



Raylı Sistem Elektrifikasyonu Katener Sistemlerinde Pandül Verilerinin Yapay Sinir Ağları ile Tasarlanması

Seçkin ULUSKAN^{*1} , Alırza ATAM² 

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Raylı Sis. Elektrik Elektronik Prg., Eskişehir, Türkiye

² Eskişehir Teknik Üniversitesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

*seckinuluskan@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 19.12.2022, Kabul/Accepted: 09.01.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Bu çalışmada, raylı sistemlerde pandül boylarının yapay sinir ağları ile elde edilmesi ele alınmıştır. Demiryolu taşımacılığında elektrifikasyon sistemlerinin önemi çok büyüktür. Pantografin temas ederek enerji aldığı seyir telinin pantografla sürekli temas halinde olmasından dolayı ray üstünden yüksekliğinin her noktada aynı olması sağlanmalıdır. Seyir telini belirlenen yükseklikte sabit tutabilmek için seyir telinin üzerinde aynı hizada giden bir taşıyıcı portör teli tesis edilir ve pandül adı verilen ara bağlantı elemanlarıyla seyir teli portör teline asılır. Pandüllerin, çeşitli değişkenlere göre konumlarının ve boylarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde, pandül verilerinin hesaplanması, modellenmesi ve simülasyonlara dahil edilmesi, diferansiyel denklemler, doğrusal olmayan denklem sistemlerinin çözümü, sonlu elemanlar yöntemi vb. hesaplamalar içermektedir. Pandül hesapları önceleri elle çözümlenirken, günümüzde bazı firmaların geliştirdiği pahalı yazılımlar ile hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada özgün bir yaklaşım olarak, pandül verilerinin elde edilebilmesi için daha önceki projelerde uygulanmış olan pandül verileri kullanılarak Matlab® yazılımı ile yapay sinir ağları eğitilmiştir. Böylelikle, test verileri ile yapılan incelemede pandül boylarının otomatik olarak yüksek bir doğruluk seviyesinde hesaplanabildiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, Demiryolu katener sistemleri, Elektrifikasyon, Pandül hesaplamaları, Yapay sinir ağları

Designing Dropper Data with Artificial Neural Networks in Railway Electrification Catenary Systems

Abstract: In this study, determination of the dropper lengths in rail systems via artificial neural networks is discussed. The role of electrification systems in railways is quite important. It should be ensured that the height of contact wire which the pantograph constantly contacts should be the same at every point of the line. In order to keep the contact wire stable at a specific height, a messenger wire which runs in the same line but above of the contact wire is installed. The contact wire is hung on the messenger wire with intermediate connection elements called dropper. The heights and locations of droppers should be carefully determined according to various factors and variables. In the literature, calculating, modeling and simulating the dropper data require solving differential equations, nonlinear equation systems, finite element method etc. While previously, the dropper heights were determined manually, they can be recently calculated with special software developed by certain companies. In this study, as a new approach, in order to be able to produce new dropper data, artificial neural networks have been trained with Matlab® by means of the dropper data utilized previously in railway projects. Finally, it has been observed that the dropper lengths can be calculated automatically with a high accuracy for a test data.

Keywords: Rail systems, Railway catenary system, Electrification, Dropper calculations, Artificial neural networks

Atıf için/Cite as: S. Uluskan, A. Atam, "Raylı sistem elektrifikasyonu katener sistemlerinde pandül verilerinin yapay sinir ağları ile tasarlanması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 161-173, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1220992

1. Giriş

Elektrikli demiryolu işletmeciliğinde tren setinin enerjilendirilmesi; iletim hatlarından, tren setinin akım toplayıcısı vasıtasıyla enerjinin alınarak çekiş mekanizmalarına iletilmesiyle olmaktadır. Elektrifikasyon sistemlerinin önemli parçası standart katener sistemleridir. Bu sistemler, tren setlerinin çeken araçlarındaki pantografin havai katener iletkenlerine temasıyla enerjilenmesi prensibiyle oluşturulan sistemlerdir. Katener hattı, portör(taşyıcı) teli, seyir teli, y halatı ve pandüllerden oluşur.

Seyir teli pantografin sürekli temas ederek enerji aldığı teldir. Bu sebeple seyir telinin ray üstünden yüksekliklerinin her noktada aynı olması sağlanmalıdır. Aksi durumda, tel yüksekliklerindeki tolerans dışı değişimler sonucunda ark oluşumları meydana gelmekte ve aşırı temas kuvvetleri oluşabilecektir. Bu durumlarda, seyir telinde aşınma ve kopma şeklinde hasarlar meydana gelecektir. Bu nedenle seyir telinin ray üstünden yüksekliğinin uluslararası standartlarda belirlenen tasarım değerlerinde hattın hızına göre toleranslar dahilinde sabit tutulması kritik öneme sahiptir. Seyir telini belirlenen ray üstü yüksekliğinde sabit tutabilmek için; seyir telinin üzerinde seyir teli ile aynı hizada giden ve seyir telinin asılı olduğu taşıyıcı portör telleri tesis edilir ve pandül adı verilen ara bağlantı elemanlarıyla seyir teli bu portör teline asılır. Pandüllerin; taşıyıcı telin sehimi, seyir telinin sehimi, tellerin gerginliği vb. değişkenlere göre konumlarının ve boylarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir.

Katener tesislerinde, pandül boyları önceleri el ile hesaplanarak yerleştirilir, boyları ayarlanır ve montajları yapılır. Literatürde, bu hesapların otomatikleşmesi ve dijitalleşmesi için çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Cho'nun, 2008'deki çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan pandül denklemleri önerilmiş ve pantograf-katener dinamiğinin bir simülasyonu sunulmuştur [1]. Çalışmada, bir pandüle etki eden bir kuvvet, portör ve seyir telinin dinamik yer değiştirmesi ve hızları, bir pandülün esnemezlik ve sönümleme katsayısı, pandül üzerindeki statik kuvvetler dikkate alınarak diferansiyel denklem şeklinde tasarlanmıştır. Cho ve diğerleri 2010'da pantograf-demiryolu katener sisteminin hareket denklemlerini doğrusal olmayan denklem sistemi şeklinde yazmışlardır. Daha sonra bu doğrusal olmayan denklemler basitleştirilerek, sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile katener sistemi parçaları hesaplanmıştır [2].

