında oluşan düşey deplasmanlar belirlenmiş ve ardından Şekil 9 ve Şekil 10’da görülen sehim profilleri elde edilmiştir. Her iki yük seviyesi için de sonlu eleman modelinden elde edilen sehim profillerinin fiziki model üzerinde ölçülmüş profillerle bire bir aynı olduğu görülmektedir. Bu durum, 1272 MCM camper iletkeni için sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme ve kesit bilgileri ile modelleme varsayımlarının doğru ve geçerli olduğunu kanıtlamaktadır.

4. 420 kV Enerji İletim Hatlarında Bulunan Camper İletken Takımının Modellenmesi ve Farklı Yük Askıları Altında İncelenmesi

Önceki bölümlerde bahsedilen fiziki model testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak ve doğruluğu kanıtlanmış olan sayısal modelleme yaklaşımları takip edilerek ülkemizde 420 kV enerji iletim direklerinde kullanılan bir camper iletkeni takımının detaylı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bu modelin bir görüntüsü Şekil 11’de verilmiştir. Görüldüğü üzere, uçlarından mesnetlenmiş ve orta noktalarından bir kompozit askı izolatörüne sabitlenmiş üç adet camper iletkeni modele dahil edilmiştir. İletkenlerin uçlarında tanımlanan mesnetler önceki bölümlerde anlatıldığı gibi düzlem içerisinde mafsallık, düzlem dışında ise ankastre özelliklerine sahiptir. İzolatörün üst kısmında bulunan mesnet kısmı, her yönde mafsallık olacak şekilde modellenmiştir. İletkenler için kullanılan malzeme ve

kesit özellikleri Bölüm 3.3'te detaylı bir şekilde anlatılan ve Tablo 1'de özetlenen bilgilerden oluşmuştur. Kompozit askı izolatörü çubuk elemanları kullanılarak modele dahil edilmiş ve kullanıcı tanımlı kesit ataması yapılmıştır. İzolatör için elastisite modülüsü 77 GPa alınmıştır. Üç iletkenin birbirleri arasında mesafeyi sabit tutmak için kullanılan aralayıcı sönümleyicileri temsil etmek üzere belirli konumlarda düğüm noktaları arasında kısıtlayıcı koşullar ("constraint") tanımlanmıştır. Bu kısıtlayıcı koşullar, iletkenlerin salınım davranışına bir etki de bulunmazken, iletkenlerin aralarında bırakılan mesafenin sabit kalmasına olanak sağlamaktadır. Son olarak, modelde düşey ve yatay yönde olacak şekilde üç farklı yük grubu oluşturulmuştur. Bunlar; (1) iletken ve izolatörün kendi ağırlıkları, (2) izolatör ucuna asılan ağırlık askı seti ve (3) rüzgâr yüküdür. Rüzgâr yükü için Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) Yönetmeliğinde belirtilen rüzgâr yükü belirleme prosedürü takip edilmiş ve iletkenlere 2.43 kg/m olacak şekilde yayılı yük uygulanmıştır. Ayrıca, askı aparatında bulunan yük, ilgili düğüm noktasına yapısal olmayan kütle olarak modelde dahil edilmiştir.



Şekil 11. Camper iletken takımı sayısal modelinin detayları

4.1. Camper İletkeninin Yatay Salınım Davranışına Karşı Ağırlık Etkisi

Camper takımı modeli ilk olarak ağırlık askı aparatı olmadan yalnızca zati ağırlık ve rüzgâr yükü altında analiz edilmiştir. Bu analiz, Tablo 2 ve Şekil 12a'da "Test-1" olarak gösterilmektedir. Test-2 analizinde, halen ülkemizdeki 420 kV elektrik iletim direklerinde kullanılan ve kompozit izolatörün altına asılan 100 kg karşı ağırlık durumu dikkate alınmıştır. Bunun devamında, 100 kg olan askı aparatı ağırlığı 200 kg'a çıkarılarak Test-3 analizi gerçekleştirilmiştir. Test-4'ten başlayarak, 200 kg olan karşı ağırlık modele iki adet 100 kg kuvvet olarak dahil edilmiştir. Bu kuvvetler camper iletkeni merkezine her iki tarafında, merkeze göre simetrik olacak şekilde ve giderek artan mesafelerde yerleştirilmiştir.

