



Raylı Sistem Bakım Atölyeleri için Hareketli Katener Sisteminin Tasarımına Dayalı Bir Operasyonel Çözümün Geliştirilmesi

Furkan KARAKUŞ

Metro İstanbul A.Ş., Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye

furkankarakus@yahoo.com.tr

(Alınış/Received: 30.06.2026, Kabul/Accepted: 03.09.2026, Yayımlama/Published: 03.09.2026)

Öz: Raylı ulaşım araç bakım atölyelerinde kullanılan sabit katener sistemleri, bakım süreçleri sırasında araçların enerjisiz hatlara taşınmasını gerektirmekte olup bu durum operasyonel verimsizlik, artan iş gücü ihtiyacı ve önemli güvenlik riskleri oluşturmaktadır; bu çalışmada söz konusu kısıtları ortadan kaldırmak amacıyla yatay eksenle hareket edebilen ve modüler yapıya sahip bir Hareketli Katener Sistemi tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Önerilen sistem, iki parçalı motor tahrikli konsol mekanizması, cam elyaf takviyeli polimer tabanlı yüksek yalıtım özellikli yapı elemanları ve çok katmanlı koruma ve kilitleme destekli kontrol altyapısı ile gerçekleştirilmiş olup, sistem tasarımında katener profiline etki eden yükler için statik analizler yapılmış, çelik tel gerilme kuvvetleri ve konsol momentleri hesaplanarak mekanik dayanım doğrulanmış ve sistemin dinamik davranışı dikkate alınarak motor torku ile güç gereksinimleri analitik olarak belirlenmiştir. Geliştirilen sistem, Metro İstanbul A.Ş. bünyesinde Dudullu Bakım Atölyesi'nde saha koşullarında uygulanmış ve performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin araç transferi gereksinimini ortadan kaldırarak bakım sürelerini kısalttığını, iş gücü ihtiyacını azalttığını ve kontrollü hareket kabiliyeti sayesinde bakım sırasında oluşabilecek elektriksel ve mekanik riskleri önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca modüler yapısı, farklı bakım senaryolarına uyarlanmasını ve mevcut altyapıya kolay entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Bu özellikleriyle geliştirilen sistem, raylı sistem araç bakım atölyelerinde güvenlik, maliyet ve bakım etkinliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Raylı ulaşım sistemi, Hareketli katener sistemi, Bakım ve onarım, Operasyonel yöntem

Development of an Operational Solution Based on the Design of a Movable Catenary System for Railway Maintenance Facilities

Abstract: Fixed rigid catenary systems used in railway vehicle maintenance depots require vehicles to be transferred to deenergized tracks during maintenance operations, resulting in operational inefficiency, increased labor requirements, and potential safety risks. To address these limitations, this study presents the design, analysis, implementation, and validation of a Movable Rigid Catenary System with a modular structure and horizontal movement capability. The proposed system consists of a two stage motor driven cantilever mechanism, glass fiber reinforced polymer components, and a control architecture with integrated protection and safety locking functions. Static analyses were conducted to determine the loads acting on the rigid catenary profile, while the tensile forces in the steel cables and the bending moments of the cantilever structure were calculated to verify its mechanical integrity. Furthermore, the required motor torque and power were analytically determined by considering the dynamic characteristics of the mechanism. The developed Movable Rigid Catenary System was successfully implemented and tested under actual operating conditions at the Dudullu Railway Vehicle Maintenance Depot of Metro İstanbul Inc. The results demonstrate that the proposed system eliminates the need for vehicle transfer during maintenance operations, reducing maintenance time, labor requirements, and electrical and mechanical hazards. Furthermore, its modular design enables easy integration into existing railway maintenance facilities and adaptation to different maintenance scenarios, providing a practical and cost effective solution for railway maintenance operations.

Keywords: Movable catenary system, Maintenance and repair, Operational methods, Safety locking system

Atıf için/Cite as: F. Karakuş, "Raylı sistem bakım atölyeleri için hareketli katener sisteminin tasarımına dayalı bir operasyonel çözümün geliştirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 25, no. 1981539, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1981539

1. Giriş

Raylı ulaşım sistemleri, yüksek yolcu taşıma kapasitesi, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik avantajları nedeniyle günümüz şehir içi ve şehirlerarası ulaşım ağlarının temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Özellikle metro, hafif metro, tramvay vb. araçlar büyük şehirlerde artan ulaşım talebinin karşılanmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Nüfus artışı, kentleşme oranındaki yükseliş ve toplu taşıma kullanımındaki sürekli artış, raylı sistem işletmecilerinin daha yüksek sefer sıklıklarıyla hizmet vermesini zorunlu hale getirmektedir. Bu nedenle raylı sistem araçlarının güvenilir, emniyetli ve kesintisiz şekilde işletilmesi, toplu taşıma hizmet kalitesinin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Raylı ulaşım sistemlerinde meydana gelen araç arızaları, planlanmamış bakım faaliyetleri veya uzun süren revizyon süreçleri yalnızca ilgili aracın işletme dışı kalmasına neden olmamakta, aynı zamanda hat kapasitesinin azalmasına, sefer planlarının aksamasına ve yolcu memnuniyetinin düşmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle araçların çeşitli süreçlerinin mümkün olan en kısa sürede tamamlanarak yeniden işletmeye kazandırılması, modern raylı sistem işletmeciliğinin temel gereksinimlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Elektrikli raylı ulaşım araçlarında enerji iletimi pantograf ve katener sistemi aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sistemde elektrik enerjisi, havai katener hattından pantograf aracılığıyla alınarak çekiş sistemlerine iletilmektedir. Pantograf üzerindeki karbon şeritler, katener ile sürekli temas sağlayarak kesintisiz enerji iletimini gerçekleştirmektedir [1]. Alınan elektrik enerjisi, güç dönüştürücü sistemler aracılığıyla çekiş motorlarına aktarılmakta ve aracın hareketi sağlanmaktadır. Pantograf ile katener arasındaki sürekli ve kararlı temas, elektrikli raylı ulaşım sistemlerinin güvenli ve kesintisiz işletilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir [2]. Bu nedenle katener sistemi, yalnızca işletme sırasında değil bakım faaliyetleri boyunca da güvenliğin sağlanması açısından kritik altyapı bileşenlerinden biridir. Pantograf-katener sisteminin güvenilir şekilde çalışabilmesi, kontak teli ve rijit katener bileşenlerinin mekanik bütünlüğünün korunmasına bağlıdır. Bu nedenle katener sistemlerinin izlenmesi, periyodik bakımı ve dinamik davranışlarının değerlendirilmesi, işletme güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir [3], [4]. Rijit katener sistemlerinde pantograf ile katener arasındaki dinamik etkileşim, akım toplama performansını ve temas kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sistemin dinamik davranışının doğru şekilde analiz edilmesi, güvenilir enerji iletimi açısından büyük önem taşımaktadır [5]. Özellikle araç tavanında bulunan pantograf, klima ünitesi, yardımcı güç sistemi, yüksek gerilim ekipmanları ve çeşitli elektromekanik bileşenlerin bakım faaliyetleri sırasında güvenli çalışma alanlarının oluşturulması gerekmektedir. Ancak mevcut bakım atölyelerinde yaygın olarak kullanılan rijit katener sistemleri sabit yapıda olduğundan, araçların kaldırılması veya üst ekipmanlarına erişim sağlanması sırasında önemli operasyonel kısıtlar ortaya çıkabilmektedir.

Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan katener sistemleri genel olarak konvansiyonel katener sistemleri ve rijit katener sistemleri olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Konvansiyonel katener sistemleri esnek taşıyıcı teller ve askı elemanları kullanırken, rijit katener sistemleri alüminyum iletken profiller ve rijit taşıyıcı yapılar kullanmaktadır. Rijit katener sistemlerinde işletme güvenilirliğinin artırılması amacıyla kestirimci bakım yaklaşımları giderek daha fazla önem kazanmakta olup, yapay zekâ tabanlı yöntemler arızaların erken tespitine ve bakım faaliyetlerinin etkin şekilde planlanmasına katkı sağlamaktadır [6]. Rijit katener sistemleri yüksek mekanik dayanım, düşük bakım ihtiyacı ve kompakt yapı avantajları sunmasına rağmen, sabit yapıları nedeniyle bakım atölyelerinde bazı operasyonel zorluklara neden olabilmektedir. Sabit rijit katener kullanılan bakım atölyelerinde araçların üst ekipmanlarına erişim sağlanabilmesi için araçların enerjisiz bölgelere taşınması, ilave manevra işlemlerinin gerçekleştirilmesi veya katener hattının tamamen sökülmesi gibi yöntemlere başvurulmaktadır. Bu uygulamalar bakım sürelerinin uzamasına, ilave iş gücü gereksinimine, operasyonel maliyetlerin artmasına ve iş güvenliği risklerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle

bakım atölyelerinde güvenli çalışma alanı oluşturan, bakım erişilebilirliğini artıran ve gelişmiş koruma ile kilitleme fonksiyonlarını destekleyen yenilikçi katener çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1. Literatür çalışması

Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinde pantograf ile katener etkileşimini enerji iletim sürekliliği, işletme güvenilirliği ve bakım maliyetleri açısından kritik öneme sahip olduğundan son yıllarda bu alanda gerçekleştirilen çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. Özellikle yüksek hızlı demiryolları ve metro sistemlerinde temas kuvvetinin sürekliliği, akım toplama kalitesi, aşınma davranışı ve sistem güvenilirliğinin artırılmasına yönelik deneysel, analitik ve sayısal araştırmalar ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte çalışmaların büyük çoğunluğu işletme sırasında pantograf ve katener etkileşimini iyileştirmeye odaklanırken, bakım atölyelerinde kullanılan rijit katener sistemlerinin mekanik tasarımı ve otomasyon altyapısına ilişkin çalışmalar oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

