



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Asma köprüler için bir yıldırımdan korunma sistemi tasarımı

Design of a lightning protection system for suspension bridges

Yazar(lar) (Author(s)): Cüneyt KOÇ¹, Özgür Turay KAYMAKÇI²

ORCID¹: 0000-0002-1345-631X

ORCID²: 0000-0001-7553-6887

To cite to this article: Koç C. ve Kaymakçı T. Ö. “Asma Köprüler için Bir Yıldırımdan Korunma Sistemi Tasarımı”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Koç C. ve Kaymakçı T. Ö., “Asma Köprüler için Bir Yıldırımdan Korunma Sistemi Tasarımı”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1246318

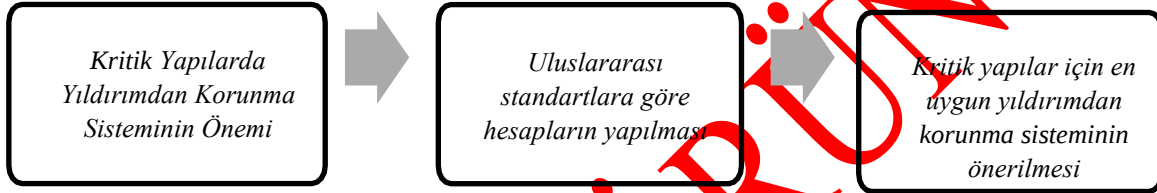
Asma Köprüler için Bir Yıldırımdan Korunma Sistemi Tasarımı

Design of a Lightning Protection System for Suspension Bridges

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bu çalışmada kritik yapılarda yıldırım koruma sisteminin önemi ve uluslararası standartlara göre nasıl tasarlanması gerektiği üzerine çalışılıp, en uygun tasarım sistemi önerilmiştir./ In this study, a hierarchical structure was established for the design of the lightning protection system in critical infrastructures according to international standards.
- ❖ Harici yıldırımdan korunma ve yapının kendisi üzerinden yıldırımdan korunma sistemi tasarımları literatürde uygulanan farklı yaklaşımlar ile karşılaştırılmıştır./ Comparison of external and structure lightning protection system design is done according to characteristic impedance calculation with different literature approaches.
- ❖ Hesaplamalar yapılmış ve kritik yapılar için optimum yıldırımdan korunma sistemi önerilmiştir./ All calculations are done and optimum lightning protection system design is recommended.

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Yıldırımdan korunma sistemi tasarım adımları / Figure. Design steps of lightning protection system

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, kritik yapılarda yıldırımdan korunma sisteminin önemi vurgulanmış ve uluslararası standartlara uygun olarak en uygun tasarım şeklinin seçimi amaçlanmıştır./ Importance of the lightning protection system is stressed and aimed to select optimum design according to international standards.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Literatür taraması yapılarak, uluslararası standartlara göre köprü temel bilgilerine göre yıldırımdan korunma sistemi tasarlanmıştır. Tasarım sırasında köprü yapısının karakteristik empedansı hesaplanıp, yıldırımın boşalması için gereken tüm akım yolu hesapları yapılmıştır. Lightning protection system is designed according to international standards after literature check. Characteristic impedance of the bridge is calculated, and current way of the lightning discharge is calculated.

Özgünlük (Originality)

Yıldırımdan korunma sistemi tasarımı için karakteristik empedans yaklaşımı farklı yapılar için kullanılmış ama ilk defa asma köprü için bu çalışmada kullanılmıştır./ Characteristic impedance calculation approach in lightning protection is done various type of infrastructures but it is used first time in literature for the suspension bridge in this study.

Bulgular (Findings)

Çalışma sonucuna göre kritik yapılar için en uygun yıldırımdan korunma sistemi seçilmiştir. / According to the results of the study, optimum design of lightning protection system is selected.

Sonuç (Conclusion)

Yapılan hesaplamalar sonucunda çelik yapının yıldırımdan korunma için güvenilir bir iletken olduğu kanıtlanmıştır./ Calculated results is proven that steel structure is reliable conductor for the lightning protection system.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Asma Köprüler için Bir Yıldırımdan Korunma Sistemi Tasarımı

Araştırma Makalesi / Research Article

Cüneyt KOÇ^{1*}, Özgür Turay Kaymakçı²

¹ Fluor BV Company, Hollanda

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye
(Geliş/Received : 01.02.2023 ; Kabul/Accepted : 12.06.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 03.09.2023)

ÖZ

Asma köprüler ülkelerde büyük şehirlerin kilit bağlantı noktalarında yer almaktadır. Bundan dolayı yıldırımdan korunma sistemi böylesine önemli kritik yapılarda hayati öneme sahip olmaktadır. Yıldırım çarpması yalnızca can kaybına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda köprüyü ve köprü üzerindeki elektro-mekanik sistemleri de tahrip edebilir. Bu nedenle yıldırımdan korunma sistemi tasarımı çok önemlidir. Bu çalışmada vaka çalışması olarak İzmit ile Yalova illeri arasında bulunan Gebze-İzmir Otoyolunun kilit noktasında yer alan dünyanın en büyük 7. asma köprüsü olan Osmangazi Köprüsü için hesaplar yapılmıştır. Yıldırımdan Korunma Sistemi (YKS) bir bütün olarak incelenmiştir. Benzer çalışmalardan farklı olarak asma köprü yapısının aşağı iniş iletkeni olarak kullanıldığında aynı tepe değerli yıldırım akımı bakımından indirme iletkenine göre daha küçük empedansa sahip olan direk gövdesinin tercih edileceğini hatta bu tür asma köprülerde indirme iletkeni kullanılmayıp doğrudan köprü metal gövdesinin akım yolu olarak kullanılabilceğini gösterilmiştir. Bu çalışmada literatürdeki örneklerinden farklı olarak asma köprülerde yıldırımdan korunma sistemi bir bütün halinde incelenerek gerekli hesaplar ile asma köprüler için en güvenilir sistem önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjili hava kollektörü, konik yay, bulanık mantık, modelleme, çıkış sıcaklığı, termal verim.