Jung ve diğerleri (2012), yine katener ve pantografin dinamik etkileşimlerinin bir analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sunmaktadır. Çalışma, pandül uzunluğunu hesaplamak için bir analitik yöntem aktarmıştır. Hesaplanan pandül uzunlukları bir katener modeline uygulanmış ve yerçekiminden kaynaklanan deformasyonun simülasyonu yapılmıştır [3]. Lee ve Park (2012), çalışmalarında mutlak düğüm koordinat denklemleri ile yine katener sistemi tasarımı yapılmıştır [4]. Benet ve diğerlerinin 2013'te yayınlanan çalışmalarında, 3 boyutlu bir katener sistemi modeline ait denklemler, yüksek işlem performansına sahip InDiCa3D isimli bir yazılım aracılığıyla hesaplanmıştır [5].

Song ve diğerleri (2015) çalışmalarında pandül hesabını doğrusal olmayan modeller aracılığıyla tasarlanmasının gerekliliğini savunmuşlardır. Çalışmada, pandül hesaplarının yapılmasını sağlayacak doğrusal olmayan denklemlerin Newton-Raphson iterasyon metodu ile çözülmüştür [6]. Chen ve diğerleri (2018), çalışmalarında pandüllerin yorulma yaşam analizi yaparak, pandül hesaplarına yönelik araştırma alanına farklı bir yaklaşım getirilmiştir [7].

Günümüzde pandül hesapları çeşitli ticari yazılımlar vasıtasıyla hesaplanabilmektedir. Bu maliyetli yazılımlara bir alternatif olarak önceki projelerden elde edilen verilerle yapay sinir ağları oluşturularak pandül boylarının belirlenmesi bir alternatif olarak düşünülebilir. Literatürde, katener sistemleri için yapay sinir ağları kullanılarak çeşitli hesaplar yapılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur [8,9]. Fakat, yapay sinir ağları kullanılarak pandül boyu

belirlenmesi ile ilgili bir çalışma mevcut değildir. Bu vesileyle bu çalışma, raylı sistemlerdeki makine öğreniminin bu alanda literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada özgün bir yaklaşım olarak, pandül verilerinin elde edilebilmesi için geçmişteki demiryolu projelerinde kullanılan pandül verileri aracılığıyla Matlab® (The MathWorks, Inc., 2014b) yazılımı ile yapay sinir ağları eğitilmiştir. Böylelikle, test verileri ile yapılan incelemede pandül boylarının otomatik olarak yüksek bir doğruluk seviyesinde hesaplanabildiği gözlenmiştir. Bu çalışmanın devamı şu şekilde düzenlenmiştir: ilk olarak katener sistemleri ve pandül kavramı anlatılmıştır. Daha sonra pandül verilerinin hesaplanabilmesi için yapay sinir ağlarının eğitilmesi ve eğitilen yapay sinir ağlarının test edilmesi anlatılmıştır. Son olarak sonuçlar sunulmuş ve sonuçların ve çalışmanın önemi aktarılmıştır.

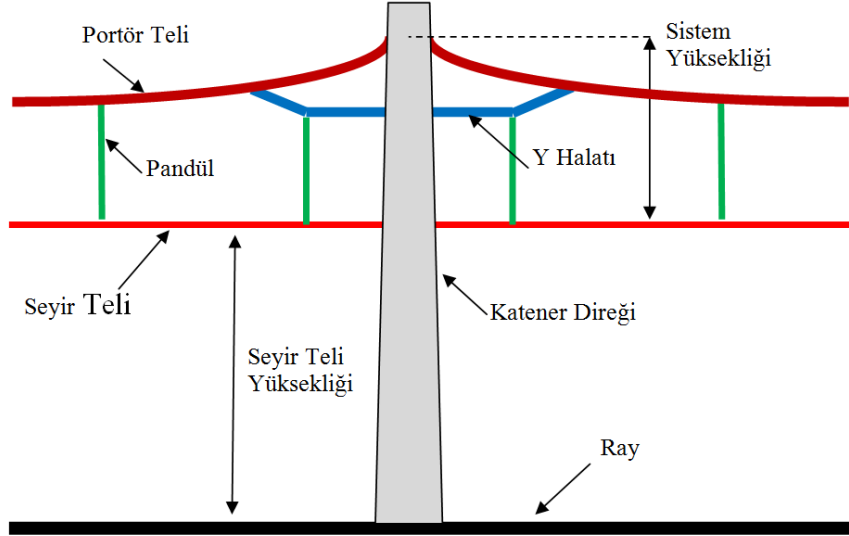
2. Standart Katener Sistemleri ve Pandüller

Bu bölümde, kısaca standart katener sistemleri ve pandül kavramı açıklanacaktır. Standart katener sistemleri, hattın belirli noktalarına tesis edilen destek noktaları (direkler, portallar, şezler), bu destek noktalarının ankrajları ve yine bu destek noktalarına asılan katener iletkenlerinden oluşur. Tren seti, pantografin temas teline sürekli temas etmesi yolu ile enerjilendirilir.

Şekil 1'de, standart katener sistemlerinin genel görünümü ve konsol-hoban takımlarına yönelik bir fotoğraf sunulmuştur. Şekil 2'de ise katener sisteminin parçaları ve katener iletkenlerini gösteren bir şema gösterilmektedir [10]. Şekil 1 ve 2'de gösterilen kısımlar bu bölümde kısaca tanıtılacaktır.