Katener sistemlerinin genel yapısı, çalışma prensipleri ve gelecekte karşılaşılabilecek teknik zorluklar üzerine gerçekleştirilen kapsamlı derleme çalışmalarında, temas kuvveti sürekliliği, ark oluşumu, karbon şerit ve temas teli aşınması, titreşim davranışları ile çevrimiçi durum izleme yöntemlerinin sistem performansını belirleyen temel parametreler olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca mevcut araştırmaların büyük bölümünün yüksek hızlı demiryollarına odaklandığı, metro işletmelerinde yaygın olarak kullanılan rijit katener sistemlerine yönelik çalışmaların ise daha sınırlı kaldığı vurgulanmıştır [7], [8]. Rijit katener sistemlerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarının belirlenmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, aşınmanın yalnızca mekanik sürtünmeden değil, aynı zamanda elektriksel ark oluşumu ve temas kararsızlığından da önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Ren ve Chen [9], rijit katener temas telleri üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada temas kuvveti, kayma hızı ve elektrik akımının aşınma davranışı üzerindeki etkilerini inceleyerek elektriksel aşınmanın önemli bir aşınma mekanizması olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde ark boşalmasının karbon şerit sıcaklığı ve aşınma davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmada, ark boşalmasının sıcaklık artışına ve aşınma davranışına neden olduğu belirlenmiştir. [10]. Bunun yanında farklı karbon şerit malzemeleri ile rijit temas tellerinin tribolojik performanslarını karşılaştıran deneysel araştırmalarda, temas kuvveti, akım şiddeti ve kayma hızının uygun şekilde optimize edilmesiyle hem temas teli hem de karbon şerit aşınmasının önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmiştir [11]. Aşınma mekanizmalarının belirlenmesine yönelik çalışmaların yanı sıra, son yıllarda aşınmanın öngörülmesine yönelik fizik tabanlı modeller de geliştirilmiştir. Wei ve ark. [12], temas kuvveti, araç hızı, elektrik akımı, ark oluşum oranı ve ortam sıcaklığını dikkate alan yeni bir aşınma modeli geliştirerek metro işletmelerinde temas teli ve karbon şerit aşınmasının uzaysal dağılımını tahmin edebilen bir model geliştirmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen çalışmalarda ise karbon şerit profil değişimi ve temas geometrisini dikkate alan yeni tahmin modelleri geliştirilmiştir. [13]. Benzer şekilde metro rijit katener sistemlerinde düzensiz karbon şerit aşınmasını inceleyen araştırmalarda, temas kuvvetinin aşınmayı belirleyen en önemli parametre olduğu, katener yerleşim geometrisinin ise karbon şerit üzerindeki aşınma dağılımını doğrudan etkilediği ortaya konmuştur [14]. Bu çalışmalar kestirimci bakım uygulamaları açısından önemli ilerlemeler sağlamasına rağmen, bakım atölyelerinde kullanılan rijit katener sistemlerinin mekanik tasarımına ve bakım operasyonlarının iyileştirilmesine yönelik değerlendirmeler içermemektedir. Katener sistemlerinin dinamik performansına yönelik çalışmalar ise temas kuvvetinin sürekliliğini sağlayan yapısal parametrelerin belirlenmesine odaklanmıştır. Destek rijitliğinin akım toplama performansına etkisini inceleyen deneysel ve sayısal araştırmalarda, uygun destek rijitliği değerlerinde temas kuvveti dalgalanmalarının önemli ölçüde azaltılabildiği ve sistem rezonansının önlenildiği gösterilmiştir [15]. Benzer şekilde askı elemanlarında meydana gelen hasarların katener etkileşimine etkisini inceleyen çalışmalarda, küçük geometrik bozulmaların dahi temas kuvvetini ve akım toplama kalitesini olumsuz etkilediği belirlenmiştir [16]. Bu

sonuçlar, rijit katener sistemlerinde mekanik bileşenlerin geometrik doğruluğu ve yapısal bütünlüğünün işletme güvenilirliği açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Son yıllarda bakım faaliyetlerinin iyileştirilmesine yönelik olarak durum izleme ve arıza teşhisi yöntemleri de önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Pantograf üzerine yerleştirilen Fiber Bragg Grating sensörlerinden elde edilen titreşim verilerinin kullanıldığı çalışmada, rijit katener sistemlerinde meydana gelen farklı arıza türlerinin gerçek zamanlı olarak belirlenebildiği ve geliştirilen makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımın gerçek metro hattında doğrulanmıştır [17]. Bu çalışmalar, durum izleme ve arıza teşhisi açısından önemli katkılar sağlamakla birlikte, bakım atölyelerinde kullanılan rijit katener sistemlerinin mekanik tasarımı, emniyet fonksiyonları, otomasyon altyapısı ve saha uygulamalarına ilişkin kapsamlı değerlendirmeler sunmamaktadır.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, katener sistemlerinde aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, fizik tabanlı aşınma modellerinin geliştirilmesi, temas performansının iyileştirilmesi ve durum izleme yöntemlerinin geliştirilmesi konularında önemli ilerlemeler sağlandığı görülmektedir [7]–[17]. Bununla birlikte mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu işletme sırasında pantograf ve katener etkileşimine odaklanmakta olup, bakım atölyelerinde kullanılan rijit katener sistemlerinin hareketli bir yapıya dönüştürülmesi, mekanik tasarımı, yapısal analizleri, koruma fonksiyonları, PLC tabanlı otomasyon mimarisi ve gerçek işletme koşullarındaki saha uygulamalarını birlikte ele alan çalışmalar literatürde kapsamlı biçimde incelenmemiştir.

1.2. Çalışmanın yenilikçi yönleri ve katkıları

Raylı sistem araç bakım atölyelerinde sabit katener sistemlerinin neden olduğu bakım kısıtlarını ortadan kaldıran modüler bir Hareketli Katener Sistemi (HKS) geliştirilmiştir. Önerilen sistem, geleneksel sabit rijit katener sistemlerinden farklı olarak bakım faaliyetleri sırasında kontrollü şekilde hareket edebilen modüler bir yapıya sahiptir. Sistem mekanik hareket mekanizması, GRP (Glass Reinforced Plastic- Cam Elyaf Takviyeli Polimer) tabanlı konsol yapısı, motor tahrik sistemi, sensör tabanlı izleme altyapısı, PLC tabanlı kontrol sistemi ve emniyet kilitleme mekanizmalarının bütünlüklü çalışması esasına dayanmaktadır.

Geliştirilen HKS sayesinde araçların çatı bölgesinde bulunan pantograf, klima ünitesi, yardımcı güç sistemi, yüksek gerilim ekipmanları ve diğer üst ekipmanlara erişim kolaylaştırılmakta, bakım faaliyetleri için daha güvenli ve ergonomik bir çalışma alanı oluşturulmaktadır. Ayrıca sistem, bakım işlemleri sırasında araçların enerjisiz bölgelere taşınması ihtiyacını azaltarak bakım sürelerinin kısaltılmasına ve operasyonel süreçlerin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Literatürde ve ticari uygulamalarda hareketli katener sistemlerine yönelik çeşitli çözümler bulunmasına rağmen, bu sistemlerin tasarım metodolojisi, mühendislik hesaplamaları, kontrol algoritmaları ve doğrulama süreçlerine ilişkin teknik bilgiler sınırlı düzeyde paylaşılmaktadır. Bu çalışma ise hareketli katener sisteminin tasarım, analiz, kontrol ve saha doğrulama süreçlerini sistematik bir yaklaşımla ele alarak mevcut çalışmalardan ayrışmaktadır.

Bu çalışmanın başlıca katkıları aşağıda özetlenmektedir:

- Raylı sistem araç bakım atölyelerinde kullanılmak üzere iki parçalı hareket kabiliyetine sahip modüler bir hareketli katener sistemi geliştirilmiştir.
- Geleneksel sabit rijit katener sistemlerinin bakım faaliyetleri sırasında oluşturduğu erişim kısıtları ve iş güvenliği risklerine yönelik yenilikçi bir çözüm ortaya konulmuştur.

- Hafif, yüksek dayanımlı ve elektriksel olarak yalıtkan özelliklere sahip GRP tabanlı konsol yapısı kullanılarak hareketli katener sisteminin mekanik performansı ve işletme güvenilirliği artırılmıştır.
- PLC, HMI, sensörler, motorlu ayırıcılar ve mekanik kilitleme elemanlarını kapsayan bütünlük bir kontrol ve koruma mimarisi geliştirilmiş, bakım süreçlerinde güvenli işletim sağlanmıştır.
- Hareketli katener sisteminin mekanik tasarımı, statik analizleri, motor boyutlandırması ve kontrol algoritması aynı mühendislik yaklaşımı kapsamında ele alınmış ve önerilen sistem saha uygulamaları ile doğrulanmıştır.
- Geliştirilen sistem, Metro İstanbul A.Ş. bünyesinde İstanbul M1 hattı araç bakım atölyesinde uygulanmış ve bakım operasyonlarında kullanılabilirliği saha koşullarında doğrulanmıştır. Ayrıca modüler yapısı sayesinde farklı metro, tramvay ve hafif raylı sistem bakım tesislerine uyarlanabilecek ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır.

Makalenin geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde hareketli katener sisteminin mekanik ve elektriksel bileşenleri tanıtılmış, üçüncü bölümde sistem tasarımı ile statik hesaplamalar sunulmuş, dördüncü bölümde hesaplama ve analiz sonuçları ardından beşinci bölümde koruma ve kontrol sisteminin çalışma prensibi açıklanmış, altıncı bölümde ise sistemin saha uygulaması, gerçekleştirilen testler ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Hareketli Katener Sistemi Ana Bileşenleri

Bu çalışmada önerilen HKS, raylı sistem araç bakım atölyelerinde gerçekleştirilen bakım, onarım ve revizyon faaliyetleri sırasında karşılaşılan erişilebilirlik, iş güvenliği ve çeşitli operasyonel problemlerinin giderilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Sistem, geleneksel sabit rijit katener yapılarından farklı olarak bakım faaliyetleri sırasında kontrollü şekilde hareket ettirilebilmekte ve böylece araç üstü ekipmanlarına güvenli erişim sağlanabilmektedir. Önerilen sistem, bakım faaliyetleri sırasında katener hattının çalışma alanından uzaklaştırılmasına olanak tanırken, bakım işlemleri tamamlandıktan sonra tekrar işletme pozisyonuna getirilerek araçların normal işletme koşullarında enerji almasını sağlamaktadır. Bu sayede bakım faaliyetleri için ilave enerji kesme bölgeleri oluşturulmasına veya araçların farklı bakım yollarına taşınmasına olan ihtiyaç azaltılmaktadır.

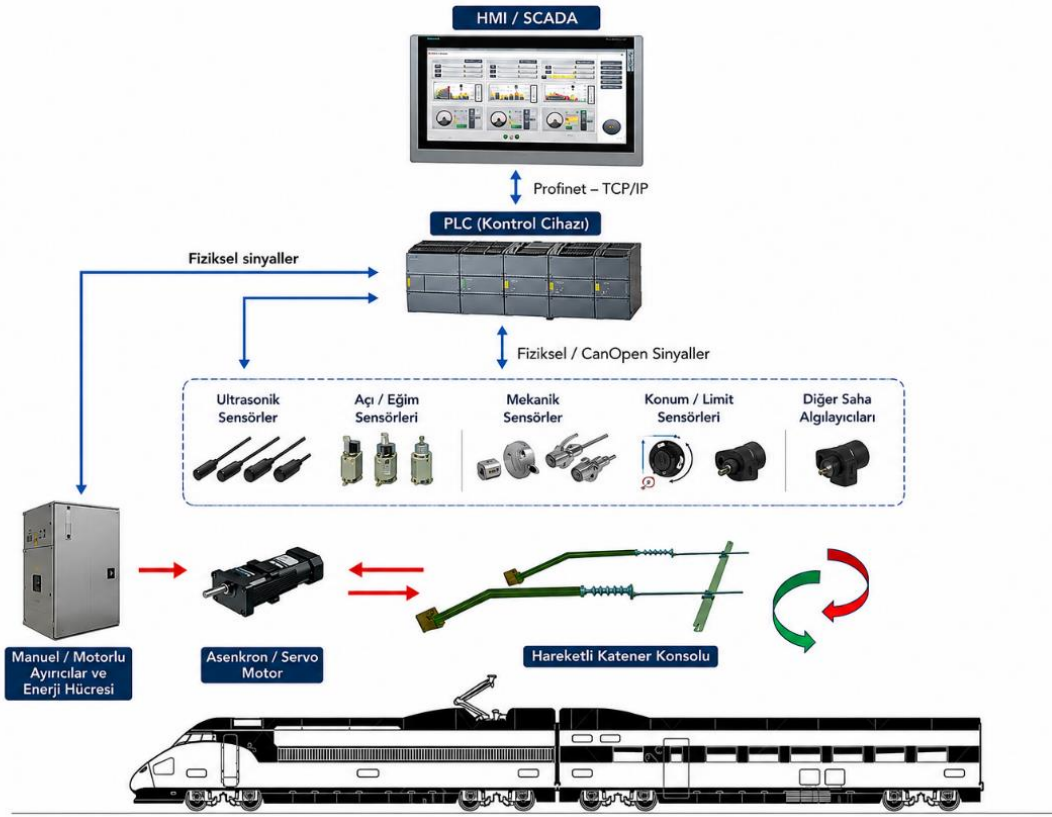
HKS, mekanik, elektriksel ve otomasyon bileşenlerinden oluşan bütünlük bir yapıya sahiptir. Sistemin temel amacı, bakım personelinin araç tavanında bulunan pantograf, klima ünitesi, yardımcı güç sistemi, yüksek gerilim ekipmanları ve diğer üst ekipmanlara güvenli şekilde erişebilmesini sağlamaktır. Aynı zamanda sistem, bakım faaliyetleri sırasında oluşabilecek insan kaynaklı hataların azaltılması ve operasyonel güvenliğin artırılması amacıyla çeşitli mekanik ve elektriksel emniyet katmanları ile desteklenmiştir.