Design of a Lightning Protection System for Suspension Bridges

ABSTRACT

Suspension bridges are located on the connection point of big cities. Therefore lightning protection is crucial for that kind of critical structures. Lightning strike not only can cause casualties, but also can destroy the bridge and other electro-mechanical systems. Due to this, lightning protection system design is highly critical. In this article, world's 7th biggest suspension bridge Osmangazi Bridge located in key control projection of Gebze-Izmir Highway between Izmit and Yalova cities are selected for case study calculations. The Lightning Protection System (LPS) has been examined as a whole system. Unlike similar studies, it has been shown that when the suspension bridge structure is used as the down conductor, the tower body with a smaller impedance than the external down conductor in terms of the same peak value and so lightning current will always prefer tower body as down conductor. In this study, unlike the examples in the literature, the lightning protection system in suspension bridges was examined as a whole system and the most reliable system for suspension bridges was proposed with the necessary calculations.

Keywords: suspension bridge, lightning, characteristic impedance, resistivity.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ulaştırma mühendisliği perspektifinden bakıldığında köprüler insanlık tarihindeki en önemli yapılardan birisi olmuştur. Nehir, boğaz ya da vadilerin geçilmesi gereken noktalara inşa edilmiş ve sosyokültürel ve ekonomik hayata çok büyük katkılar sağlamışlardır. Uygun noktalara inşa edilmiş köprüler, ilgili coğrafyalarda ticaretin gelişmesine katkı sağlamış ve toplumların refah düzeyinin artmasında rol oynamıştır[1]. Köprü inşaatının zirvesi olarak düşünülebilecek olan asma köprüler ise gerekli olan mühendislik tecrübesi ve finansman ihtiyacı düşünüldüğünde diğer köprü inşaatlarından hemen farklılaşmakta öyle ki inşaat, jeofizik, elektrik, elektronik, kontrol ve makina gibi birçok mühendislik

disiplininin aktif olarak rol almasını gerektirmektedir.

Dünyada yaklaşık olarak 801 adet Asma Köprü bulunmaktadır ve bu çalışmada vaka çalışması olarak Osmangazi Köprüsü özelinde ilgili hesaplamalar yapılacaktır. Osmangazi köprüsü dünyanın en büyük 7. asma köprü projesidir[2]. Dünyanın en kalabalık 13. büyük şehri olan İstanbul'u Ege körfezine Gebze Orhangazi İzmir otoyolu üzerinden açmasından dolayı Osmangazi Köprüsü çok büyük önem taşımaktadır. Köprünün merkez ayak açıklığı 1550 metre ve yan ayak açıklıkları 580 metredir. Bu köprü Türkiye'de tüm ayakları su altında olan ilk köprü projesidir ve köprü ayakları suyun yaklaşık 40 metre altında yer almaktadır. Kule tepe yüksekliği 252 metreye [3] ulaşmaktadır. Köprünün kuzeyinde Dilovası burnu ve güneyinde ise Altınova Hersek burnu bulunmaktadır.

*Sorumlu Yazar (Cuneyt KOC)
e-posta : cuneytkoc@yahoo.com

Literatür incelendiğinde Osmangazi Köprüsü özelinde yapılan çalışmaların çoğu köprünün ya da ilgili bölgenin inşaat ya da jeofizik mühendisliği merkezli olarak incelenmesini konu almaktadır. Karslıoğlu ve arkadaşları köprünün üç boyutlu sayısal modelini çıkartmışlar ve dinamik etkiler altındaki davranışını incelemişlerdir. Özellikle 1999 İzmit depremi özelinde açığa çıkabilecek sismik davranışların köprü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [1]. Güngör ve arkadaşları ise Osmangazi köprüsünü genel olarak tanıtmış ve kullanılan inşaat mühendisliği tekniklerinden bahsetmişlerdir [4]. Diğer taraftan Osmangazi köprüsünün sosyokültürel hayata olan etkileri de Kolukıncı tarafından incelenmiş ve köprünün kentleşme, kimlik, aidiyet, göç, farkındalık, çevre, üretim ilişkileri gibi sosyolojik parametrelere olan etkisi irdelenmiştir [5].

Lakin disiplinler arası bir proje olarak düşünülmesi gereken bu proje literatürde elektrik mühendisliği perspektifinden yeteri kadar irdelenmemiştir öyle ki denizin ortasında bu kadar yüksek bir yapı yıldırımlar için her zaman bir cazibe merkezi olacaktır. Böyle kritik bir yapıda yıldırım düşmesi, halat kopmasına, yangın çıkmasına ve hatta insanların hayatını kaybetmesine kadar yol açabilecek riskleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu noktada Zoli ve arkadaşlarının köprü yapılarındaki yıldırımların oluşturduğu hasarlardan bahsettikleri makalelerinde Yunanistan'da bulunan Rion Antirion Köprüsü'nde 2005 yılında oluşan kaza örnek olarak gösterilebilir. Köprünün trafiğe açılmasının üzerinden altı aydan kısa bir süre bile geçmeden köprüye düşen yıldırımların sonucunda askı kablolarında hasar oluşmuş ve yangın çıkmıştır. Köprüde önemli bir hasar oluşmadan yangın durdurulmuş olsa da köprü askı kablosu değişene kadar trafiğe kapatılmıştır[6]. Zhongqiang ve arkadaşları kilit bağlanti noktasında bulunan Lishui köprüsünde yıldırımdan korunmanın önemini vurgulamışlardır [7]. Shiranishi rüzgar türbini yapılarında yıldırımın etkisini incelemiş [8] ve Starossek ise aşamalı yıkılma makalesinde yapıların bütün olarak tasarlanmasını incelemiş ve örnek olarak bir kabloda oluşabilecek hasarın tüm köprüyü aşamalı olarak yıkıma götürebileceğini vurgulamıştır[9].