Şekil 1. Standart katener sistemlerine örnek olarak bir fotoğraf



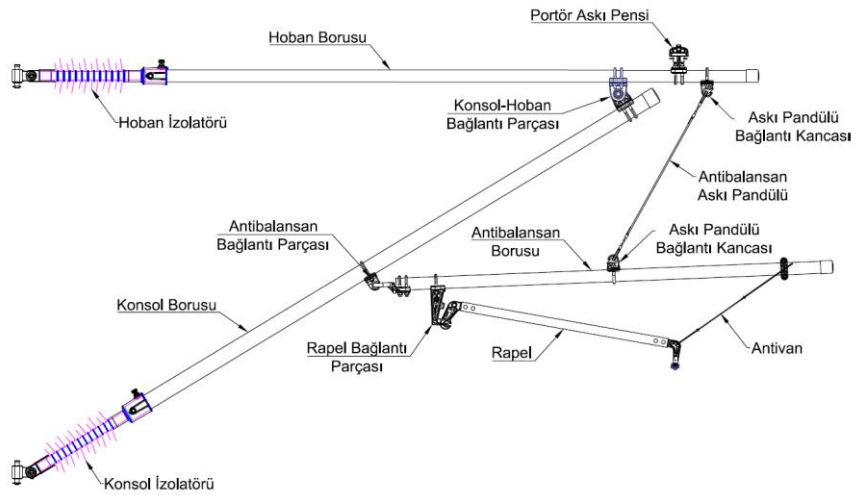
Şekil 2. Katener sisteminin parçaları ve katener iletkenleri

2.1. Katener direkleri

Katener direkleri; katener bileşenlerinin istenilen noktada sabitlenebilmesi için hat boyunca belirli aralıklarla tesis edilirler. Bu aralıklar, proje bazlı temel tasarım dokümanlarında hesaplanmaktadır. Direk tipleri ilgili projeye göre beton veya çelik olarak seçilir. Üzerindeki ekipmanlara göre boyları belirlenir, direk üzerine gelen tüm yükler hesaplanarak analizler yapılır ve katener direkleri tasarlanmış olur.

2.2. Konsol-hoban takımları

Seyir teli, portör teli, Y halatı, pandül gibi katener iletkenlerini taşıyan, istenilen seviye ve ekseninde tutulmasını sağlayan ve katener direklerine sabitlenen donanıma konsol-hoban takımı adı verilir. Şekil 3'teki gösterildiği üzere konsol-hoban takımlarında, portör askı pensine portör teli, rapel ekipmanının ucuna da seyir teli sabitlenir.



Şekil 3. Konsol-hoban takımı örnek görünümü

2.3. Seyir teli

Elektrik enerjisinin pantograf vasıtasıyla elektrikli diziye ya da lokomotifte iletmesini sağlayan ve seyir esnasında pantografin sürekli temas ettiği tel seyir teli veya temas teli olarak adlandırılır. Seyir teli, temas edilen tel olduğundan tek damarlıdır ve temas yüzeyleri pürüzsüzdür. Seyir tellerinin yalnızca pürüzsüz yüzeyinin temas edebilmesi için teller yivli yapıdadır ve yiv açılarına göre AC ve BC tip olmak üzere iki ayrılırlar.

Seyir teli, tren seyir halindeyken süreklilikle (bazen yüksek hızlarda) pantograf ile temas halinde olduğundan, hattın dinamiği açısından raydan yüksekliğinin her noktada aynı seviyede olması sağlanmalıdır. Tolerans dışı yükseklik farkları, yüksek hızlarda telin fazla salınım yapmasına ve bu salınımlar sonucu tel kopmalarına sebebiyet verebilir. TSEN 50367 standardına göre nominal seyir teli yükseklikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Nominal seyir teli yüksekliği- TS EN 50367

Hat Hızı V(km/s)	$V \leq 200$	$200 < V < 250$	$V \geq 250$
Nominal seyir teli yükseklik aralığı (m)	5,0- 5,75	5,0- 5,5	5,08- 5,3

2.4. Portör teli

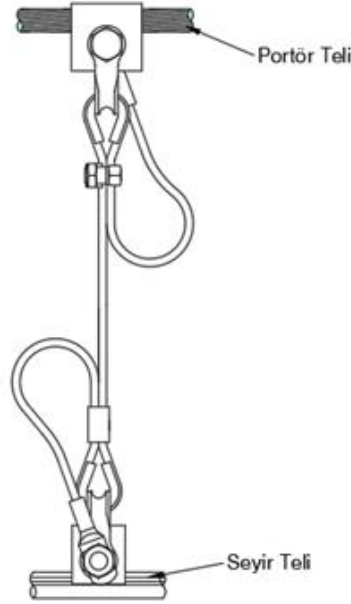
Seyir telini belirlenen yükseklikte sabit tutabilmek için; seyir telinin üzerinde aynı hızda giden ve seyir telinin asılı olduğu taşıyıcı bir portör teli tesis edilir. Bu taşıyıcı tel, pandüller aracılığıyla seyir telinin iki destek noktası arasındaki sehimini tolere eder ve bu sayede seyir teli istenilen seviyede tutulmuş olur. Taşıyıcı amaçlarından dolayı portör telleri çok damarlı olarak tesis edilirler. Portör teli malzemesi ve kesiti projeye göre farklılık gösterebilir. Akım paylaşımı amacıyla da genellikle bakır iletken, kimi zaman da alüminyum olarak tercih edilirler.

2.5. Y halatı

İşletmecilik hızı arttıkça, pantograf ile seyir teli arasındaki dinamik etkileşim arttığından, seyir teli seviyesini daha hassas koruyabilme adına her destek noktasına portör telini destekleyici bir tel olan Y Halatları tesis edilirler. Genellikle bakır iletken olarak seçilirler.