Önerilen sistem üç temel alt yapıdan oluşmaktadır:

- Mekanik hareket sistemi,
- Elektriksel güç ve koruma sistemi,
- Kontrol ve otomasyon sistemi.

Mekanik hareket sistemi, rijit katener hattının kontrollü şekilde hareket ettirilmesini sağlayan konsol yapıları, çelik halatlar, bağlantı elemanları ve redüktörlü motorlardan oluşmaktadır. Elektriksel güç ve koruma sistemi, bakım faaliyetleri sırasında güvenli çalışma ortamının oluşturulabilmesi amacıyla motorlu ayırıcılar, topraklama ekipmanları ve mekanik kilitleme

elemanlarını içermektedir. Kontrol ve otomasyon sistemi ise sensörlerden alınan bilgilerin işlenmesi, sistem durumunun izlenmesi ve hareket komutlarının yönetilmesi amacıyla PLC, HMI ve haberleşme altyapısından oluşmaktadır. Önerilen HKS'nin genel sistem mimarisi Şekil 1'de gösterilmektedir. HKS, raylı sistem araç bakım atölyelerinde gerçekleştirilen bakım, onarım ve revizyon faaliyetleri sırasında katener hattının kontrollü şekilde hareket ettirilmesini sağlayan mekanik, elektriksel ve otomasyon bileşenlerinden oluşmaktadır. Sistem, bakım faaliyetleri sırasında güvenli çalışma alanı oluşturulmasını sağlarken, bakım tamamlandıktan sonra katener hattının tekrar işletme konumuna getirilmesine olanak vermektedir.



Şekil 1. Geliştirilen HKS benzetim modeli

Alüminyum iletken ray ve kontak teli, elektrik enerjisinin raylı sistem araçlarına iletilmesini sağlayan ana enerji aktarım bileşenleridir. Hareketli konsol sistemi, GRP kompozit borular, çelik halatlar ve redüktörlü motorlar ise katener hattının kontrollü şekilde hareket ettirilmesini sağlayan mekanik yapıyı oluşturmaktadır.

Tablo 1. HKS'nin temel bileşenleri ve görevleri

Bileşen	Alt Bileşen / Ekipman	Görevi
Enerji Aktarım Sistemi	Alüminyum İletken Ray	Cer Enerjisinin Katener Hattı Boyunca İletilmesini Sağlar.
Enerji Aktarım Sistemi	Kontak Teli	Pantograf ile Temas Ederek Elektrik Enerjisinin Araca Aktarılmasını Sağlar.
Mekanik Taşıyıcı Sistem	Konsol Yapısı	Katener Hattını Taşır ve Hareketli Yapının Ana Taşıyıcı Elemanını Oluşturur.
Mekanik Taşıyıcı Sistem	Çelik Halat Ve Bağlantı Elemanları	Katener Sisteminin Mekanik Yüklerini Taşır ve Hareket Mekanizmasını Destekler.

Hareket Mekanizması	Redüktörlü Motor	Katener Hattının Açılma ve Kapanma Hareketini Gerçekleştirir.
Elektriksel Koruma Sistemi	Motorlu Ayırıcı	Bakım Öncesinde Enerji Kesilmesini ve Hattın İzole Edilmesini Sağlar.
Emniyet Sistemi	Mekanik Kilitleme Sistemi	Enerji Kesilmeden Sistemin Hareket Etmesini Engeller.
Emniyet Sistemi	Elektriksel INTERLOCK Sistemi	Hatalı Manevraları Önleyerek Güvenli Çalışma Koşullarını Oluşturur.
Algılama Sistemi	Endüktif Sensörler	Katener Sisteminin Konum ve Durum Bilgisini İzler.
Kontrol Sistemi	PLC	Sensör Verilerini İşleyerek Sistemin Kontrolünü Gerçekleştirir.
Operatör Ara yüzü	HMI Ekranı	Operatörün Sistemi İzlemesini ve Kontrol Etmesini Sağlar.
Haberleşme Sistemi	PROFINET-TCP/IP Altyapısı	PLC ve HMI Arasındaki Veri İletişimini Sağlar.

Motorlu ayırıcılar, topraklama ekipmanları ve çok katmanlı koruma ve kilitleme destekli kontrol (interlock) mekanizmaları bakım faaliyetleri sırasında gerekli emniyet koşullarının sağlanmasına hizmet etmektedir. Sensörler, PLC ve HMI bileşenlerinden oluşan kontrol sistemi ise sistemin izlenmesi, kontrol edilmesi ve güvenli şekilde işletilmesini sağlamaktadır. HKS'nin temel bileşenleri ve görevleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Sistemin mekanik, elektriksel ve kontrol bileşenleri birbirleriyle entegre çalışarak bakım faaliyetleri sırasında güvenli ve kontrollü bir çalışma ortamı oluşturmaktadır.

2.1. İletken rayın tasarım ve teknik özellikleri

HKS'de enerji iletim elemanı olarak rijit katener uygulamalarında yaygın olarak kullanılan alüminyum iletker ray tercih edilmiştir. Alüminyum iletker ray, elektrik enerjisinin katener hattı boyunca iletilmesini sağlarken aynı zamanda kontak telinin mekanik olarak taşınmasına da olanak sağlamaktadır. Rijit yapısı sayesinde özellikle metro tünelleri, depo alanları ve bakım atölyeleri gibi sınırlı gabariye sahip bölgelerde güvenilir bir enerji iletim altyapısı oluşturmaktadır. Bu çalışmada kullanılan iletker ray profili, ekstrüzyon yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımdan imal edilmiştir. Profil kesitinin yüksekliği 110 mm, genişliği ise 85 mm olup üretici tarafından 10 m, 11 m ve 12 m uzunluklarında üretilebilmektedir. HKS'nin kurulumunda standart 12 m uzunluğundaki iletker raylar kullanılmıştır. Makas bölgeleri ve hava izolasyonlu genişleme bölgeleri dışında hat boyunca standart uzunluk korunmuştur. Kullanılan iletker ray profili, EN 50149 standardına uygun seyir telleri ile birlikte çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında kontak teli olarak 120 mm² kesit alanına sahip Cu-ETP bakır kontak teli tercih edilmiştir. Kontak teli, iletker rayın alt kısmında bulunan özel kanal içerisine mekanik olarak sabitlenmekte ve pantograf ile doğrudan temas ederek enerji aktarımını gerçekleştirmektedir. İletker ray profilinin boyutsal ve geometrik uygunluğu EN 755-9 standardı kapsamında değerlendirilmiştir. Mekanik dayanım, akım taşıma kapasitesi ve kısa devre dayanımı ise üretici teknik verileri ve gerçekleştirilen uygunluk kontrolleri esas alınarak incelenmiştir. Bu kapsamda boyutsal uygunluk, sertlik, eğilme dayanımı ve bağlantı elemanlarının montaj uygunluğu test edilmiştir. Ayrıca iletker ray profili, profil bağlantı plakaları ve fider bağlantı elemanları ile birlikte değerlendirildiğinde 100 ms süreli kısa devre koşullarında 45 kA seviyesine kadar kısa devre dayanımı sağlayabilmektedir. Elektriksel performans açısından değerlendirildiğinde, iletker ray profili 40 °C ortam sıcaklığında yaklaşık 2900 A sürekli akım taşıma kapasitesine sahiptir. IEC 62271-1 standardına göre izin verilen maksimum çalışma sıcaklığı 90 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca profilin elektriksel direnci 20 °C sıcaklıkta 0,029–0,0333 Ωmm²/m

aralığında değişmektedir. Bakım atölyelerinde kullanılan hareketli katener uygulamalarında yüksek akım taşıma kapasitesi, düşük elektriksel direnç, mekanik dayanım ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajları nedeniyle alüminyum iletken ray tercih edilmiştir. Kullanılan iletken rayın temel teknik özellikleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

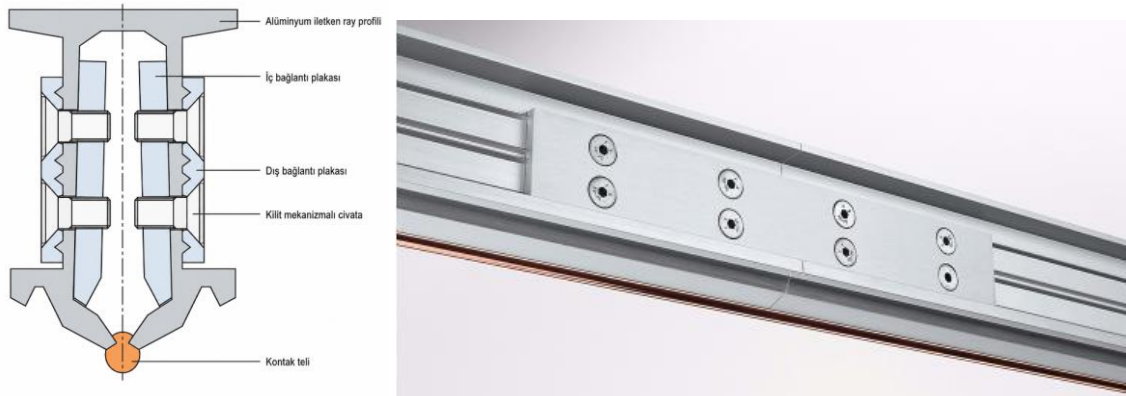
Tablo 2. Teknik özellikleri

Özellik	Değeri
Materyal	Alüminyum
Kontak Teli Uygunluğu	AC/BC 80-150
Ağırlık (Kg/M)	6,218
Ray Kesidi (Mm ²)	2300
Sürekli Akım Kapasitesi (A)	2900
Kısa Devre Darbe Akımı (Ka)	45
Kısa Devre Süresi (Ms)	100

2.2. İletken ray bağlantı plakası

İletken ray bağlantı plakaları, ardışık iletken ray profillerinin mekanik ve elektriksel sürekliliğini sağlamak amacıyla kullanılan bağlantı elemanlarıdır. Bu plakalar sayesinde bağımsız iletken ray bölümleri birbirine güvenli şekilde sabitlenmekte ve hat boyunca kesintisiz bir yapı oluşturulmaktadır. İletken rayların yan yüzeylerinde bulunan özel çentik geometrileri ile bağlantı plakalarının birlikte çalışması sonucunda, ray elemanları arasında hassas hizalama sağlanmakta ve montaj sonrasında oluşabilecek yükseklik farklılıkları minimum seviyeye indirilmektedir.