Analizler sonucunda, her bir yükleme durumu için camper iletkeninin üzerindeki tüm düğüm noktalarında oluşan yanal deplasman değerleri belirlenerek iletkenin yanal deplasman profili çıkarılmıştır. Bu şekilde

belirlenen yanal deplasman profilleri Şekil 12a'da gösterilmektedir. Grafikteki her bir eğri, camper iletkeninin zati ağırlık, karşı ağırlık ve rüzgâr yükü altında deforme olmuş durumunun üstten görünüşünü yansıtmaktadır. Görüldüğü üzere, karşı ağırlığın büyüklüğü ve camper iletkeni üzerine asıldığı konumu salınım davranışına önemli seviyede etki etmektedir. Herhangi bir karşı ağırlık bulunmaması durumunda iletken üzerindeki maksimum yatay salınım 3610 mm, iletkenin orta noktasındaki yatay salınım ise 3330 mm olmaktadır. Camper iletkeni askı izolatörünün yaklaşık 32° dönmesine karşılık gelen bu seviyede yatay salınımın, hattın güvenilirliği bakımından olumsuz durum oluşturma potansiyeli bulunmaktadır. Camper iletkeninin orta noktasında 100 kg (Test-2) ve 200 kg (Test-3) karşı ağırlık bulunduğu durumlarda maksimum yanal salınım sırasıyla 2590 mm ve 2190 mm olarak gerçekleşmektedir. Bu iki durumda iletkenin orta noktasındaki yanal salınım sırasıyla 2050 mm (21° dönme) ve 1450 mm (15° dönme) olmaktadır.

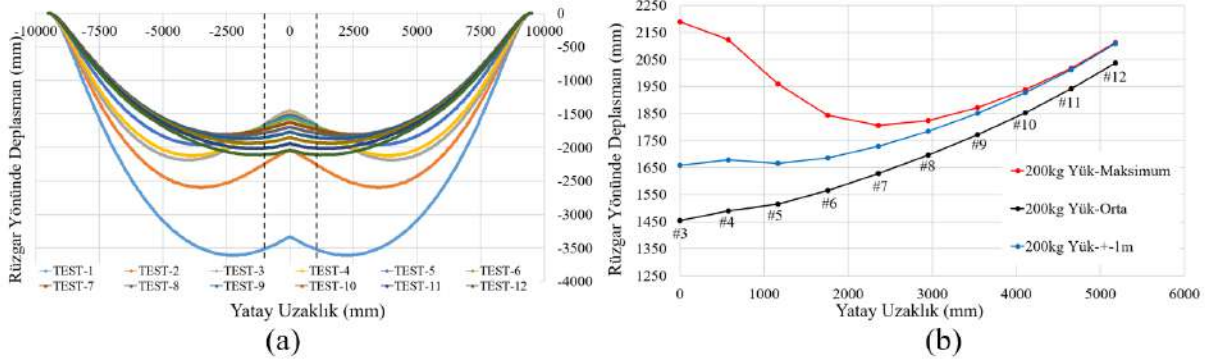
Toplam karşı ağırlığın iki ayrı kütleyle ayrılarak camper iletkeninin orta noktasında simetrik olarak daha uzak noktalara yerleştirilmesi, iletken orta noktasında meydana gelen salınım hareketinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Bu durum Şekil 12b'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Grafikte yer alan kırmızı eğri, 200 kg toplam karşı ağırlığın farklı iletken üzerinde farklı konumlara asılması sonucunda iletken üzerinde oluşan maksimum yatay salınımı, siyah eğri ise her bir durum için iletkenin orta noktasındaki yatay salınımı göstermektedir. Ağırlık askılarının iletken orta noktasından uçlarına doğru kaydırılması durumunda iletken orta noktasındaki yatay salınım sürekli olarak artmaktadır. Ancak, aynı değişim iletken üzerinde oluşan maksimum salınım için geçerli değildir. Karşı ağırlıkların iletken orta noktasından 2360 mm uzaklıkta asılması durumunda (Test-7) maksimum yanal salınımın en küçük değeri elde edilmekte, ancak karşı ağırlıkların bu konumdan iletken ortasına veya uçlara doğru kaydırılması durumunda daha büyük salınımlar oluşmaktadır.