2.6. Pandül

Seyir telinin portör teline asıldığı ara bağlantı elemanlarına pandül denir. Destek noktalarını artırmadan pandüller takılarak seyir telinin esnekliği artırılır [11]. Seyir teli, pandüller vasıtasıyla istenilen düşey seviyede tutulmaktadır. Pandüller kimi zaman yalnızca taşıma görevi üstlenseler de günümüzde kullanılan pandüller bakır iletkenlerden üretilirler ve portör ve seyir tellerinin akımı bölüşmelerini sağlarlar. Şekil 4'te pandül seti örneği gösterilmiştir.



Şekil 4. Pandül seti

Pandül tasarımında; Seyir teli ağırlığından, buz yüklerinden(mevcutsa), rüzgâr yüklerinden ve seyir teli profilinden kaynaklanan dikey yükler, titreşimden ve pandül bükülmesinden kaynaklı dinamik yükler, montaj aşamasındaki yükler, komşu pandüllerdeki hatalardan kaynaklanan geçici yükler, demiryolu hattının yatay ve düşey geometrisi ve dezeksman dikkate alınmalıdır.

Daha önce açıklandığı gibi pandüller; hattın dinamiği ve esnekliği açısından çok önemlidirler. Taşıyıcı telin sehimi, seyir telinin sehimi, tellerin gerginliği vb. değişkenlere göre konumlarının ve boylarının titizlikle belirlenmesi gerekmektedir. Pandül boy ve konumları önceleri el ile hesaplanarak belirlenirken, günümüzde bazı firmaların geliştirdiği yazılımlar ile hesaplanabilmektedir.

2.7. Dezeksman

Hareket halindeki pantografin seyir teli ile teması sonucu oluşan sürtünmenin sürekli olarak aynı noktada kalarak, pantograf yüzeyindeki kömürünü çabuk aşındırmaması ve kömür yüzeyinin homojen olarak aşınmasının sağlanması için katener hattı, hat ekseninden yatay olarak belirli değerlerle kaçırılması durumudur. Seyir telinin yanı sıra portör teline de dezeksman verilmektedir.

2.8. Otomatik gergi cihazı (OGC)

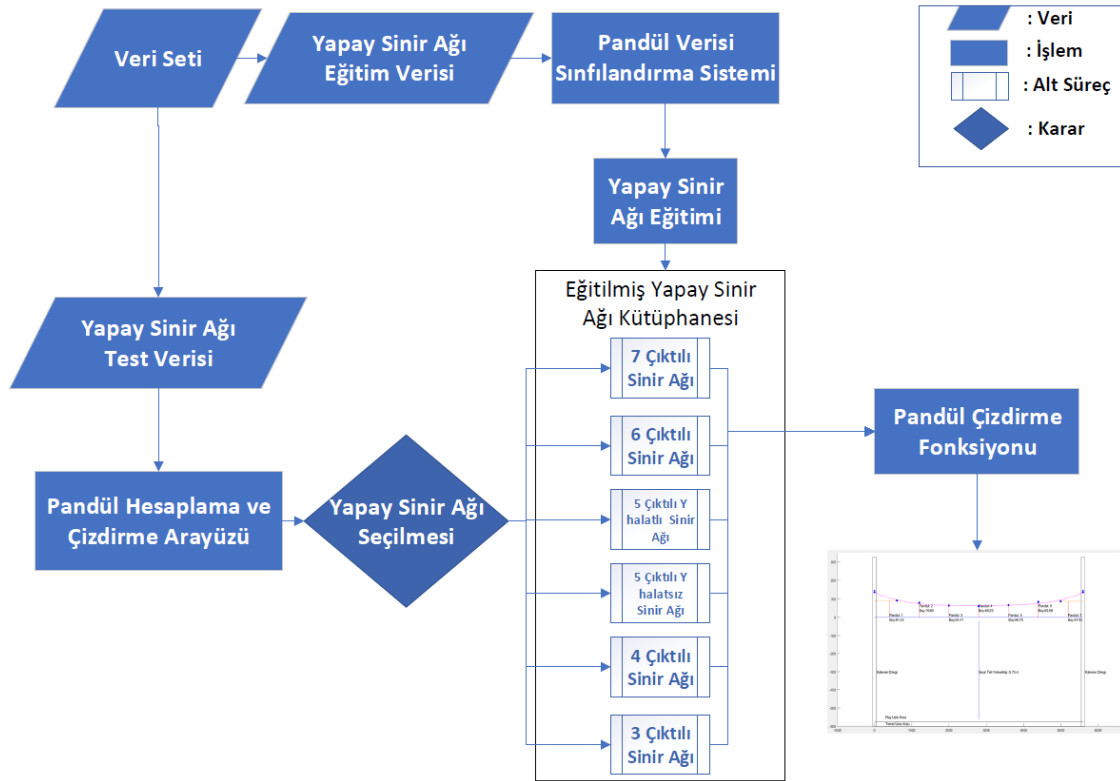
Katener hattı gerginliğinin farklı sıcaklık değerlerinde aynı kalmasını sağlayan donanımlara otomatik gergi cihazı denir. Katener sisteminin tasarımına bağlı olarak sadece seyir teli tek OGC ile, seyir teli ve portör teli beraber tek OGC ile, seyir teli ve portör teli ayrı ayrı OGC cihazları ile gerdirilirler.

2.9. Etap boyu

Katener hatlarında kullanılan seyir ve portör telleri, taşıma ve montaj kolaylığı kısıtları ile birlikte en temelde, maksimum gerdirmeye uzunluğuna bağlı olarak belirli bir uzunluktan fazla üretilemez ve kullanılamazlar. Katener hatlarının projelendirme ve montajında, bu kısıtlar ve proje teknik şartlarına bağlı olarak kesinti olmaksızın iki sonlandırma noktasında çekilen telin uzunluğuna etap boyu denir.