Bağlantı sistemi, iki adet iç bağlantı plakası ve iki adet dış bağlantı plakasından oluşmaktadır. Dış bağlantı plakaları, iletken ray profillerinin mekanik olarak sabitlenmesini sağlayarak hat boyunca oluşabilecek sehim ve konum değişimlerini engellemektedir. Böylece ray geometrisinin korunması ve pantograf ile katener etkileşiminin kararlı şekilde sürdürülmesi mümkün olmaktadır. İç bağlantı plakaları ise geniş temas yüzeylerine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yapı sayesinde iletken ray profilleri arasında düşük temas direnci elde edilmekte ve elektrik akımının ray bölümleri arasında güvenilir şekilde iletilmesi sağlanmaktadır. Böylece bağlantı bölgesinde oluşabilecek gerilim düşümleri ve enerji kayıpları minimize edilmektedir. İletken ray bağlantı sisteminin kesit görünümü ve bağlantı görseli Şekil 3’te gösterilmektedir.

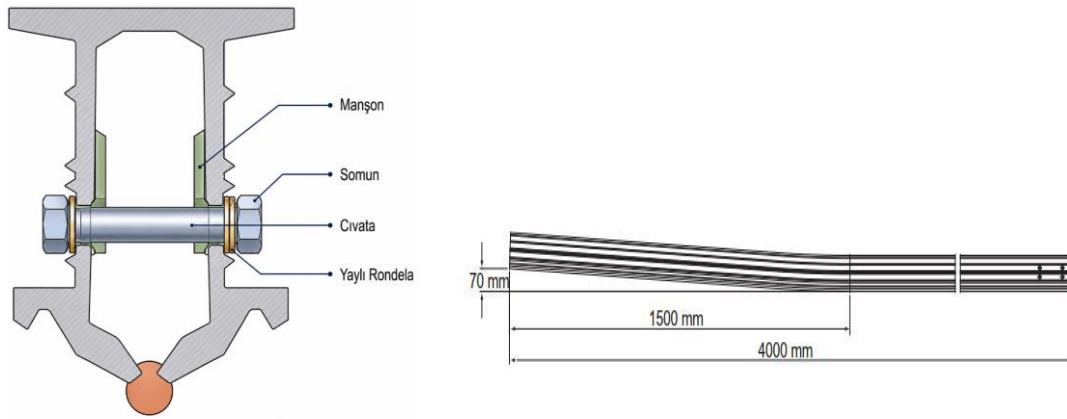


Şekil 3. Kesit ve bağlantı parçası görünümü

2.3. İletken ray rampasının tasarımı ve teknik özellikleri

İletken ray rampaları, rijit katener sistemlerinde farklı enerji bölgelerinin birbirinden hava aralığı ile izole edildiği geçiş noktalarında kullanılan özel profil elemanlarıdır. Bu bölgeler; hat etap başlangıç ve bitiş noktaları ile makas bölgeleri gibi elektriksel sürekliliğin kontrollü şekilde sonlandırılması veya yeniden başlatılması gereken alanları kapsamaktadır. Rampa profillerinin temel görevi, pantografin bir iletken ray bölgesinden diğerine geçişi sırasında oluşabilecek ani temas değişimlerini önleyerek mekanik ve elektriksel açıdan güvenli bir geçiş sağlamaktır. Bu amaçla iletken ray profili boyunca kademeli bir yükseklik değişimi oluşturulmakta ve pantografin temas kuvvetinde meydana gelebilecek ani değişimler azaltılmaktadır.

Şekil 4'te gösterildiği üzere rampa profili yaklaşık 1500 mm uzunluğundaki geçiş bölgesinde yaklaşık 70 mm seviyesinde bir yükseklik değişimi oluşturmaktadır. Bu geometri, yaklaşık $2,6^\circ$ eğime karşılık gelmekte olup pantografin iletken raydan kontrollü şekilde ayrılmasını veya iletken raya tekrar temas etmesini sağlamaktadır. Böylece temas kayıpları, mekanik darbe etkileri ve aşınma problemleri minimum seviyeye indirilmektedir.



Şekil 4. Rampa rayı kesit görünümü ve teknik çizimi

Rampa profilleri standart iletken raylardan farklı olarak özel üretim yöntemiyle imal edilmektedir. Geometrik doğruluğun ve pantograf geçiş performansının korunabilmesi amacıyla saha koşullarında bükülmemesi, düzeltilmemesi veya mekanik olarak yeniden şekillendirilmemesi gerekmektedir. Aksi durumda pantograf-katener etkileşimi olumsuz etkilenebileceğinden sistem güvenilirliği ve işletme performansı düşebilmektedir. İletken ray rampasının geometrik yapısı ve pantograf geçişine ilişkin şematik görünüm Şekil 4'te verilmiştir.

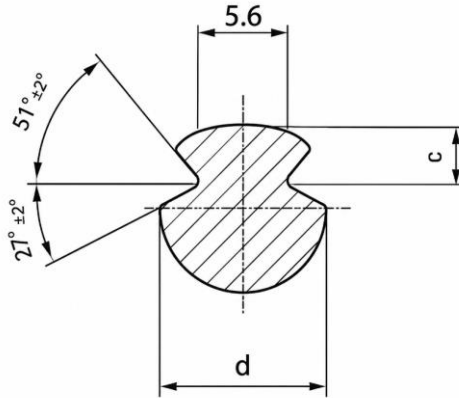
2.4. Kontak telinin mekanik ve elektriksel özellikleri

Kontak teli, rijit katener sistemlerinde elektrik enerjisinin pantograf aracılığıyla raylı ulaşım aracına aktarılmasını sağlayan temel iletken elemandır. Alüminyum iletken ray ile birlikte çalışan kontak teli, cer güç merkezlerinden sağlanan elektrik enerjisinin güzergâh boyunca raylı ulaşım araçlarına güvenli ve kesintisiz şekilde iletilmesinden sorumludur. Pantograf ile doğrudan temas halinde bulunan tek bileşen olması nedeniyle, kontak telinin elektriksel ve mekanik özellikleri enerji iletim performansını doğrudan etkilemektedir. Rijit katener sistemlerinde kullanılan kontak telleri EN 50149 standardına uygun olarak üretilmekte olup, iletken ray profiline özel bağlantı elemanları yardımıyla sabitlenmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan HKS'de kontak teli olarak AC-120 Cu-ETP tipi bakır kontak teli tercih edilmiştir. Söz konusu iletken, yüksek elektriksel iletkenlik, mekanik dayanım ve aşınma direnci özellikleri nedeniyle metro ve hafif raylı sistem uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 3. Kontak teli teknik özellikleri

Özellik	Değer
Malzeme	Cu-ETP
Birim ağırlık	1.07 kg/m
Nominal kesit alanı	120 mm ²
Minimum gerdirme yükü	330 N/mm ²
Minimum kırılma yükü	38.4 kN
Sürekli akım taşıma kapasitesi	490 A
20 °C'deki elektriksel direnç	0.15 Ω/km
20 °C'deki elektriksel iletkenlik	57 m/(Ω·mm ²)
c boyutu	4.0 mm
d boyutu	13.2 mm

Kontak telinin işletme performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri aşınma miktarıdır. Pantograf ile sürekli temas halinde çalışması nedeniyle zamanla meydana gelen aşınmaların belirlenen sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir. İzin verilebilir aşınma miktarı kullanılan kontak telinin tipine bağlı olmakla birlikte, kontak teli kesit alanının yaklaşık %36 ila %43'üne kadar olan kısmı güvenli işletme sınırları içerisinde değerlendirilmektedir.

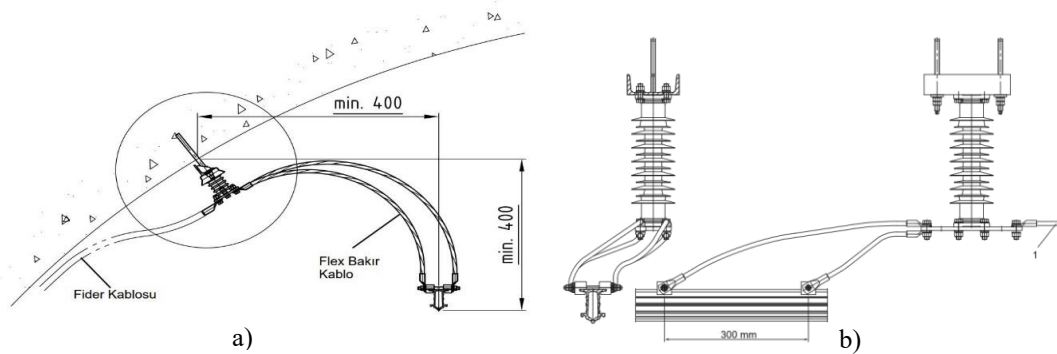
**Şekil 5.** Kesit görünümü

Ayrıca kontak telinin iletken ray içerisindeki geometrik konumu, pantograf-katener etkileşiminin sağlıklı şekilde sürdürülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle devali hat kesimlerinde iletken rayın ray üst kotuna dik olacak şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Temas düzleminin ideal konumdan sapması durumunda izin verilebilir aşınma miktarı azalmakta ve kontak telinin kullanım ömrü olumsuz etkilenebilmektedir. Bu nedenle kontak teli ile iletken ray arasındaki montaj toleranslarının belirlenen sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan AC-120 Cu-ETP kontak telinin temel teknik özellikleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

2.5. Fider besleme sisteminin yapısı

Katener sistemlerinin elektrik enerjisi, cer güç merkezlerinde doğrultulan gerilimin fider besleme noktaları aracılığıyla iletken ray sistemine aktarılmasıyla sağlanmaktadır. Bu nedenle enerji besleme noktalarının tasarımı, sistemin elektriksel performansı ve mekanik bütünlüğü açısından kritik öneme sahiptir. Rijit katener sistemlerinde kullanılan alüminyum iletken raylar, işletme koşulları altında sıcaklık değişimleri, mekanik yükler ve pantograf etkileşimleri nedeniyle belirli oranlarda düşey ekseninde hareket edebilmektedir. Bu nedenle fider kablolarının doğrudan iletken ray profiline bağlanması, sistemin doğal esnekliğini sınırlandırabilmekte ve ilave mekanik gerilmelere neden olabilmektedir. Ayrıca PVC izoleli ve zırlı yapıya sahip fider kabloları üzerinde oluşabilecek çekme ve eğilme kuvvetleri, kablo ömrünü olumsuz etkileyebileceği gibi katener sisteminin işletme performansını da azaltabilmektedir.

Söz konusu problemlerin önüne geçebilmek amacıyla fider besleme noktalarında bakır bara sistemi kullanılmıştır. Kullanılan bara yapısı, cer güç merkezinden gelen enerjinin rijit katener sistemine güvenilir şekilde aktarılmasını sağlarken, iletken ray ile bara arasında kullanılan esnek bakır bağlantı elemanları sayesinde iletken rayın hareket kabiliyeti korunmaktadır. Böylece hem elektriksel süreklilik sağlanmakta hem de mekanik yüklerin doğrudan fider kablolarına aktarılması engellenmektedir. Fider besleme noktaları genellikle istasyon bölgelerinde, enerji besleme noktalarında ve makas bölgelerinde bulunan kuplaj ayırıcılarının her iki tarafında tesis edilmektedir. Kullanılan bara sisteminin geometrisi ise uygulama bölgesinin gabari koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Gabari kısıtının bulunduğu tünel kesimlerinde kompakt bara tasarımları tercih edilirken, açık-kapalı (cut-and-cover) tüneller gibi daha geniş hacimli bölgelerde daha büyük boyutlu bara sistemleri kullanılabilir. Şekil 6'da küçük ve büyük gabarili tünel yapıları için fider besleme noktası ve bara bağlantı yapısı gösterilmektedir.