Sektördeki iyi mühendislik uygulamaları incelendiğinde dünyadaki mevcut köprü yapılarında yıldırımdan korunma için harici iniş iletkenli ve yapının kendisi kullanılarak yapılan iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Genellikle yapının kendisinin iniş iletkeni olarak kullanıldığı yıldırımdan korunma sistemleri daha yaygındır [10]. Ancak meydana gelen yıldırım düşmesinin köprülerde oluşabilecek olası yıkıcı sonuçlarını en aza indirebilmek ve olası riskleri engelleyebilmek için yıldırımdan korunma için uluslararası IEC 62305 [11], NFPA 780[12] ve BS 7430 [13] standartları referans alınarak incelendiğinde hangi sistemin kullanılması gerektiği ile ilgili net bir önerinin bulunmamaktadır. Bu kapsamda önerilen sistemin daha güvenilir bir yıldırımdan korunma sistemi olduğuna

ispat etmek için yapıya ait yıldırım hesaplamaları için gerçek veriler kullanılarak yapının iki farklı uygulama tipine göre modelleri çıkarılarak en iyi yıldırım yolunun hangisi olduğu hesaplanmıştır. Bu uygulama tiplerinde yaygın olarak kullanılan yapının kendisinin iniş iletkeni olarak kullanılması birinci yöntem olarak hesaplanmış ve harici iniş iletkenin kullanıldığı sistem ise ikinci yöntem olarak uygulanmıştır. Farklı hesaplama yöntemleri bu ölçekteki bir köprü modeli için ilk defa bu çalışmada uygulanmış ve öneride bulunulmuştur.

2. YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMİ-YKS (LIGHTNING PROTECTION SYSTEM-LPS)

Yıldırımlar insanda güzellik, merak ve de iştisam duygusu uyandıran küresel atmosferik elektrik devresinin doğal bir sonucudur. Bu doğa olayı, elektrik kesintilerine ve hasara neden olma kabiliyeti açısından mühendisleri yıldırımdan korunma sistemlerini tasarlaması için motive ederken, bilim adamlarını ise arkasındaki fiziği ve ekosisteme olan etkilerini açığa çıkartmak noktasında motive etmektedir. Şimşek, atmosferin belirli bir bölgesinin havanın direncini yenecek düzeyde elektrik yüklenmesi durumunda oluşan, gözle görülebilir elektrik boşalması olayıdır. Yıldırım ise bir bulut içinde bir buluttan diğerine, buluttan havaya, buluttan yere veya yerden buluta ani elektrik yükleri akışlarıdır. Zikzaklı bir yol takip eden yıldırımlar için elektriksel yük transferini kolayca gerçekleştirebileceği, elektriksel iletkenliği yüksek yapılar öncelikli hedeflerdir. Bu noktada yıldırım yapılarından toprağa boşalır ve geçen akımlarla orantılı olarak başta canlılar için ölüm riski olmak üzere birçok riski açığa çıkartır.

Bu amaçla yapılarda yakalama ucu, aşağı iniş iletken sistemi ve topraklama sisteminden oluşan bir yıldırımdan koruma sistemi kullanılır ve sistem IEC 62305-3[11] standardında açıklanmıştır. Buna uygun olarak yıldırımdan korunma sistemleri uygun kablo kesitlerinde olmalıdır öyle ki ve yıldırım akımları akar iken uçlarında tehlikeli gerilim oluşmamalıdır.

2.1. YAKALAMA UCU (AIR-TERMINATION SYSTEMS)

Yakalama ucunun işlevi yapıya kontrolsüz olarak doğrudan zarar verecek yıldırımların engellenmesini sağlamaktır. Yakalama ucunun doğru boyutlandırılması sayesinde bir yapıya yıldırımın etkileri kontrollü bir şekilde azaltılabilir.

Yakalama ucu aşağıdaki bileşenleri içerebilir[11];

- Çubuklar
- Gerilmiş teller ve kablolar
- Örgülü iletkenler

Yakalama ucunun yeri belirlenirken, korunacak yapının köşelerinin ve kenarlarının korunmasına özel önem verilmelidir.

Yakalama uçlarının yerleşimlerini belirlemek için üç yöntem kullanılabilir [11];

- Yuvarlanan küre yöntemi
- Kafes yöntemi
- Koruyucu açı yöntemi

Yuvarlanan küre yöntemi, geometrik olarak karmaşık uygulamalar için özellikle tavsiye edilen evrensel yöntemdir.

2.2. AŞAĞI İNİŞ İLETKEN SİSTEMİ (DOWN-CONDUCTOR SYSTEMS)

Aşağı iniş iletken sistemi, elektriksel olarak yakalama uçları ile topraklama arasındaki iletkenliği sağlamaktadır. Aşağı iniş iletken sisteminin amacı yakalama uçları ile yakalanan yıldırımın topraklama sistemine yapının dayanamayacağı sıcaklık artışları olmadan iletilmesidir.

Yıldırım akımının topraklama sistemine boşalımı sırasında yapının zarar görmesini engellemek için aşağı iniş iletkenleri aşağıdaki şekilde tasarlanmalıdır[11];

- Birkaç paralel akım yolu olmalıdır,
- Akım yolların uzunluğu olabildiğince kısa tutulmalıdır (düz, düşey vb.)
- Yapının iletken bağlantıları gerekli noktalarda yapılmalıdır.