3. Metot: Yapay Sinir Ağları ile Pandül Sistemi Tasarımı

Bu bölümde, pandül boyu hesaplarının yapay sinir ağları aracılığıyla yapılması anlatılacaktır. Mevcut raylı sistem tesislerine ait bir pandül veri seti ile yapay sinir ağlarının eğitilmesi mantığına dayanarak pandül boylarının gerçeğe yakın şekilde elde edilebileceği gösterilecektir. Bu çalışmada, ilk olarak pandül boylarını etkileyen girdiler belirlenmiştir ve bu girdiler ilgili çıktılarla eşleştirilmiştir. Bu veriler uygun şekillerde ayıklanarak işlenebilir hale getirilmiştir. Sonrasında ayıklanan veriler ile yapay sinir ağları eğitilmiştir. Otomatik pandül çizdirme fonksiyonları oluşturularak elde edilen pandül verilerinin görselleştirilmesi sağlanmıştır. Bu kısımda anlatılacak çalışmalar Şekil 5'te sunulan akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 5. Yapay sinir ağları ile pandül sistemi tasarımı akış şeması

3.1. Veri toplama

Bu proje için, Y halatlı bir katener tesisi projesinden elde edilen pandül verilerinden bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışmada 415 satırlık bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti; pandül boylarını etkileyen 5 girdi ve pandül boylarını içeren 7 çıktı sütunundan oluşmaktadır. Girdiler, pandül boylarını etkileyen faktörlerden olan, dezeksman, portör teli yüksekliği, seyir teli yüksekliği, açıklık ve sistem yükseklikleridir. Çıktı olarak ise pandül boyları bulunmaktadır. İlgili girdi değerlerine göre çıktı adetleri değişkenlik göstermektedir. Veri seti örneği Tablo 2'de gösterilmiştir. Her satırdaki pandül çıktıları soldan sağa doğru iki destek noktası arasındaki pandülleri temsil etmektedir.

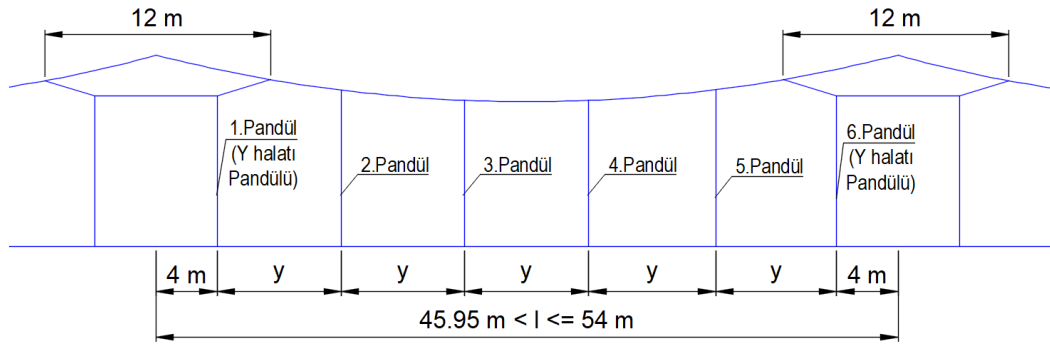
Tablo 2. Pandül veri seti örneği

GİRDİLER					ÇIKTILAR						
Dezeksman (cm)	Portör Teli Yüks. (cm)	Seyir Teli Yüks. (cm)	Açıklık (cm)	Sistem Yüksekliği (cm)	1.Pandül Uzunluğu (cm)	2.Pandül Uzunluğu (cm)	3.Pandül Uzunluğu (cm)	4.Pandül Uzunluğu (cm)	5.Pandül Uzunluğu (cm)	6.Pandül Uzunluğu (cm)	7.Pandül Uzunluğu (cm)
20	715	575	5997	140	89.70	74.70	56.40	50	55.70	73.30	87.70
-20	715	575	5399	140	92.90	79.70	66.30	66.40	80.10	92.70	NaN
-20	715	575	5006	140	92.80	83	70.40	70	83.10	93.70	NaN
-5	715	575	4900	140	95.80	87.70	77.10	77	87.50	95.30	NaN
-20	715	575	3500	140	119	105,9	105,9	119	NaN	NaN	NaN
-20	740	600	2545	140	126.90	123.40	125.10	NaN	NaN	NaN	NaN

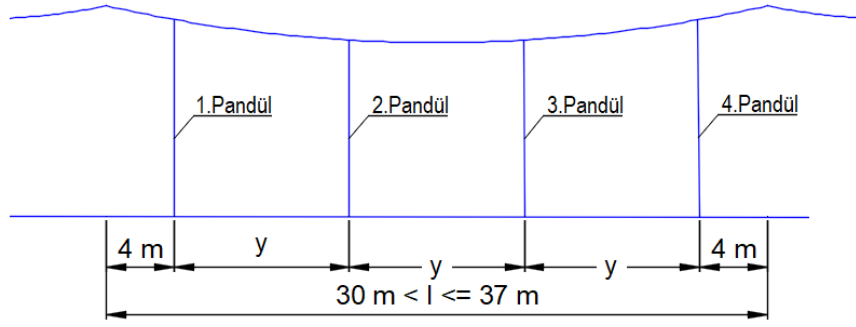
Veri setinde dezeksman, katener hattının yol ekseninden yatay doğrultudaki farkının cm cinsinden değeridir. Portör Teli Yüksekliği, portör telinin ray seviyesinden cm cinsinden yüksekliğidir. Seyir Teli Yüksekliği, seyir telinin ray seviyesinden cm cinsinden yüksekliğidir. Açıklık, iki katener destek noktası arasındaki mesafenin cm cinsinden değeri. Sistem Yüksekliği ise, seyir teli ile portör teli eksenleri arasındaki yüksekliğin cm cinsinden değeridir.