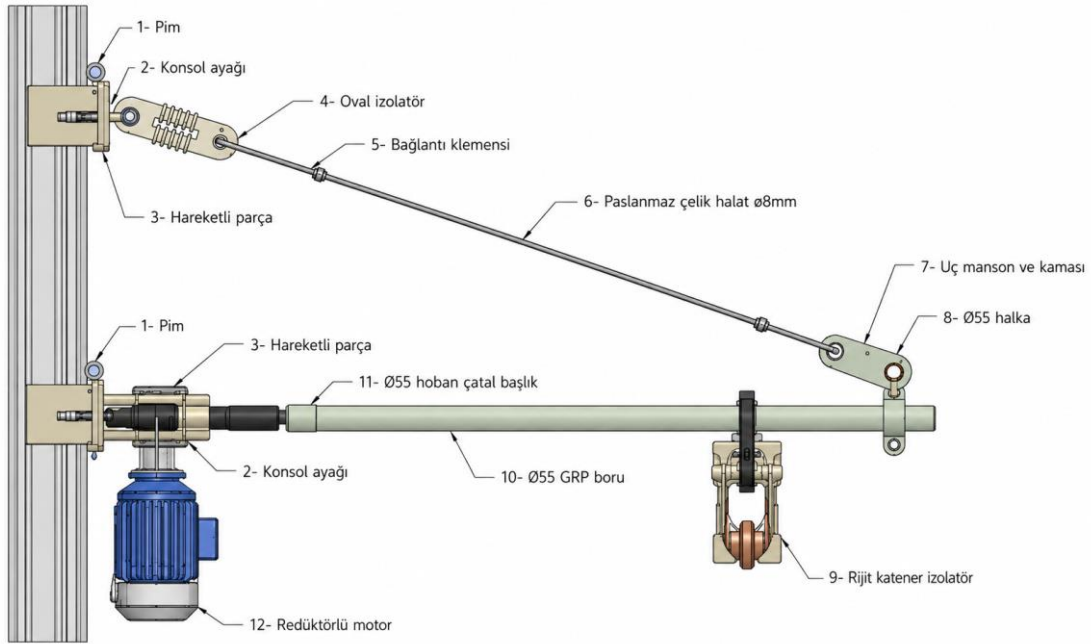
Şekil 6. a) Küçük gabarili tünel yapısındaki besleme noktası b) Büyük gabarili tünel yapısındaki besleme noktası

3. Geliştirilen HKS Konsol Yapısı ve Matematiksel Modeli

HKS'nin temel bileşenlerinden biri, rijit katener hattını taşıyan ve hareket mekanizmasının oluşturduğu yükleri karşılayan konsol yapısıdır. Konsol sistemi yalnızca iletken rayın mekanik olarak taşınmasını değil, aynı zamanda bakım faaliyetleri sırasında gerçekleştirilen açma-kapama hareketlerinin güvenli ve kontrollü şekilde gerçekleştirilmesini de sağlamaktadır. Bu nedenle konsol yapısının malzeme seçimi ve geometrik tasarımı, sistemin mekanik performansı, işletme güvenilirliği ve bakım gereksinimleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Raylı sistem katener uygulamalarında kullanılan konsol yapıları genel olarak alüminyum, sıcak daldırma galvanizli çelik ve cam elyaf takviyeli malzemelerden üretilmektedir. HKS'nin tasarım sürecinde söz konusu malzemeler; mekanik dayanım, elektriksel yalıtım performansı, ağırlık, korozyon direnci ve bakım gereksinimleri açısından değerlendirilmiştir. Yapılan

değerlendirmeler sonucunda, hareketli katener uygulamasının gereksinimlerini karşılamak amacıyla taşıyıcı yapı elemanı olarak GRP konsol kullanımına karar verilmiştir. GRP malzemenin tercih edilmesinde yüksek elektriksel yalıtım özelliği, düşük birim ağırlık, yüksek mekanik dayanım ve korozyona karşı direnç gibi özellikler etkili olmuştur. Özellikle hareketli katener uygulamalarında sistem ağırlığının azaltılması, hareket mekanizmasının ihtiyaç duyduğu tork değerlerinin düşürülmesine katkı sağlamakta ve motor boyutlandırması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca GRP malzemenin korozyona dayanıklı yapısı, bakım gereksinimlerinin azaltılmasına ve sistem ömrünün artırılmasına katkı sağlamaktadır.

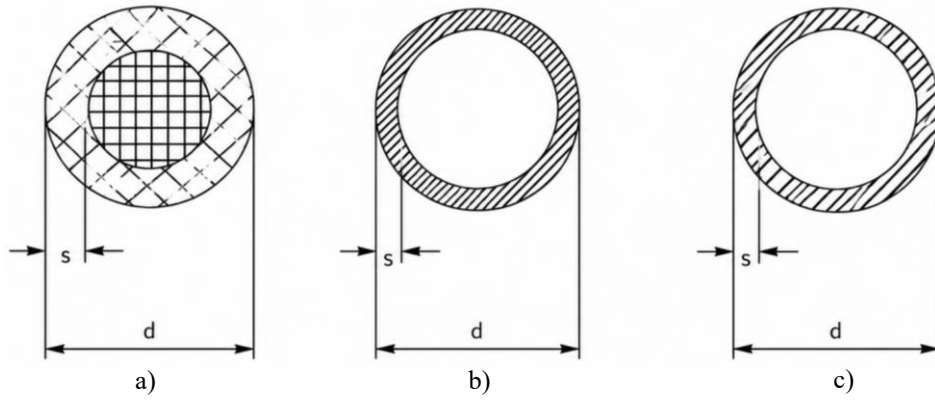


Şekil 7. Konsol yapısının genel görünümü ve temel bileşenleri

Konsol sisteminin tasarımında mevcut rijit katener uygulamalarında kullanılan taşıyıcı yapılar incelenmiş ve bakım atölyelerinin işletme gereksinimlerine uygun yeni bir mekanik yapı geliştirilmiştir. Tasarım aşamasında oluşturulan model üzerinde statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiş, sistemin maruz kalacağı yükler altında oluşan gerilme ve deformasyon değerleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen konsol yapısının işletme koşullarında oluşabilecek yükleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde taşıyabildiğini göstermiştir. Mekanik boyutlandırma ve doğrulama sürecinde, sistemin en olumsuz statik yükleme durumu esas alınmış ve taşıyıcı elemanlar üzerindeki yükler rijit cisim statığı ile moment dengesi prensipleri kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarım doğrulaması kapsamında hesaplanan yükler, üretici kataloglarında verilen mekanik dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan kontak telinin uygunluğu EN 50149, alüminyum ekstrüzyon profilinin boyutsal ve geometrik toleransları ise EN 755-9 standardı kapsamında değerlendirilmiştir. Akım taşıma kapasitesi, kısa devre dayanımı ve sıcaklık sınırları üretici teknik verileri esas alınarak incelenmiştir. Geliştirilen HKS’de kullanılan konsol yapısının genel görünümü ve temel bileşenleri Şekil 7’de gösterilmektedir.

3.1. GRP boru konsol sisteminin yapısı

HKS’nin taşıyıcı elemanı olarak kullanılan konsol borusunun seçiminde, sistem ağırlığı, mekanik dayanım, elektriksel yalıtım performansı ve bakım gereksinimleri temel değerlendirme kriterleri olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda raylı sistem katener uygulamalarında yaygın olarak kullanılan GRP, alüminyum ve sıcak daldırma galvanizli çelik boru sistemleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 8. a) GRP boru b) Alüminyum boru c) Galvanizli çelik boru

Şekil 8'de gösterilen boru kesitleri ve Tablo 4'te verilen teknik özellikler incelendiğinde, GRP boru sisteminin hareketli katener uygulamalarının gereksinimlerini karşılayan önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. GRP boru, 2.35 kg/m birim ağırlığı ile alüminyum boruya yakın bir ağırlığa sahip olmasına rağmen, 550 N/mm² çekme ve eğilme dayanımı değeri ile alüminyum borunun 310 N/mm² seviyesindeki dayanımının üzerinde performans göstermektedir. Buna karşılık sıcak daldırma galvanizli çelik borular daha yüksek ağırlıkları nedeniyle hareketli sistemlerde ilave yük oluşturmaktadır.

Tablo 4. HKS için değerlendirilen konsol boru türlerinin karşılaştırılması

Özellik	GRP	Alüminyum	Galvanizli Çelik
Ağırlık (kg/m)	2.35	2.50	5.55
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	550	310	490–630
Elektriksel Yalıtım	✓	✗	✗
Korozyon Direnci	Yüksek	Yüksek	Orta
Bakım Gereksinimi	Düşük	Orta	Orta
d (mm)	55	55	60.3
s (mm)	7.5	6.0	4.0

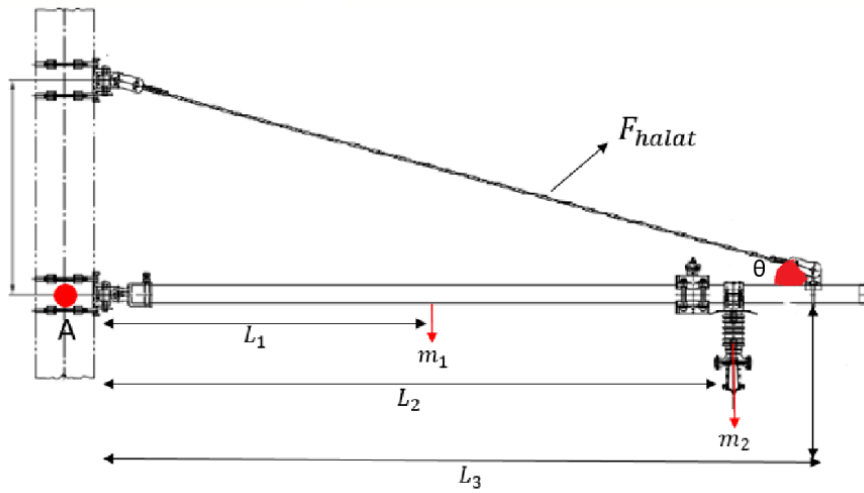
Mekanik özelliklerin yanı sıra elektriksel performans da malzeme seçiminde belirleyici olmuştur. GRP boru yapısı, yüksek elektriksel yalıtım özelliği sayesinde ilave izolasyon ihtiyacını azaltmakta ve bakım personeli açısından daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturmaktadır. Ayrıca 20 kV/mm seviyesindeki atlama gerilimi ve 15–30 kV/cm aralığındaki delinme dayanımı, raylı sistem uygulamalarında karşılaşılabilecek elektriksel zorlanmalara karşı yeterli performans sağlamaktadır. Korozyon direnci açısından değerlendirildiğinde ise GRP malzeme, alüminyum ve galvanizli çelik sistemlerde zaman içerisinde ortaya çıkabilen yüzey bozulmaları ve korozyon problemlerine karşı daha dayanıklı bir yapı sunmaktadır. Bu durum bakım gereksinimlerinin azaltılmasına ve sistem ömrünün artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenlerle geliştirilen HKS'de taşıyıcı yapı elemanı olarak Ø55 mm dış çapa sahip GRP boru tercih edilmiştir. Düşük ağırlık, yüksek mekanik dayanım, elektriksel yalıtım performansı ve korozyon direnci birlikte değerlendirildiğinde, GRP boru yapısının hareketli katener uygulamaları için en uygun çözüm olduğu belirlenmiştir.