2.3. TOPRAKLAMA SİSTEMİ (EARTH-TERMINATION SYSTEMS)

Topraklama sistemi, yıldırım akımının yakalama ucu ve aşağı iniş iletken sistemi vasıtasıyla toprağa boşaltımını sağlar[11]. Buna ek olarak topraklama sisteminin bir diğer görevi de yapının beton kısmı ile eş potansiyel bağ oluşturmaktır. Çeşitli elektrik sistemleri için (yıldırımdan korunma, alçak gerilim sistemleri ve telekomünikasyon sistemleri) ortak bir topraklama sistemi önerilmektedir.

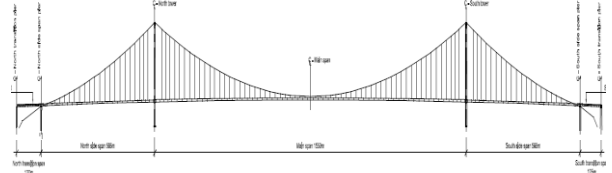
3. OSMANGAZİ KÖPRÜSÜ GENEL BİLGİLER (GENERAL INFORMATION ABOUT OSMANGAZİ SUSPENSION BRIDGE)

Bu çalışma kapsamında inşa edilmiş olan Osmangazi köprüsü incelenmiştir[14]. Osmangazi köprü ayakları suyun yaklaşık 40 metre altında olan Şekil 1'deki gibi 1550 metre ana aralığı, 566 metre kuzey ve güney yan aralıkları bulunan bir köprüdür. Köprü ayaklarının konulacağı deniz yatağındaki bölümler 34.5 metre uzunluğunda ve 2 metre çapında çelik kazıklar(pile) ile kuvvetlendirilmiştir. Kule temeli 15 metre yüksekliğinde ve 54mx68m uzunluğunda bir futbol sahasının yarısı kadar büyüklükte demirle donatılmış içi odacıklara bölünmüş betonarme yapıdır. Çelik kule blokları 22 parçadan farklı uzunluklarda imal edilmiştir ve bloklar sabitleme cıvataları sayesinde birbirleriyle bağlantı sağladıktan sonra içten ve dıştan kaynakla kuvvetlendirilmişlerdir. Kule tepe yüksekliği Şekil 2'deki görüldüğü gibi 252 metreye ulaşmaktadır.

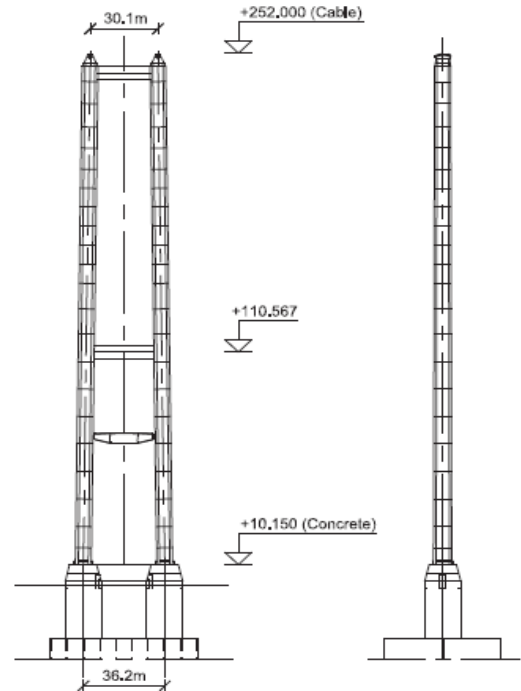
Köprü tabliyeleri, 3 geniş 3 gidiş olacak şekilde 6 şerit olarak Şekil 3'teki şekilde tasarlanmıştır. Tabliyeler

4.75 metre yüksekliğindedir ve tabliyenin alt kısmında kalan alanlarda kablolama, pano yerleşimleri yapılmıştır. Köprünün tüm yükünü taşıyan ana halat kesiti Şekil 4'te görüldüğü şekilde 761 mm çapındadır[3, 14].

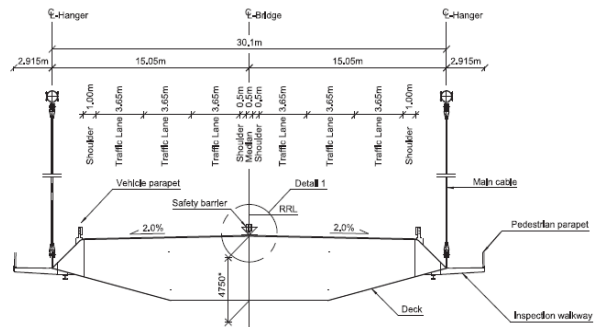
Osmangazi köprüsü bünyesinde birçok yüksek teknoloji kontrol sistemi bulundurmaktadır. Bunlardan bazıları yapı izleme sistemi, anlık trafik izleme sistemi, yangın söndürme sistemi, nem alma sistemi, ağırlık takip sistemi, aktif kütle dengeleme sistemi ve yıldırımdan korunma sistemidir[3].



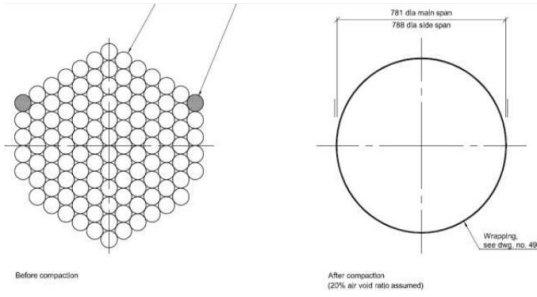
Şekil 1. Köprü Genel Yerleşim Planı [3, 14] (Suspension Bridge General Arrangement Plan)



Şekil 2. Köprü Kuleleri Yandan Görünüşü[14] (Suspension Bridge Tower Side View)



Şekil 3. Köprü Güverte Kesit Planı[14] (Suspension Bridge Deck Profile Plan)



Şekil 4. Köprü Taşıyıcı Halat Kesiti[14] (Suspension Bridge Main Cable Section)

4. OSMANGAZİ KÖPRÜSÜ YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMİ (LIGHTNING PROTECTION SYSTEM of OSMANGAZİ SUSPENSION BRIDGE)

Osmangazi köprüsü bilgilerine göre yapının gereken yıldırımdan korunma sistemi bir bütün olarak incelenmiştir. Yapının iniş iletkenin belirlenmesi önemli olmasına rağmen diğer önemli yakalama ucu ve topraklama sistemi ile ilgili hesaplara uygun olarak öneriler belirtilmiştir.