3.2. Verilerin gruplanması ve pandül konumları kuralları

Eğitilen bir yapay sinir ağının başka bir veri üzerinde test edilmesi veya çıktı üretmek üzere kullanılabilmesi için test verisinin hem girdi hem de çıktı sütun sayılarının eğitim verisi ile aynı olması gerekmektedir. Pandül verisinde, her veri satırının girdi sayısı sabit olarak 5 adettir. Fakat çıktı sayıları çeşitli durumlara ve kurallara göre değişmektedir. Bu sebeple bu denkleştirmenin sağlanabilmesi için, veriler bir sınıflandırma prensibi ile alt gruplara ayrılmıştır. Prensip olarak iki destek noktası arasındaki ilk ve son pandüller destek noktasının 4 m yakınına konulacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca şekillerde gösterilen ardı sıra gelen pandül arası mesafeler de maksimum 9,5 m olarak belirlenmiştir. Bu prensiplere göre; 7 çıktılı, 6 çıktılı, Y halatlı 5 çıktılı, Y halatsız 5 çıktılı, 4 çıktılı ve 3 çıktılı olarak pandül verileri gruplara ayrılmıştır. Şekil 6'da örnek olarak, 6 çıktılı pandül etabı ve Şekil 7'de örnek olarak, 4 çıktılı pandül etabı gösterilmiştir.



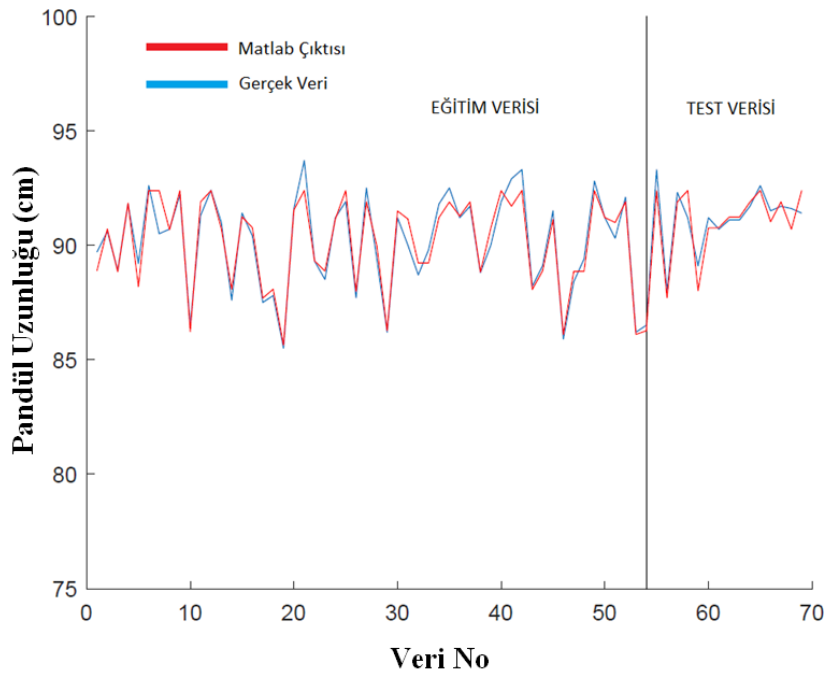
Şekil 6. Pandül etap prensibi - 6 çıktılı pandül etap prensibi



Şekil 7. Pandül etap prensibi - 4 çıkıtlı pandül etap prensibi

3.3. Yapay sinir ağlarının eğitilmesi

Matlab® yazılımı ile, oluşturulan alt veri grupları için ayrı ayrı yapay sinir ağı eğitilmiştir. Veriler eğitilirken her bir alt veri grubu için verilerin %90'ı eğitim için %10'u ise test için ayrılmıştır. Şekil 8'de bu eğitim ve test işlemi, 7 açıklıklı pandül sisteminin ilk çıktısı için gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere yapay sinir ağı çıktısı ile gerçek veriler ufak sapmalar ile büyük ölçüde örtüşmektedir.



Şekil 8. 7 çıkıtlı 1.pandül boyu uzunluğu kestirimi

3.4. Yapay sinir ağlarının hata oranları

Bu çalışmada Monte Carlo Çapraz doğrulama [12] yöntemi kullanılarak her bir yapay sinir ağı 100 iterasyon ile çalıştırılıp her seferinde gerçek değerler ile karşılaştırılarak, her bir pandül veri grubu için ortalama hata değerlerine ulaşılmıştır. Tablo 3'te ise tüm sinir ağları için hata oranı tablosu santimetre cinsinden görülmektedir. Görüldüğü üzere en yüksek ortalama hata 2.2 cm olarak 5 Pandüllü (Y halatlı) 2.Pandülde görülmektedir.

Tablo 3. Pandül uzunluğu ortalama tahmin hatası

	1.Pandül Hata Oranı(cm)	2.Pandül Hata Oranı(cm)	3.Pandül Hata Oranı(cm)	4.Pandül Hata Oranı(cm)	5.Pandül Hata Oranı(cm)	6.Pandül Hata Oranı(cm)	7.Pandül Hata Oranı(cm)
7 Pandüllü (Y halatlı)	0.5781	0.4620	0.5721	0.5600	1.2006	0.7331	0.8756
6 Pandüllü (Y halatlı)	0.5353	0.4494	0.2555	0.3552	0.6127	0.8082	X
5 Pandüllü (Y halatlı)	1.2736	2.2218	2.0962	0.9582	1.1100	X	X
5 Pandüllü (Y halatsız)	2.0373	1.5483	1.1019	1.2619	0.8883	X	X
4 Pandüllü (Y halatsız)	0.9084	0.9841	1.3993	1.2111	X	X	X
3 Pandüllü (Y halatsız)	1.9390	2.0699	1.3405	X	X	X	X