3.2. Konsol sisteminde kullanılan çelik telin dayanımı

HKS'de kullanılan çelik halat, konsol sistemi üzerinde oluşan yüklerin taşınmasında kritik görev üstlenmektedir. Bu nedenle halat üzerinde oluşan çekme kuvvetinin belirlenmesi amacıyla statik

yük analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sistemin en olumsuz yükleme durumu dikkate alınmış ve halat üzerindeki maksimum kuvvet değeri hesaplanmıştır.

Çelik halat üzerine etki eden kuvvetlerin belirlenmesinde sistem, A noktası etrafında moment dengesi esas alınarak incelenmiştir. Statik analiz kapsamında ilk olarak A noktası referans alınarak HKS'nin moment dengesi oluşturulmuş ve toplam moment değeri Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen moment değerinden yararlanılarak çelik tel halat doğrultusuna dik kuvvet bileşeni Denklem (2) ile belirlenmiştir. Daha sonra çelik tel halatın montaj açısı dikkate alınarak çekme kuvveti Denklem (3) yardımıyla hesaplanmış ve son olarak kuvvet değeri Newton cinsine Denklem (4) kullanılarak dönüştürülmüştür. Denklem (1)'de verilen toplam moment M , GRP konsol borusunun ağırlığı w_1 ile katener profil ve kontak telinden oluşan askı yükünün ağırlığının w_2 ilgili moment kolları ile çarpımlarının toplamı olarak hesaplanmıştır. Burada l_1 , GRP borusunun ağırlık merkezinin A noktasına olan uzaklığını, l_2 ise askıda taşınan toplam yükün ağırlık merkezinin A noktasına olan uzaklığını ifade etmektedir. Tüm parametreler Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Çelik tel seçimindeki parametrelerin gösterimi

Çelik tel üzerine gelen kuvvetin hesabı A noktasına göre moment alınarak hesaplanmaktadır. Denklem (1)'de, M toplam momenti ifade etmektedir. w_1 GRP konsolunun ağırlığını, w_2 ise katener profil ve telinin ağırlığını belirtmektedir. l_1 GRP borusunun ağırlık merkezinden A noktasına olan uzaklığını, l_2 ise toplam askıda taşınan ağırlığın A noktasına olan mesafesini göstermektedir. Toplam moment, bu ağırlıkların ilgili mesafeleriyle çarpımının toplamı olarak elde etmektedir.

$$M = w_1 \times l_1 + w_2 \times l_2 \quad (1)$$

Denklem (2)'de ise, A noktasına göre hesaplanan toplam moment M değerinin, halatın bağlantı noktasının A noktasına olan mesafesi l_3 ile bölünmesi sonucunda, çelik tele dik yönde etki eden kuvvet F_z bulunmaktadır.

$$F_z = \frac{M}{l_3} \quad (2)$$

F_{halat} , çelik tel üzerine gelen çekme kuvvetini ifade etmektedir. Denklem (3)'de gösterildiği üzere, F_{halat} , çelik tele dik yönde etki eden kuvvet F_z ile, çelik telin montaj edildiği sinüs açısına

bölünerek hesaplanmaktadır. Denklem (4)'te ise, F_{halat} , çelik tel üzerine etki eden çekme kuvvetini Newton cinsinden ifade etmektedir. Burada g yerçekimi ivmesidir.

$$\sin \theta = \frac{F_z}{F_{halat}} \quad (3)$$

$$F_{halatN} = F_{halat} \times g \quad (4)$$

Gerçekleştirilen statik analiz sonucunda HKS'de kullanılan çelik tel halat üzerinde oluşan maksimum çekme kuvveti belirlenmiş ve elde edilen değer, seçilen çelik tel halatın mekanik dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, HKS'nin statik yükler altında güvenli çalışma koşullarını sağladığını ve seçilen çelik tel halatın yeterli emniyet katsayısına sahip olduğunu göstermektedir.

3.3. DC motor sisteminde tork ve güç hesabı

HKS'de kullanılan hareket mekanizmasının tahriki redüktörlü elektrik motoru ile sağlanmaktadır. Motor seçimi sırasında sistemin dönme atalet momenti, hareketli yapı üzerinde oluşan yükler ve hedeflenen açılma-kapanma süresi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda öncelikle sistemin dönme atalet momenti hesaplanmış, ardından gerekli motor torku ve güç değeri belirlenmiştir. Motor boyutlandırılmasında kullanılan matematiksel model, dönme dinamiğinin temel prensiplerine dayanmaktadır. İlk olarak sistemin dönme atalet momenti hesaplanmış, daha sonra açısal ivmeye bağlı olarak gerekli motor torku elde edilmiştir. Son aşamada ise hesaplanan tork değeri, motor devri ve sistem verimi dikkate alınarak gerekli motor gücü hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan matematiksel ifadeler Denklem (1)–(4)'te verilmiştir.

$$\tau = J_M \times \alpha \quad (5)$$

$$J_M = \frac{w_1 \times L^2}{3} + w_2 \times R^2 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (7)$$

$$P = \frac{\tau \times N}{9550 \times \eta} \quad (8)$$

Burada; τ motor torkunu (N·m), J_M sistemin dönme atalet momentini (kg·m²), α açısal ivmeyi (rad/s²), w_1 GRP konsol sisteminin ağırlığını, w_2 ise rijit katener profili ve kontak telinden oluşan askı yükünü ifade etmektedir. Ayrıca L , GRP konsol uzunluğunu, R askı yükünün dönme eksenine olan uzaklığını, ω açısal hızı, t hareket süresini, N motor devrini ve η ise motor-redüktör sisteminin toplam verimini göstermektedir.

4. Analiz ve Tasarım Sonuçları ile Sistem Kurulumunun Gerçekleştirilmesi

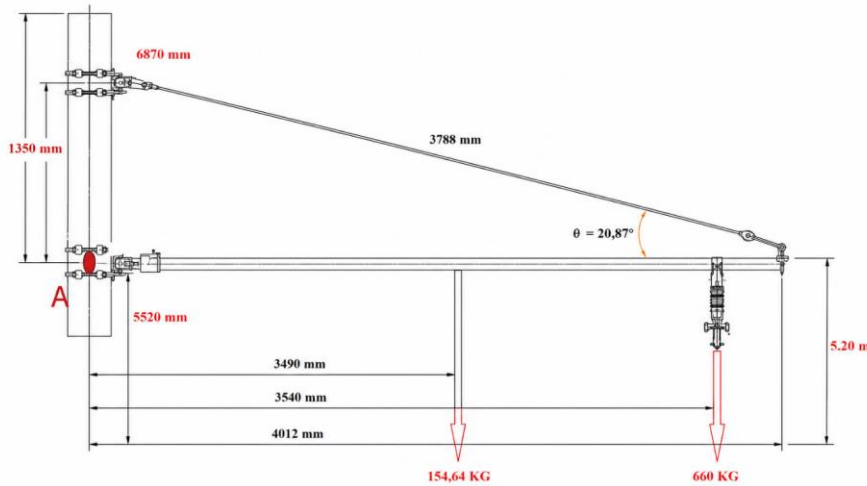
HKS'nin mekanik tasarımı, Bölüm 3'te verilen matematiksel model kullanılarak gerçekleştirilen statik analiz ve motor boyutlandırma sonuçlarına göre oluşturulmuştur. Analizlerden elde edilen yük, tork ve güç değerleri esas alınarak mekanik bileşenler boyutlandırılmış, elektriksel ekipmanlar seçilmiş ve kontrol sistemi yapılandırılmıştır.

Tasarlanan HKS, Metro İstanbul A.Ş. Dudullu Behiç Erkin Yerleşkesi'nde bulunan Dudullu Araç Bakım Atölyesi'nde uygulanmıştır. Uygulama kapsamında sistemin mekanik montajı, elektriksel entegrasyonu ve kontrol altyapısı tamamlanarak işletmeye alınmıştır. Söz konusu bakım atölyesi, metro araçlarının ağır bakım, revizyon, periyodik bakım ve arıza giderme faaliyetlerinin

yürütüldüğü bakım merkezlerinden biridir. Bu nedenle geliştirilen HKS, laboratuvar ortamında doğrulanan deneysel bir prototip yerine, gerçek işletme koşullarında kullanılan tam ölçekli bir sistem olarak değerlendirilmiştir.

4.1. Çelik tel yük analizi

Taşıyıcı sisteminde kullanılan çelik tel üzerine etki eden yükler, Bölüm 3.2'de sunulan matematiksel model kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda GRP konsol sistemi ile rijit katener profilinin oluşturduğu toplam yükler dikkate alınmış, moment dengesi esas alınarak çelik telde oluşan çekme kuvveti belirlenmiştir. Analizde kullanılan temel parametreler Tablo 5 ve hesaplama sonuçları ise Tablo 6'da sunulmaktadır.



Şekil 10. Yük analizi parametrelerinin gösterildiği teknik çizim

HKS üzerinde taşınan toplam yük altında çelik telde oluşan çekme kuvvetinin 20,4 kN olduğu hesaplanmıştır. Sistemde seçilen paslanmaz çelik telin üretici tarafından verilen minimum kopma yükü ise 36,5 kN'dir. Buna göre hesaplanan emniyet katsayısı 1,79 olarak elde edilmiştir.

Tablo 5. Geliştirilen sistemde kullanılan parametreler

Parametre	Sembol	Değer
GRP konsol ağırlığı	w_1	154.64 kg
Katener profili ve kontak teli ağırlığı	w_2	660 kg
GRP ağırlık merkezi uzaklığı	l_1	2.00 m
Katener yükü uzaklığı	l_2	3.49 m
Çelik tel bağlantı uzaklığı	l_3	3.54 m
Çelik tel montaj açısı	θ	20.87°
Yerçekimi ivmesi	g	9.81 m/s ²

Hesaplanan maksimum çekme kuvveti, seçilen çelik tel halatın üretici tarafından belirtilen minimum kopma yükü ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu doğrulama yaklaşımı, çelik tel halatların seçiminde minimum kopma yükünün esas alındığı EN 12385 standardı ile uyumludur. Analiz sonucunda elde edilen 1,79 emniyet katsayısı, HKS'nin düşük hızlı ve kontrollü hareket gerçekleştiren, statik yüklerin baskın olduğu işletme koşulları dikkate alındığında yeterli mekanik güvenlik payı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, seçilen çelik telin HKS'nin statik yüklerini güvenli sınırlar içerisinde taşıyabildiğini göstermektedir. Yaklaşık %79'luk ilave taşıma kapasitesi, işletme sırasında oluşabilecek montaj toleransları, dinamik etkiler ve çevresel yükler

dikkate alındığında sistemin güvenilir şekilde çalışmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle seçilen çelik tel, geliştirilen HKS'nin mekanik taşıyıcı sistemi için yeterli dayanımı sağlamaktadır.