Ancak makalenin en önemli noktasında yapının kendisinin iniş iletkeni olarak kullanılması birinci yöntem olarak ve harici iniş iletkenin kullanıldığı sistem ise ikinci yöntem olarak uygulanmıştır. İlk olarak bölgedeki YKS sınıfı belirlenip bu YKS sınıfına göre gerekli sistem önerileri yapılmış ve sonrasında iki yöntem için karakteristik empedanslar değerleri hesaplanmıştır.

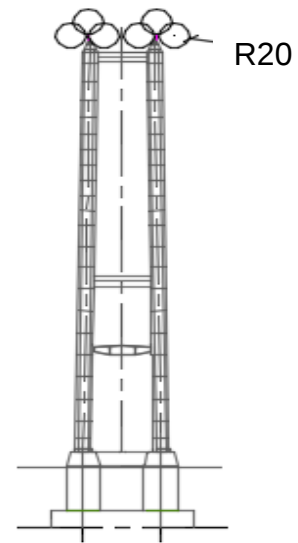
4.1. YKS SINIFININ BELİRLENMESİ VE OSMANGAZİ KÖPRÜSÜ YAKALAMA UCU TASARIMI (DESIGN of LPS CLASS and AIR-TERMINATION SYSTEM of OSMANGAZİ SUSPENSION BRIDGE)

İzmit bölgesi yılda 20-39 gün ortalama [15] yıldırım düşmesi ile yüksek risk bölgesindedir ve bundan dolayı YKS ile donatılması gereken bir yapıdır. İki farklı iniş iletkeni uygulamasında yakalama ucunun LPS'ye göre uygulanması kritiktir.

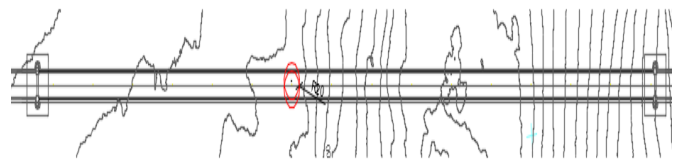
Yıldırım akım şiddetleri 100kA mertebesinde olduğu için Osmangazi projesi IEC 62305-3'e göre YKS(LPS) sınıf 1 olarak tasarlanmıştır. Aşağıdaki Çizelge 1'de belirtilen IEC62305-3 standardı LPS seviyesine göre yuvarlanan küre modeli köprüye uygulanmış ve köprünün yakalama uçları sayesinde üst kısmında bulunan antenlerin koruma altında olduğu ve köprü yanlarında bulunan askı halatları sayesinde araç geçişleri sırasında araçlar Faraday kafesi olan köprü bloğunun iç kısmında kaldığı için etkilenmemektedir. Tüm elektronik sistemler bu koruma alanı içine yerleştirilerek yıldırımdan korunma sağlanmıştır.

Çizelge 1. IEC62305-3 YKS sınıfına göre yuvarlanan küre çapı, örgü boyutu için maksimum değerler[11] (Maximum values for rolling sphere radius and mesh size according to IEC 62305-3 LPS class)

YKS sınıfı	Koruma Yöntemi	
	Yuvarlanan küre yarıçapı r (m)	Örgü Boyutu w _m (m)
I	20	5x5
II	30	10x10
III	45	15x15
IV	60	20x20



Şekil 5. Köprü Önden Görünümüne Göre Yuvarlanan Küre Yerleşimi [14] (Rolling Sphere arrangement according to Suspension Bridge Front View)



Şekil 6. Köprü Üstten Görünümüne Göre Yuvarlanan Küre Yerleşimi[14] (Rolling Sphere arrangement according to Suspension Bridge Top View)

Bir çelik köprüde yakalama ucu standartlara göre gerekli koşulları sağladığında köprünün metal yapısından oluşabilir.

Köprü yapısı, hava sonlandırmanın doğal parçaları olarak kullanılacak aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- Çelik kuleler
- Ana kablolardaki geçit boyunca tel çekme
- Ana kabloların çelik çekirdekleri

- Askıların çelik çekirdekleri
- Çelik güverte ve güverte boyunca bariyerler
- Aydınlatma direkleri
- Trafik işareti direkleri

Osmangazi Köprüsünde yukarıdaki metal bileşenlerin kalınlığı 4 mm'den fazladır ve EN 62305-3'teki Çizelge 3'teki minimum gerekliliklere uygundur ve gerekli koşulları sağlamaktadır [11].

Kulelerin çelik yapısı ve köprü güvertesi birbirine bazı noktalarda kaynaklanır, bazı noktalarda ise cıvata ile bağlanır. Bu şekilde yapının elektriksel sürekliliği sağlanmış olur.

Aydınlatma direkleri, metal bariyerler gibi diğer parçalar, köprü güverte yapısına kaynaklanmış taban plakalarına vidalanmış paslanmaz çelik cıvatalar vasıtasıyla YKS'nin diğer parçalarıyla elektriksel olarak birbirine bağlanır.

Bazı çelik yapıların yalıtımına ihtiyaç duyulması durumunda, bir bağ iletkeni tarafından bir elektriksel iletkenlik sağlanmaktadır.

Bağ iletkenlerinin boyutu, EN 62305 'de belirtilen minimum gerekliliklere uygundur [11].