3.5. Pandül çizdirme sistemi

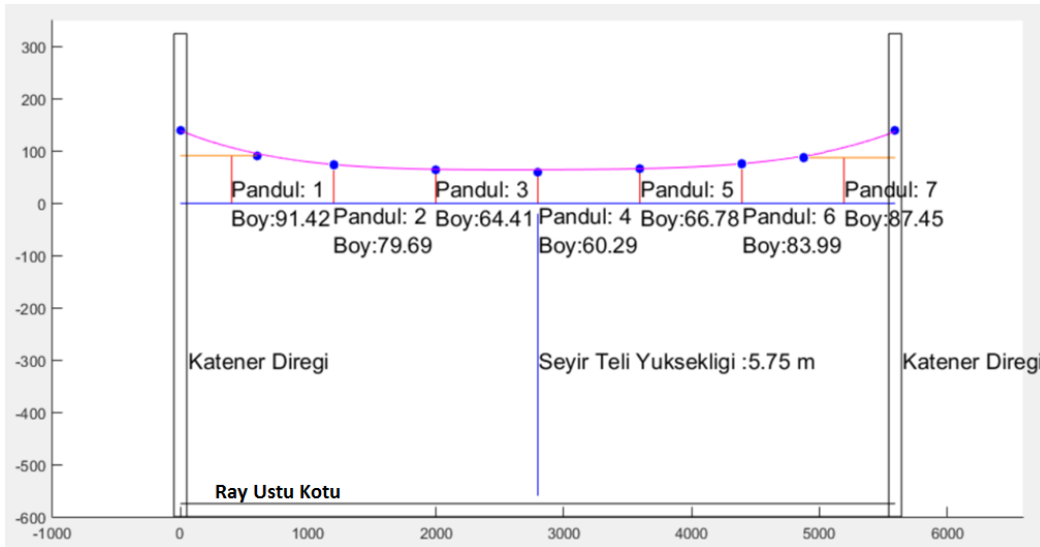
Tüm girdi ve çıktı değerlerine ek olarak pandül lokasyonları da bilindiğinde 2 direk arasındaki pandüllerin çizdirilmesi mümkün olmaktadır. Pandüllerin çizdirilmesi ve görsel kontrolü pandüllerdeki olası hataların fark edilmesi açısından önemli olabilmektedir. Dolayısıyla her pandül alt grupları için pandülleri çizdiren fonksiyonlar oluşturulmuştur. Pandül lokasyonları, veri setinin parçası olmadıklarından oluşturulan fonksiyonlara 2 direk arası açıklık bilgisiyle ile pandül lokasyonlarının da hesaplandığı kısımlar eklenmiştir. Bu kısımlar eklendikten sonra girdi ve çıktı değerleriyle birlikte pandül çizdirme fonksiyonları son hallerine getirilmiştir.

3.6. Otomatik pandül hesabı ve arayüz

Son olarak girdi değerlerinin girildiği takdirde pandül lokasyon ve boylarının hesaplanıp çizdirildiği toplu bir sistem tasarlanıp, Şekil 9'da gösterildiği gibi bir arayüzle kullanıcılara sunulmuştur. Bu arayüz Matlab® yazılımı GUI (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü) eklentisiyle tasarlanmıştır.

Kullanıcılar, girdi bilgilerini girip “Bilgileri girip bu butona basınız” butonuna basarak girdi satırını oluşturur. Bu girdi satırının, otomatik olarak hangi veri alt grubuna ait olduğu belirlenerek ve ilgili yapay sinir ağı çalıştırılarak, pandül boyları hesaplanır. Son olarak, bu satırla ilgili olan çizdirme fonksiyonu çalıştırılarak pandül çizimi oluşturulur. Dolayısıyla kullanıcı girdileri girdikten sonra karşısına Şekil 10'daki gibi, girdiği bilgiler için bir pandül etabı çizdirilmiş olur.

Şekil 9. Otomatik pandül hesabı arayüzü



Şekil 10. Pandül etabı çıktısı

4. Değerlendirmeler ve Sonuç

Pandül hesaplama işlemleri, daha önceki çalışmalarda belirtildiği üzere doğrusal olmayan bir denklem sistemidir. Bu sebeple doğrusal olmayan pandül hesapları için sonlu elemanlar yöntemi, Newton-Raphson iterasyonu gibi yöntemlerle sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu noktada, doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yeteneği yüksek olan yapay sinir ağları önemli bir çözüm aracı olarak ortaya çıkmaktadır. Pandül hesaplamalarında, yapay sinir ağları etkin bir şekilde kullanılabilir ve hesap işlemlerinin daha verimli ve etkin hale getirilmesinde yeni bir zemin oluşturabilir.

Bu bakış açısıyla, bu çalışmada önceleri el ile hesaplanan günümüzde ise maliyetli yazılımlarla hesaplanabilen pandül boyu belirlenmesi konusunda, Matlab® yazılımının yapay sinir ağları eklentisi ile yapılan incelemelerde; eğitilen yapay sinir ağı, veri setindeki girdi ve çıktıları öğrendikten sonra beklenen çıktıya oldukça benzer veriler üretebilmiştir. Bu durum; yapay sinir ağlarının, mevcut raylı sistem katener tesislerindeki pandül verilerinin eğitim verisi olarak kullanıldığı uygulamalarda, gelecek pandül hesaplamaları için farklı bir yöntem olarak kullanılabilceğini göstermiştir.

Tablo 3'e bakıldığında, tüm pandül hesaplamaları için ortalama hata oranı 1,07 cm'dir. Bu değer yapay sinir ağları ile, pandül hesabı işleminin ne kadar yüksek doğrulukta yapılabildiğini göstermektedir. En düşük hata oranlarının 0,25 cm olduğu görülmüştür. En yüksek hata oranlarının ise, 2,21 cm olduğu görülmüştür. Bu gruptaki hata oranının yüksek olmasının sebebi veri setindeki 5 çıktılı Y halatlı veri grubuna ait projedeki verilerin azlığından kaynaklanmaktadır. Daha geniş bir veri setiyle daha düşük hata oranının gerçekleştiği diğer gruplarda görülmektedir. Gelecekte daha kalabalık veri setleriyle tahmin doğruluk oranları artırılabilir.