Tablo 6. Çelik tel yük analizi sonuçları

Değişkenler	Değer
Düşey kuvvet F_z	738.05 kg
Çelik tel çekme kuvveti	2071.85 kg
Çelik tel çekme kuvveti	20.4 kN
Çelik tel kopma yükü	36.5 kN
Emniyet katsayısı	1.79

4.2. HKS motor torku ve güç analizi

HKS'nin açılma ve kapanma hareketini gerçekleştirecek redüktörlü elektrik motorunun seçimi matematiksel model kullanılarak sistemin dönme atalet momenti, gerekli motor torku ve motor gücü hesaplanmaktadır. Hesaplamalarda hareketli konsol sistemi, rijit katener profili ve kontak telinin oluşturduğu toplam yük ile sistemin hedeflenen hareket süresi dikkate alınmıştır. Analizde kullanılan temel parametreler Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7. Motor seçiminde kullanılan parametreler

Parametre	Sembol	Değer
GRP konsol ağırlığı	M_1	154.64 kg
Katener profili ve kontak teli ağırlığı	M_2	660 kg
GRP konsol uzunluğu	L	4.00 m
Dönme yarıçapı	R	3.49 m
İvmelenme süresi	t	1 s
Açısal hız	ω	0.188 rad/s
Açısal ivme	α	0.188 rad/s ²
Motor devri	N	1.8 dev/dak
Motor verimi	η	0.916

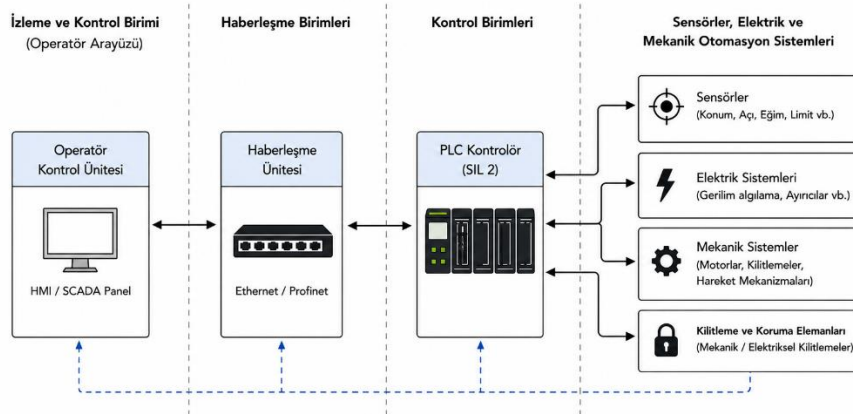
Sonuç olarak HKS'nin hareketi için gerekli minimum motor gücü 0.342 kW olarak elde edilmiştir. Bu değere karşılık gelen standart motor güç sınıfı 0.37 kW olduğundan, sistemde 0.37 kW nominal güce sahip redüktörlü elektrik motoru kullanılmıştır. Motor-redüktör grubunun çıkış milinin hareket mekanizmasına doğrudan bağlandığı tasarımda, gerekli çıkış torku 1666.36 N·m, çıkış hızı ise 1.8 dev/dak olmaktadır. Güç aktarımının dişli-rulman, pinyon dişli veya benzeri ara mekanizmalar ile gerçekleştirildiği tasarımlarda ise motorun çıkış torku ve devir sayısı, mekanik çevrim oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle motor-redüktör grubunun seçimi, HKS'de kullanılan güç aktarım mekanizmasının karakteristiklerine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir.

Tablo 8. Tork ve güç hesabı sonuçları

Değişkenler	Sembol	Değer
Gerekli motor torku	τ	1666.36 N·m
Gerekli motor gücü	P	0.342 kW

5. HKS Koruma ve Kontrol Sistemi

Sistemin güvenli ve koordineli olarak çalıştırılabilmesi amacıyla mekanik hareket, enerji yönetimi ve emniyet fonksiyonlarını bütünleştiren bir kontrol mimarisi geliştirilmiştir. Sistem PLC, HMI, motor sürücü sistemi, konum algılayıcıları, gerilim algılama birimleri ve motorlu ayırıcılar arasında gerçek zamanlı veri alışverişi esasına göre çalışmaktadır. Kontrol algoritması, HKS'nin yalnızca önceden tanımlanmış işletme koşulları sağlandığında hareket etmesine izin vermektedir. Araç konumu, enerji durumu, motorlu ayırıcı pozisyonu, mekanik kilitleme durumu ve limit sensörlerinden elde edilen bilgiler PLC tarafından sürekli izlenmekte, herhangi bir güvenlik koşulunun sağlanmaması durumunda hareket komutu oluşturulmamaktadır. Böylece HKS'nin bakım işlemleri sırasında güvenli işletimi sağlanmakta ve olası mekanik veya elektriksel riskler önlenmektedir.



Şekil 11. HKS kontrol ve otomasyon sistemi genel gösterimi

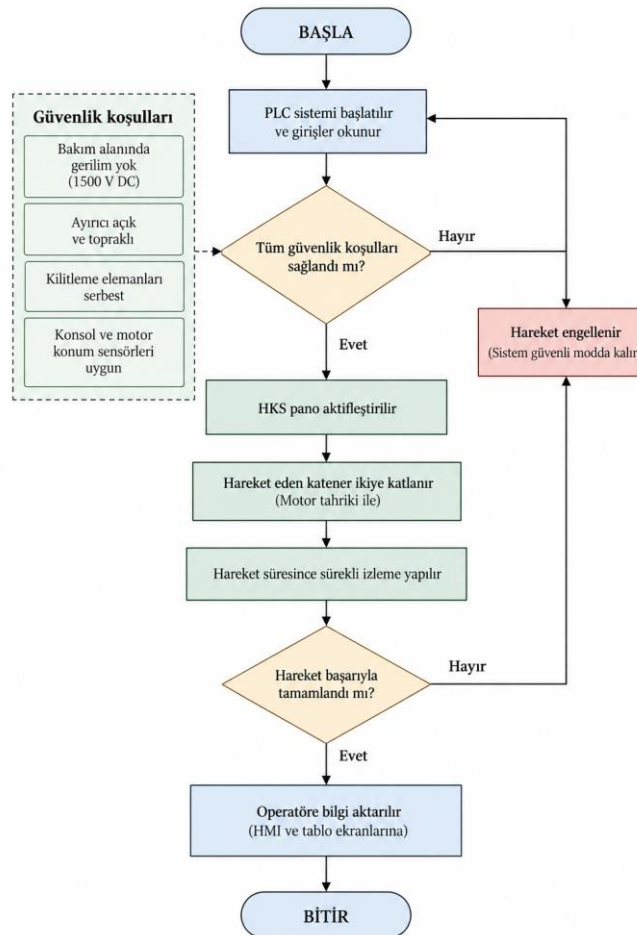
HKS'nin güvenli işletilebilmesi amacıyla, mekanik hareket, enerji durumu ve ekipman konum bilgilerini birlikte değerlendiren çok katmanlı bir koruma yapısı geliştirilmiştir. Kontrol algoritması, bakım alanındaki enerji durumu, motorlu ayırıcıların konumu, mekanik kilitleme elemanlarının durumu ve saha sensörlerinden elde edilen geri bildirimleri eş zamanlı olarak izlemektedir. HKS'nin hareket komutu yalnızca tüm işletme koşulları sağlandığında oluşturulmakta, herhangi bir güvenlik koşulunun ihlali durumunda ise sistem güvenli duruma geçirilerek hareket engellenmektedir. Koruma mimarisinde enerji doğrulaması iki bağımsız seviyede gerçekleştirilmektedir. Birincil doğrulama, 1500 V DC ayırıcının giriş ve çıkışına yerleştirilen gerilim röleleri aracılığıyla yapılırken, ikincil doğrulama rijit katener üzerine yerleştirilen gerilim algılama sensörleri ile gerçekleştirilmektedir. Böylece tek bir algılama elemanında meydana gelebilecek hata durumunda sistem güvenliği korunmaktadır. Bunun yanında mekanik hareketin doğrulanması amacıyla konsol mekanizması, motor tahrik sistemi ve kilitleme elemanları üzerinde konum sensörleri kullanılmaktadır. Tüm sensörlerden elde edilen bilgiler PLC tarafından değerlendirilmekte ve HKS'nin işletme durumu sürekli olarak izlenmektedir.

Tablo 9. HKS'de uygulanan koruma fonksiyonları

Koruma Fonksiyonu	Kontrol Kısmı	İşlevi
Enerji kilitlemesi	1500 V DC gerilim	Enerji varken HKS'nin hareketini engeller.
Ayırıcı doğrulaması	Ayırıcı konumu ve topraklama	Güvenli ayırma koşulunu doğrular.
Gerilim doğrulaması	Gerilim röleleri ve gerilim sensörleri	Enerji var/yok bilgisini doğrular.
Konum doğrulaması	Konsol ve motor konumu	Mekanik hareketi doğrular.

Kilitleme doğrulaması	Anahtar ve mekanik kilitleme	Yetkisiz hareketi önler.
Sensör doğrulaması	Limit ve konum sensörleri	Sensör geri bildirimlerini doğrular.
Operatör bilgilendirmesi	HMI ve uyarı göstergeleri	Sistem durumunu operatöre bildirir.

HKS'nin güvenli işletimi, PLC tabanlı kontrol algoritması içerisinde tanımlanan çok katmanlı koruma fonksiyonları ile sağlanmaktadır. Hareket komutu oluşturulmadan önce sistemdeki tüm emniyet koşulları doğrulanmakta, herhangi bir koruma fonksiyonunun sağlanmaması durumunda HKS güvenli moda geçirilerek hareket engellenmektedir. Geliştirilen HKS'nin kontrol ve koruma mimarisi, EN 50126'da tanımlanan RAMS yaklaşımı ile EN 50128, EN 50129 ve IEC 61508 standartlarında yer alan fonksiyonel emniyet, güvenli işletim, hata güvenli tasarım ve doğrulama prensipleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Ayrıca kontrol sistemi tasarımında makine elektrik donanımlarına ilişkin IEC 60204-1 standardındaki temel emniyet prensipleri göz önünde bulundurulmuştur. Koruma algoritmasının akış şeması Şekil 12'de gösterilmektedir. Koruma fonksiyonları Tablo 9'da verilmiştir.

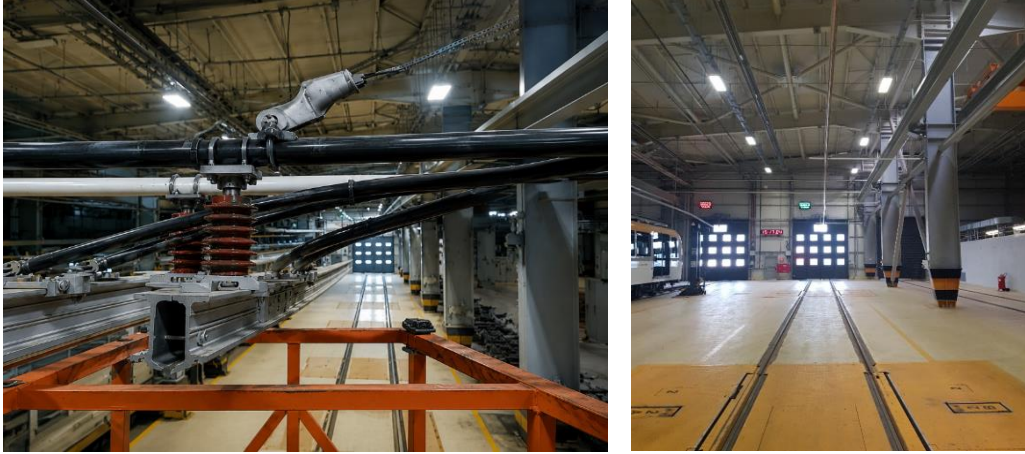


Şekil 12. HKS kontrol ve koruma algoritmasının akış şeması

6. HKS'nin Saha Uygulaması ve Maliyet Analizi

Önerilen HKS, Metro İstanbul A.Ş. Dudullu Behiç Erkin Yerleşkesi'nde bulunan Dudullu Araç Bakım Atölyesi'ne kurulmuş ve işletmeye alınmıştır. Sistem, bakım yolları üzerinde iki adet HKS olarak uygulanmış olup metro araçlarının ağır bakım, revizyon, periyodik bakım ve arıza giderme

süreçlerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Şekil 13'de bakım atölyesine kurulan HKS'nin genel görünümü, Şekil 14'te ise HKS operatör paneli ve HMI ekranları ise gösterilmektedir. Geliştirilen HKS, rijit katener hattının güvenli şekilde katlanmasına olanak sağlayarak araç üstü ekipmanlarına doğrudan erişim sağlamaktadır. Böylece sabit katener sistemlerinde kullanılan pergel vinç uygulamaları ve araç hareket ettirilmesine dayalı ölü manevra ihtiyacı ortadan kaldırılmaktadır. Bunun sonucunda bakım operasyonlarının süresi kısalmakta, personel ihtiyacı azalmakta ve bakım süreçlerinin işletme sürekliliği artırılmaktadır.