4.2. YKS OSMANGAZİ KÖPRÜSÜ AŞAĞI İNİŞ İLETKENİ (LPS SUSPENSION BRIDGE DOWN CONDUCTOR)

Köprü kulelerin çelik yapıyı kuleler için aşağı iniş iletkeni olarak kullanılacaktır

Köprü ana kabloları kuleye elektriksel olarak bağlanır. Kablo askıları, ana kablolar için aşağı iletkenler olarak kullanılacaktır. Kablolar boyunca uzanan çelik teller, askılara elektriksel olarak bağlanır. Kulelerdeki ana kabloların uçları, kulelerin çelik yapısı ile elektriksel olarak bağlanmıştır.

Ankraj bloklarındaki kablo uçları, bağ iletkeni yoluyla çelik kablo tutucularla elektriksel olarak birbirine bağlanacaktır. Bu bağ iletkenleri, Çizelge 1 EN 62305-4'te belirtilen minimum 50 mm²'den büyük olan 95mm² kesitli paslanmaz çelik teller vasıtasıyla yapılacaktır [16]. 95mm² kesiti, YKS ana bileşenleri için 100 yıllık ömrü karşılamak üzere seçilmesinin yeterli olacağı öngörülmüştür.

4.3. AŞAĞI İNİŞ İLETKENİ EMPEDANSININ HESAPLANMASI (CALCULATION of DOWN CONDUCTOR IMPEDANCE)

Literatürde birçok farklı çalışmada yapıların karakteristik empedansının hesaplanması araştırılmıştır. Bu noktada bir kulenin karakteristik empedansının hesaplanması için konik yaklaşım ve silindirik yaklaşım olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır [17, 18]. Bu iki yaklaşım 2 farklı yıldırımdan korunma sistemi için hesaplanmıştır.

Konik Yaklaşım: Bu yaklaşıma göre 3 farklı formül kullanılarak karakteristik empedans hesabı yapılmaktadır [17].

A kulenin temel alanı ve h kule yüksekliği olmak üzere r kule temel yarıçapı $r = \sqrt{A/\pi}$ formülü ile hesaplanır. Buna göre karakteristik empedans bağıntılarından biri

$$Z = 30 \ln \left[2 \left(1 + \frac{h^2}{r^2} \right) \right] \text{ ohm} \quad (1)$$

şeklinde [14, 21]. Ayrıca bir diğer yaklaşımda karakteristlik empedans,

$$Z = 60 \ln \frac{\sqrt{2}}{\sin \alpha} \quad (2)$$

olarak verilir [21, 22]. Burada α 'nın yanı tepe açısı olduğu düşünüldüğünde $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \frac{r}{h}$ olarak düşünülebilir.

$$Z = 60 \ln \left(h \frac{\sqrt{2}}{r} \right) \text{ ohm} \quad (3)$$

olarak hesap edilir.

Silindirik yaklaşım: Bu yaklaşıma göre 6 farklı farklı formül kullanılarak karakteristik empedans hesabı yapılabilmektedir [1]. Bu denklemlerde r kule temel yarıçapı ve h kule yüksekliğidir.

$$Z = 60 \frac{\ln h}{r} + 90 \frac{r}{h} - 60 \text{ ohm} \quad (4)$$

olarak hesaplanır [14, 21]'dir. Bir diğer denklemde benzer şekilde karakteristik empedans,

$$Z = 60 \frac{\ln 2h}{r} \text{ ohm} \quad (5)$$

şeklinde [22]. Bu denklemde $r = (r_{\text{taban}} + r_{\text{tepe}})/2$ olarak hesap edilmektedir. Ayrıca akım dağılımının dikdörtgen bir yapıda olması halinde

$$Z = 60 \ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) \text{ ohm} \quad (6)$$

hesaplamanın göre hesaplamalar yapılmaktadır. Bunun yanı sıra rampa şeklindeki akım dağılımı için ise,

$$Z = 60 \left[\ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 1 + \frac{r}{4h} + \left(\frac{r}{4h} \right)^2 \right] \text{ ohm} \quad (7)$$

denklemini kullanılır. Ayrıca $h \gg r$ için,

$$Z = 60 \left[\ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 60 \right] \text{ ohm} \quad (8)$$

olarak hesaplanabilir. Bir diğer silindir yaklaşımı da

$$Z = 60 \left[\ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 2 \right] \text{ ohm} \quad (9)$$

denklemini ortaya koymuştur [16].

Konik ve Silindirik yaklaşım için uygulanan farklı denklemler referans alındığında Çizelge 2 ve Çizelge 3’de iki farklı yıldırımdan korunma sistemi için karakteristik empedans değerleri elde edilmiştir. Köprü yapısının kendisi iniş iletkeni olarak kullanıldığı durum hesaplanırken sadece köprü ayakları hesaplara katılmıştır. Köprü’nün birbirine ilişkilendirildiği çelik halatlar, köprü tabliyeleri hesaba katılmamıştır.

Çizelge 2. Köprü’nün karakteristik empedans değerleri
(Characteristic impedance values of the suspension bridge)

Referans denklem	Empedans Z (ohm)
Denklem 1	264,46
Denklem 2	264,45
Denklem 3	264,45
Denklem 4	178,29
Denklem 5	277,87
Denklem 6	300,69
Denklem 7	240,98
Denklem 8	238,66
Denklem 9	297,83

Çizelge 2’den de görüldüğü gibi köprü’nün bir ayağının karakteristik empedansının farklı konik ve silindirik yaklaşımlara göre 178,29 ile 300,69 ohm arasında değiştiği hesaplanmıştır.

İkinci yıldırımdan korunma sistemi uygulamasında 95mm² harici izoleli bakır veya 50mm x 6mm izoleli bakır bara iletkeni kullanıldığında ise hesaplamalar aşağıdaki gibi olmaktadır.