Oluşturulan sistem, daha geniş veri setleriyle geliştirilerek standart Y halatlı demiryolu projelerinde kullanılabilir. Bu sistem mantığının kullanılması, pandül hesaplama işlemlerinin çok hızla ve yüksek doğrulukla yapılması ve işlerin aksamadan proje sahasına tüm tesis için pandül hesaplarının çok kısa sürede otomatik olarak yapılması gibi kolaylıklar sunabilecektir. Gelecek çalışmalar olarak, katener sistemlerinde konsol-hoban takımları boru boyu ölçüleri de benzer mantıkla hat girdilerine göre hesaplanıp, boru boyutları belirlenmektedir. Gelecekte uygun veri setleri oluşturularak konsol-hoban setleri boru boyları belirlenirken de benzer mantık kullanılabilir. Ayrıca, daha çeşitli projelerden daha geniş girdi eklentileriyle güçlendirilen verilerin birleştirilip daha büyük veri setleri oluşturularak ve bu verilerin de gruplandırılıp eğitilmesiyle, her türden standart katener sistemi projesine daha yüksek hassasiyet ile yanıt verecek tek bir uygulama yapılabilir. Proje bazlı daha dar kapsamlı veriler için örneğin yalnızca Y halatsız katener sistemleri için vb. hedef odaklı sistemler oluşturulabilir.

Ülkemizde ve dünyamızda raylı sistemlerle taşımacılık, diğer taşımacılık modellerine önemli bir alternatif olarak gelişimini sürdürmektedir. İletim hatlarıyla donatılan elektrikli taşımacılık da hem çevreci hem de ekonomik çözümler sunabildiğinden yeni tesis edilen projelerin çoğu elektrikli işletme yapılmak üzere tesis edilmekte ve hali hazırda dizel işletmecilik yapılan hatlar da modernize edilerek sinyalizasyon ve elektrifikasyon tesisleri ile donatılmaktadır. Günümüzde -özellikle kent içi demiryolu ulaşımında- farklı enerjilendirme alternatifleri tartışılrsa da katener sistemleri şehirlerarası ulaşımında tek tercihken, şehir içi ulaşımlarda da yüksek oranda tercih edilmektedir. Dolayısıyla katener tesisi tasarımlarındaki akademik çalışmalar da bu yönde artmakta ve yeni bakış açılarıyla gelişmektedir. Bu çalışma da böylelikle bu alandaki kısıtlı olan literatüre diğer pandül hesaplama yöntem ve mantıklarına ek olarak katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışmada aktarılan sistem ve benzeri üretilen sistemler yaygınlaştığı takdirde, ülkemizdeki demiryolu yatırımlarının da hızla arttığı günümüzde, yazılım ithalatının bu alanda azalmasına katkı sağlayabilecektir.

Kaynakça

- [1] Y. H. Cho, "Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 315, no. 3, pp. 433-454, 2008.
- [2] Y. H. Cho, K. Lee, Y. Park, B. Kang, and K. N. Kim, "Influence of contact wire pre-sag on the dynamics of pantograph-railway catenary," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52, no. 11, pp. 1471-1490, 2010.
- [3] S. P. Jung, Y. G. Kim, J. S. Paik, and T. W. Park, "Estimation of Dynamic Contact Force Between a Pantograph and Catenary Using the Finite Element Method," *Journal of computational and nonlinear dynamics*, vol. 7, no. 4, p. 041006, 2012.
- [4] J. H. Lee and T. W. Park, "Development of a three-dimensional catenary model using cable elements based on absolute nodal coordinate formulation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 12, pp. 3933-3941, 2012.

- [5] J. Benet et al., "An advanced 3D-model for the study and simulation of the pantograph catenary system," vol. 36, pp. 138-156, 2013.
- [6] Y. Song, Z. Liu, H. Wang, X. Lu, and J. Zhang, "Nonlinear modelling of high-speed catenary based on analytical expressions of cable and truss elements," *Vehicle System Dynamics*, vol. 53, no. 10, pp. 1455-1479, 2015.
- [7] L. Chen, P. Peng, and F. He, "Fatigue life analysis of dropper used in pantograph-catenary system of high-speed railway," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 5, p. 1687814018776135, 2018.
- [8] G. Karaduman, E. Akın, B. Binay, and M. Dilekli, "Katener Sistemlerindeki İzolatör Kusurlarının Derin Öğrenme ile Tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 16, pp. 185-195., 2022.
- [9] M. Ö. Baştürk et al., "Pantograf Boynuz Hatalarının Derin Öğrenme ve Görüntü İşleme Teknikleri ile Tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 16, pp. 102-115, 2022.
- [10] Ş. Kuşdoğan and Ö. Doğruer, "Demiryolu Elektrifikasyonunda Katener Sistem Tasarımı," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 14, pp. 130-142, 2021.
- [11] P. Tan et al., "Multialgorithm Fusion Image Processing for High Speed Railway Dropper Failure-Defect Detection," *IEEE*, vol. 51, no. 7, pp. 4466 - 4478, 2019.
- [12] R. Fonseca-Delgado and P. Gomez-Gil, "An assessment of ten-fold and Monte Carlo cross validations for time series forecasting," in *International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2013, pp. 215-220.

Özgeçmiş



Seçkin ULUSKAN

Lisans eğitimini Boğaziçi Üniversitesi, yüksek lisans eğitimini The University of Texas at Dallas, doktora eğitimini Anadolu Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Raylı Sistemler Elektrik Elektronik programında çalışmaktadır.

E-Posta: seckinuluskan@eskisehir.edu.tr



Alırıza ATAM

Lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde, yüksek lisans eğitimini Eskişehir Teknik Üniversitesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Yapı Merkezi İnşaat, Ulaşım Sistemleri firmasında elektrifikasyon tasarım mühendisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: alirizaatam@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Seçkin ULUSKAN: Yazma-gözden geçirme, düzenleme, doğrulama, tasarım. Alırıza ATAM: Yazma, görselleştirme, tasarım.