Şekil 13. Araç bakım atölyesinde kurulumu yapılmış HKS



Şekil 14. HKS Operatör ekranı

Tablo 10'da verilen karşılaştırmalar tek bir metro aracının bakım operasyonu esas alınarak hazırlanmıştır. Personel birim iş gücü maliyeti 630 TL/saat olarak alınmıştır. Geliştirilen HKS ile bakım süresinde yaklaşık %94 oranında azalma sağlanmaktadır. Dudullu Araç Bakım Atölyesi'nin yıllık bakım kapasitesi dikkate alındığında, HKS'nin işletmeye alınması ile ağır bakımdaki bir araç başına çalışan personel ücreti %98,1 oranında azaltılmaktadır.

Tablo 1. SKS ile geliştirilen HKS'nin bakım süreçlerinin ekonomik karşılaştırılması

Kriter	Mevcut SKS	Geliştirilen HKS
Ağır bakım operasyon süresi	2 saat	7 dakika
Rutin bakım	Yapılamaz	Yapılabilir
Araç üstü erişim	Pergel vinç	Doğrudan erişim
Araç hareketi	Ölü manevra	Gerekmez
Personel	3	1
Araç başına personel maliyeti	3780 TL	73 TL
Yıllık ağır bakımdaki araç sayısı (M5 metro hattı için)	142	142

İş gücü maliyetindeki iyileşmenin yanı sıra, önerilen sistemin ekonomik açıdan değerlendirilmesi amacıyla ilk yatırım maliyeti de hesaplanmıştır. HKS'nin kurulumu için gerekli yatırım maliyeti; GRP tabanlı konsol sistemi, tahrik mekanizması, PLC ve HMI tabanlı kontrol sistemi, sensörler, mekanik kilitleme elemanları, elektrik tesisatı, montaj ve devreye alma çalışmalarını kapsayacak şekilde hesaplanmıştır. Hesaplamalarda yalnızca HKS'nin kurulumu için gerekli ilave sistem bileşenleri dikkate alınmış; mevcut bakım atölyesi altyapısı, rijit katener sistemi ve enerji besleme altyapısına ilişkin maliyetler değerlendirme kapsamı dışında tutulmuştur. Bu kapsamda HKS'nin toplam ilk yatırım maliyeti yaklaşık 18.000 USD olarak hesaplanmış olup, maliyeti oluşturan temel bileşenler Tablo 11'da sunulmaktadır.

Tablo 11. HKS temel bileşenlerin maliyetleri

Parametre	Maliyet(\$)
GRP konsol sistemi ve mekanik konstrüksiyon	5.200
Tahrik sistemi	3.800
Kontrol ve otomasyon sistemi	4.000
Elektrik montajı ve kablolama	1.000
Mekanik montaj ve devreye alma	2.400
Mühendislik, tasarım ve doğrulama	1.600

7. Sonuç

Bu çalışmada, metro araç bakım atölyelerinde kullanılan rijit katener sistemlerinin bakım süreçlerinde oluşturduğu erişim ve işletme kısıtlarını ortadan kaldırmaya yönelik HKS geliştirilmiştir. Önerilen sistem, rijit katener hattının iki parçalı mekanik yapı ile güvenli şekilde katlanmasını sağlayarak araç üstü ekipmanlarına doğrudan erişim imkânı sunmaktadır. HKS'nin mekanik tasarımı kapsamında GRP tabanlı konsol yapısı geliştirilmiş, sistemin statik yük analizi ile taşıma kapasitesi doğrulanmış ve hareket mekanizmasına ait motor boyutlandırması analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, PLC tabanlı kontrol mimarisi ile enerji doğrulama, ayırıcı kontrolü, mekanik kilitleme ve sensör doğrulama mekanizmalarını içeren çok katmanlı bir koruma yapısı geliştirilmiş ve bu fonksiyonlar tek bir kontrol algoritması altında bütünleştirilmiştir. Önerilen mimari, SIL2 seviyesindeki uygulamalarda yaygın olarak kullanılan fonksiyonel emniyet prensiplerini destekleyecek şekilde tasarlanmıştır.

Geliştirilen HKS, Metro İstanbul A.Ş. Dudullu Behiç Erkin Yerleşkesi Dudullu Araç Bakım Atölyesi'nde iki bakım yolu üzerine kurulmuş ve işletme koşullarında doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, sabit rijit katener sistemlerinde yaklaşık 2 saat süren araç üstü erişim süresinin HKS ile

yaklaşık 7 dakikaya indirildiğini göstermektedir. Ayrıca araç hareket ettirilmesine dayalı ölü manevra ihtiyacı ortadan kaldırılmış, bakım operasyonları tek personel ile gerçekleştirilebilir hâle gelmiş ve bakım süreçlerinin sürekliliği sağlanmıştır. İşletme verileri dikkate alındığında sistem, araç başına %98,1 iş gücü maliyeti tasarrufu sağlamaktadır.

Çalışmada geliştirilen HKS, yalnızca bakım erişilebilirliğini artıran bir mekanik çözüm sunmakla kalmayıp bakım verimliliği, işletme güvenliği ve yaşam döngüsü maliyetleri açısından da önemli kazanımlar ortaya koymaktadır. Modüler yapısı sayesinde sistem, farklı metro, hafif raylı sistem ve tramvay bakım atölyelerine uyarlanabilecek ölçeklenebilir bir çözüm niteliği taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda, önerilen HKS'nin farklı raylı sistem bakım tesislerine uyarlanması, kestirimci bakım uygulamaları, uzaktan izleme altyapıları ve dijital ikiz tabanlı bakım yönetim sistemleri ile bütünleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca sistemin farklı yükleme koşullarındaki mekanik davranışının sayısal analiz yöntemleri ile desteklenmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Çalışma için gerekli veriler Metro İstanbul A.Ş. tarafından sağlanmıştır. Tüm destekleri için teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] D. Zou, M. Tan, N. Zhou, and W. Zhang, "Review of pantograph and catenary interaction," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 311–322, Sep. 2018, doi: 10.1007/s11465-018-0494-x.
- [2] Z. Liu, Y. Song, S. Gao, and H. Wang, "Review of perspectives on pantograph-catenary interaction research for high-speed railways operating at 400 km/h and above," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 3, pp. 7236–7257, Sep. 2024, doi: 10.1109/TTE.2023.3346379.
- [3] A. Collina, A. Lo Conte, and G. Bucca, "Feasibility analysis of monitoring contact wire rupture in high-speed catenary systems," *Vibration*, vol. 8, no. 2, Art. no. 22, 2025, doi: 10.3390/vibration8020022.
- [4] M. Simarro, S. Postigo, P. Reyes, R. J. Luque, P. V. Bačić, and J. J. Castillo, "A study on the dynamic response of the double pantograph interaction with rigid catenary," *Engineering Structures*, vol. 334, Art. no. 120234, 2025, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120234.
- [5] Y. Wang, Q. Huang, X. Chen, G. Zhao, and X. Mu, "Dynamic characteristics analysis of double pantograph catenary of AC rigid catenary system," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 70396–70407, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3293151.
- [6] G. Karaduman and E. Akin, "A new approach based on predictive maintenance using the fuzzy classifier in pantograph-catenary systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 5, pp. 4236–4246, May 2022, doi: 10.1109/TITS.2020.3042997.
- [7] G. Wu, X. Li, Y. Zhang, and J. Wang, "Pantograph-catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks," *Railway Engineering Science*, vol. 30, no. 4, pp. 437–467, 2022.
- [8] Q. Luo, Z. Li, H. Wang, and X. Zhao, "Wear performance of pantograph-overhead catenary system: a review," *Railway Engineering Science*, pp. 1–20, 2026, doi: 10.1007/s40534-026-00429-4.
- [9] W. Ren and G. Chen, "Experimental study on the wear mechanism of the contact line in rigid pantograph-catenary systems," *Tribology International*, vol. 187, Art. no. 108739, 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108739.
- [10] Y. Hu, J. Liu, H. Wang, et al., "Influence of arc discharge on the temperature and wear behaviors of the contact strip in pantograph-rigid catenary systems under AC conditions," *Wear*, vol. 546, Art. no. 205368, 2024, doi: 10.1016/j.wear.2024.205368.
- [11] G. Mei, "Electric sliding wear performance optimization of rigid contact wire/strip pairs under DC passage," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 74, no. 6, pp. 629–635, 2022, doi: 10.1108/ILT-04-2021-0135.
- [12] X. K. Wei, H. F. Meng, J. H. He, L. M. Jia, and Z. G. Li, "Wear analysis and prediction of rigid catenary contact wire and pantograph strip for railway system," *Wear*, vols. 442–443, Art. no. 203118, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2019.203118.

- [13] N. Zhou et al., “Wear rate and profile prediction of Cu-impregnated carbon strip for high-speed pantograph,” *Wear*, vol. 530, Art. no. 205056, 2023, doi: 10.1016/j.wear.2023.205056.
- [14] Z. Yang et al., “Analysis and prediction of uneven wear in metro pantograph-rigid catenary system,” *Tribology International*, vol. 198, Art. no. 109925, 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2024.109925.
- [15] Z. Hu et al., “Experimental and numerical exploration of support stiffness influence on the current collection quality of pantograph and overhead conductor rail system,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 3, pp. 7112–7126, 2023, doi: 10.1109/TTE.2023.3345955.
- [16] C. Yang et al., “Impact of damaged dropper on pantograph-catenary current collection quality in high-speed railways,” *Inventions*, vol. 11, no. 2, Art. no. 26, 2026, doi: 10.3390/inventions11020026.
- [17] M. Tan, H. Li, and L. Nie, “Defect diagnosis of rigid catenary system based on pantograph vibration performance,” *Actuators*, vol. 13, no. 5, Art. no. 162, 2024, doi: 10.3390/act13050162.

Özgeçmiş



Furkan KARAKUŞ

2012 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünden lisans derecesini, 2018 ve 2022 yıllarında aynı üniversiteden sırasıyla yüksek lisans ve doktora derecelerini almıştır. 2012 yılından bu yana Metro İstanbul A.Ş. bünyesinde görev yapmakta olup Ar-Ge Merkezi’nde Elektrik Sistemleri Koordinatörü olarak çalışmalarını sürdürmektedir. Çalışma alanları raylı sistemler, elektrifikasyon sistemleri, enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik konularını kapsamaktadır

E-Posta: furkan.karakus@metro.istanbul

Beyanlar:

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde, yapay zekâ tabanlı araçlardan yalnızca yazım dili, dilbilgisi ve anlatımın iyileştirilmesi amacıyla yararlanılmıştır. Yapay zekâ araçları, literatür taraması, çalışmanın bilimsel içeriğinin oluşturulması, veri analizi, sonuçların elde edilmesi veya yorumlanması süreçlerinde kullanılmamıştır. Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.