Camper iletkeninin yanal salınımı sırasında dikkat edilmesi gereken kriter iletkenin direk gövdesine ne kadar yaklaştığıdır. Bu durumda, sayısal analiz sonuçları açısından önemli olan bilgi camper iletkeninin maksimum ne kadar salınım yaptığından ziyade direk gövdesinin bulunduğu bölgede oluşan yanal deplasmanların büyüklüğüdür. Bu durumun anlaşılması için, 420 kV durdurucu direkler için konsol seviyesinde ortalama 2 m direk gövde genişliği dikkate alınarak Şekil 12a üzerinde direk gövdesinin konumu siyah kesik çizgilerle gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, incelenen durumların tamamı için maksimum yanal deplasman direk gövdesinin dışarısında oluşmaktadır. Bu durumda, sayısal analiz sonuçları değerlendirilirken iletken üzerindeki maksimum yanal salınım değeri yerine iletken orta noktasındaki yanal salınım değerlerinin dikkate alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

Tablo 2. Camper iletken takımı modelinde kullanılan karşı ağırlık durumları

TEST #	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
İlave karşı ağırlık (kg)	-	100	200	2x100	2x100	2x100	2x100	2x 100	2x100	2x100	2x100	2x100
Karşı ağırlığın konumu* (mm)	-	0	0	574	1163	1760	2360	2955	3540	4108	4656	5182

* İzolatör merkez kabul edilmiştir ve uzaklık simetrik olarak iki yönü temsil etmektedir.



Şekil 12. Karşı ağırlık büyüklüğü ve konumunun camper iletkeni salınıma etkisi: (a) Yanal yönde oluşan deplasman profili; (b) Asılan ağırlığın konumuna göre iletkenin farklı bölgelerinde oluşan maksimum yanal deplasman değerleri

5. Sonuç

Ülkemizde enerji iletim hattı durdurucu direklerinde kullanılan camper iletkeninin yanal salınım davranışının incelenmesi amacıyla laboratuvar fiziki modelleri üzerinde yapılmış ölçümlerle desteklenen sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve sayısal analizler yapılmıştır. 420 kV iletim hatlarında kullanılan 1272 MCM iletken gibi nispeten büyük kesit alanına sahip iletkenlerin sonlu eleman modellerinde standart kablo elemanlarının kullanımı davranışın gerçekçi olarak modele yansıtılmasına engel olmaktadır. Bu tür durumlarda, iletkenler üzerinde yapılacak mekanik yükleme testleri ile kesit eğilme rijitliği belirlenerek sayısal modelde uygun elemanların kullanımı ile bu rijitlik modele yansıtılabilmektedir. Bu tür iletkenlerin sayısal modellenmesi sırasında dikkat edilmesi gereken bir başka konu iletken zati yükü altındaki sehim profilinin gerçekçi bir şekilde modellenmesidir. Sayısal olarak belirlenen iletken sehim profilinin fiziki model üzerinde yapılacak ölçümlerle doğrulanması analiz sonuçlarının güvenilirliğini arttırmaktadır. Bu şekilde doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizlerle, camper iletkeninde rüzgâr etkisi ile oluşacak yanal salınımların, karşı ağırlık büyüklüğünü ve konumunu değiştirerek kontrol edilebileceği gösterilmiştir. Herhangi bir karşı ağırlık kullanılmadığında 32° olan camper askı izolatörü dönmesi 100 kg karşı ağırlık kullanılması durumunda 21°, 200 kg karşı ağırlık kullanılması durumunda 15° olarak gerçekleşmektedir. Karşı ağırlık plakalarını camper askı izolatörünün ucuna takmak yerine iletken uçlarına doğru kaydırma uygulamasının iletken

oluşacak maksimum yanal salınımı belirli ölçüde azaltmakla birlikte, askı izolatörünün dönme miktarını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca iletken üzerine karşı ağırlık takılması yanal salınımları azaltsa bile elde edilen kazanım, montaj zorluğu ve iletken üzerine getireceği ilave yükler düşünüldüğünde, ihmal edilebilecek seviyededir.

6. Kaynaklar

- Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri (EKAT) Yönetmeliği, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2000.
- Jamaledine, A., McClure, G., Rousselet, J., & Beauchemin, R. (1993). Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA. *Computers & structures*, 47(4-5), 523-536.
- McClure, G., & Lapointe, M. (2003). Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines. *Computers & Structures*, 81(8-11), 825-834.
- Thomas, M. B., & Peyrot, A. H. (1982). Dynamic response of ruptured conductors in transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (9), 3022-3027.
- Yan, B., Lin, X., Luo, W., Chen, Z., & Liu, Z. (2009). Numerical study on dynamic swing of suspension insulator string in overhead transmission line under wind load. *IEEE Transactions on power delivery*, 25(1), 248-259.