Çizelge 3. Harici iniş iletkeni karakteristik empedans
(External down conductor characteristic impedance)

Referans denklem	95 mm ² iniş iletkeni (ohm)	50 x 6 mm iniş iletkeni (ohm)
Denklem 4	535,45	552,71
Denklem 8	597,83	615,09

Buna göre 245m uzunluğundaki 95mm² harici izoleli bakır iniş iletkeni ve 50mm*6mm harici izoleli bakır iniş iletkeni için karakteristik empedans sırasıyla 535,45 – 597,83 ohm ve 552,71 – 615,09 ohm olmaktadır.

Yapının karakteristik empedansı ve harici iniş iletkeni hesapları karşılaştırıldığında yapının silindirik ve koni yaklaşımına göre hesabı harici izoleli bakır iletkeninden her zaman daha düşük olmaktadır ve yıldırım akımının her zaman tercih edeceği yol olacaktır.

Diğer taraftan köprüde kullanılan malzemeye göre de karşılaştırma yapılmalıdır. Bu noktada malzeme direnci

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ ohm} \quad (10)$$

eşitliğine göre hesaplanır [11].

Burada ρ malzemenin öz direnci ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), l uzunluğu (m) ve S kesiti (mm^2) ifade etmektedir. Ayrıca çelik için kesit 1.367 mm² iken bakır için 4 x 95 mm² olarak alınmaktadır. Çelik kule direnci yaklaşık 0,000193 Ω iken, 4x95 mm² izole bakır iniş iletken direnci yaklaşık 0,0022 Ω olmaktadır.

Bakır, kullanılan çeliğe göre 10 ila 30 kat arasında daha fazla iletken olmasına rağmen diğer bir önemli parametre malzeme kesit alanı dikkate alındığında çelik kulenin direnci izole bakır iletken direncine göre kesitten dolayı görmezden gelinebilecek seviyede olduğudur.

4.4. OSMANGAZİ TOPRAKLAMA KÖPRÜSÜ SİSTEMİ (OSMANGAZİ SUSPENSION BRIDGE EARTH-TERMINATION SYSTEM)

Kule temel yapılarında, ankraj bloklarında ve iskelelerde topraklama iletkenleri, EN 62305-3, bölüm 5.3.5’te önerildiği gibi yapının elektriksel olarak sürekliliği betonarme yapıdaki galvaniz şeritler ile sağlanıp, toprak ile bağlantısı yapılır. Aynı zamanda sudaki ayaklar sayesinde iyi bir iletken olan su üzerinden boşalım sağlanmaktadır.

4.5. OSMANGAZİ KÖPRÜSÜ TOPRAKLAMA HESABI (OSMANGAZİ SUSPENSION BRIDGE EARTHING CALCULATION)

Toprak sonlandırmalar, temel yapısının alt kısmının betonuna gömülü iletken metal parçalardır. Doğrudan toprağa gömülü beton, doğal nem içeriğine sahiptir ve iletkenliği, dünyanınkine benzer iletkenliğe sahip iletken madde olarak kabul edilebilir. Bu tip elektrotun geniş alanı nedeniyle, düşük direnç elde edilebilir. Ayrıca beton, gömülü donatı parçalarını korozyona karşı korur. Dikkat edilmesi gereken nokta temel toprak elektrotları günümüzde dış topraklama elektrotlarına kıyasla çok pratik bir çözüm olarak önerildiğidir.

Topraklama sistemi iki iniş iletkeni için de aynı şekilde uygulanmaktadır. Yapılan hesaplama ile topraklama sisteminin uygunluğu incelenmiştir.

Köprü parçaları için temel topraklama direnci (11) numaralı denklem kullanarak hesaplanmıştır.

$$RA = \frac{\rho E}{\pi d} \quad (11)[19]$$

Burada $d = 1,57\sqrt[3]{V}$ [19]olarak alınmıştır. Buna göre RA topraklama direnci (Ω), ρE toprak özgül direnci [Ωm], d efektif temel yarıçapı (m), V m³ cinsinden temel hacmidir. Özgül direnç su içinde bulunan ayaklarda 2 [Ωm], denizin hemen yanında karada bulunan farklı toprak yapısından dolayı ankraj ayaklarında 40 [Ωm] ve 400 [Ωm], viyadük bağlantı ayaklarında ise 10 [Ωm] olarak alınmıştır.

Çizelge 4. Köprü yapısının topraklama hesapları (Grounding calculations of suspension bridge structure)

	Ra (Ω)	ρ (Ωm)	D (m)	V ^{1/3} (m3)
Kuzey Kule Ayağı Toprak Direnci	0,01	2	43,34	27,61
Güney Kule Ayağı Toprak Direnci	0,01	2	43,34	27,61
Kuzey Ankraj Ayağı Toprak Direnci	0,24	40	51,91	33,07
Güney Ankraj Ayağı Toprak Direnci	1,70	400	74,68	47,57
Köprü Kuzey Yan Bağlantı Ayağı Toprak Direnci	0,11	10	28,21	17,97
Köprü Güney Yan Bağlantı Ayağı Toprak Direnci	5,68	400	22,38	14,26
Köprü Güney Viyadük Ayağı Toprak Direnci	0,55	40	22,74	14,49
Köprü Kuzey Viyadük Ayağı Toprak Direnci	0,59	40	21,30	13,57

Topraklama direnci köprünün 8 ana temel taşıyıcı parçası için yapılmış ve en önemli iki parçası için sırasıyla Kuzey Kule 0,0734 Ω ve Güney Kule 0,0734 Ω olarak hesap edilmiştir. Bu değerler IEC 62305[8] standardında kabul edilen 5 Ω değerinin altındadır.

Güney yan açıklık ayağı güney ankraj bloğu ile aynı toprak hattına bağlanmıştır. Bundan dolayı bu alandaki toprak değerleri hesaplanan değerlerden daha düşük olabilir.

İki farklı iniş iletken yöntemi için topraklama sistemi hesaplara göre uygulanabilir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Asma köprüler de yıldırımdan korunma sistemi bir bütün olarak incelenmiştir. Yıldırım akımının iniş için yakalama ucu, en uygun akım yolu ve topraklama sistemi için gerekli hesaplar yapılmıştır.

İniş iletkeni iki farklı yöntemle göre yapılmış ve sürekli bir elektriksel iletkenliğe sahip çelik köprü kulelerine ait darbe empedansının birinci yöntemle göre Çizelge 2,deki hesaplara göre 4 ayak için hesaplandığında ortalama 60Ω olduğu hesaplanmıştır. İkinci yöntemle göre 6x50 mm²'lik izole bakır bara iletken kullanıldığında darbe empedansının da Çizelge 3'deki değerlere göre 4 ayaktaki iniş iletkeni için ortalama 150 Ω olduğu

hesaplanmıştır. İki yöntemle göre birinci yöntemde köprü kulelerinin empedansının ikinci yöntemdeki iniş iletkeninin empedansından daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı karakteristik değerlere sahip yıldırım akımı için iniş iletkeni üzerinde köprü kule ayaklarının gövdesindekinden daha büyük bir gerilim indükleneceği görülmektedir. Ayrıca yıldırım akımı da indirme iletkenine göre daha küçük empedansa sahip olan direk gövdesinin tercih edecektir. Sonuç olarak bu tür asma köprülerde birinci yöntemle yapının kendisinin indirme iletkeni olarak doğrudan direk metal gövdesinin akım yolu olarak kullanılabileceği rahatlıkla söylenebilir.

Topraklama kısmında ise tuzlu su ile olan bağlantısından dolayı topraklama direnç değerleri standartlarda belirtilen değerin çok altında yer almaktadır. Ancak tuzlu suyun korozyon etkisi göz önüne alınıp bağlantı noktaları korozyona karşı korunmalı ve yıllık direnç testleri yapılmalıdır.

Sonuç olarak bu çalışmada asma köprülerde yıldırım akımı sonucunda yıldırım indirme iletkeninde gövdede oluşandan daha büyük bir gerilim oluşacağını, yıldırım akımının harici iniş iletkenine göre daha küçük empedansa sahip olan köprü gövdesinin tercih edeceği ve hatta bu tür yapılarda harici iniş iletkeni kullanılmayıp doğrudan köprü metal gövdesinin akım yolu olarak kullanılabileceği Osmangazi köprüsüne ait değerler kullanılarak gösterilmiştir. Bu çalışma neticesinde bu tarz yapılarda köprü çelik gövdesinin yıldırımdan korunma için aşağı iniş iletkeni olarak kullanılmasının daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Özgür Turay Kaymakçı: Literatürü araştırmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

Cüneyt KOÇ: Hesaplamaları yapmış ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karşoğlu M., Yılmaz M.O., Şahin A. "İzmit Körfez Geçişi Asma Köprüsü'nün Dinamik Analizi", **6. Çelik Yapılar Sempozyumu**
- [2] www.en.wikipedia.org, "List of longest suspension bridge spans"
- [3] Zeybek F. "E-mosty Suspension Bridges" Issue 02/July (2017).

- [4] Küçükmehtetoğlu M. "Köprülerle Ekonomik Büyüme ve Gelişme: Mekânsal, Kurumsal, Sosyokültürel Bütünleşme ve Eşiklerin Aşılması", *Bölgesel Araştırmalar Dergisi* 2:271-332
- [5] Kolukırık, S. "Koridor Kentten Kuşak Kente Yalova Körfez Geçiş Projesinin Sosyal Etkileri Üzerine Bir Araştırma", *Sosyoloji Dergisi* , (10zel) , 119-156, (2016).
- [6] Theodore P. Z., Steinhouse J., "Some Considerations In The Design Of Long Span Bridges Against Progressive Collapse" (2007).
- [7] Zhongjiang Y., Tianqi Y. , Chunxia N. "Hazard Analysis and Protection Measures of Direct Lightning on Lishui Bridge", (2011).
- [8] Shiranishi Y., Otsuka T., Matsuura H. 'The observation of direct lightning stroke current to the wind turbine system'. *28th ICLP*, Avignon, France, (2004).
- [9] Starossek U., "Progressive Collapse of Bridges—Aspects of Analysis and Design" *International Symposium on Sea-Crossing Long-Span Bridges*, Mokpo, Korea, Feb. 15-17, (2006)
- [10] Rousseau A., Boutillon L., Huynh A., "Lightning protection of a cable-stayed bridge", (2006).
- [11] IEC 62305-3 Protection against lightning- Part 3: Physical damage to structures and life hazard,
- [12] NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems
- [13] BS 7430 Code of practice for earthing
- [14] Güngör N., Zeybek F. "Gebze–Orhangazi–Izmit Motorway, Izmit Bay Suspension Bridge" *Proceedings Of The International Conference On Multi-Span Large Bridges* Porto, Portugal, 435-443, (2015).
- [15] www.lightningsafety.com, "NLSI Site Map - National Lightning Safety Institute
- [16] IEC 62305-4 Protection against lightning–Part 4: Electrical and electronic systems within structures
- [17] Kalenderli, Ö. "GSM Anten Direği Karakteristik Empedansının Hesabı" (2002).
- [18] Diesendorf W., "Insulation Co-ordination in High Voltage Electric Power Systems, Butterworth", page 56, (1974).
- [19] Paul R. P. Hoole, R. P. Hoole & Samuel R. H. Hoole "Practice of Lightning Protection: Risk Assessment, External Protection, Internal Protection, Surge Protection, Air Termination, Down Conductor, Earthing, and Shielding", page 146 (2002).