

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEMİRYOLU HATLARINDA YATAR GÖVDELİ TREN UYGULAMASININ HIZ  
VE YOLCULUK SÜRESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ:  
ZONGULDAK-KARABÜK ÖRNEĞİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOĞANCAN DİLEK**

**NİSAN 2021**

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEMİRYOLU HATLARINDA YATAR GÖVDELİ TREN UYGULAMASININ HIZ  
VE YOLCULUK SÜRESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ:  
ZONGULDAK-KARABÜK ÖRNEĞİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Doğancan DİLEK**

**DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TANIŞ**

**ZONGULDAK**

**Nisan 2021**

**KABUL:**

Doğancan DİLEK tarafından hazırlanan “Demiryolu Hatlarında Yatar Gövdeli Tren Uygulamasının Hız ve Yolculuk Süresi Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Zonguldak-Karabük Örneği” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. 27/ 04 /2021

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TANIŞ .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Kemal Selçuk ÖĞÜT .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Doç. Dr. H. Onur TEZCAN .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. ....../....../20....

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Doğancan DİLEK

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **DEMİRYOLU HATLARINDA YATAR GÖVDELİ TREN UYGULAMASININ HIZ VE YOLCULUK SÜRESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: ZONGULDAK-KARABÜK ÖRNEĞİ**

**Doğancan DİLEK**

**Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TANIŞ**

**Nisan 2021, 101 sayfa**

Ülkemizde, 2009 yılında Yüksek Hızlı Tren (YHT) hatlarının işletmeye alınmasıyla birlikte demiryolu ile taşınan toplam yolcu sayısı, 2019 yılı verileri incelendiğinde %207 artmıştır. Ancak diğer pek çok unsurla birlikte, YHT hat uzunluklarının ülke geneline yaygın olmaması ve geleneksel hatlar üzerinde yapılan yolcu taşımacılığında işletme hızlarının düşük oluşu; demiryolunun, yolcu taşımacılığındaki payının sınırlı (%1) kalmasına neden olmaktadır.

Geleneksel hatların ülkemizdeki inşa süreci 19. yüzyıl ortalarına kadar gitmektedir. Geçen zaman içerisinde demiryolu ağına yeni geçkilerin eklenmesi, üstyapının yenilenmesi, bazı hatlarda sinyalizasyon ve elektrifikasyon işlemlerinin tamamlanması, vb. yenilikler yapılmakla birlikte, çoğu hattın geometrisinin yapıldığı yılki özelliklerini koruduğu da bir gerçektir.

## ÖZET (devam ediyor)

Demiryolu hatlarının inşası ve özellikle YHT hattı yatırımları, hem maliyetli olmaları hem de uzun inşa süreleri düşünüldüğünde inşası güç yatırımlardır. Ülkemiz demiryolu şebekesinde bulunan geleneksel hatların yerine YHT hatlarının inşa edilmesi; bütün hatlarda yeterince ulaşım talebinin olmayışı, mali olanakların verimsiz kullanılması, vb. anlamlara gelmesinin yanında; çok fazla bütçe ve zaman isteyen işlerdir. Malî olanakların doğru kullanımı için mevcut hatların iyileştirilmesi ve demiryolu arabalarındaki teknik ilerlemenin ülkemizde işletilen hatlara uygulanması daha doğru bir politika olacaktır.

Dünyada bazı ülkelerde, geleneksel hatların geometrilerinde değişiklik yapılmadan veya çok az değişiklik yapılarak demiryolu işletmesinin yolculuk hızını artırmak amacıyla yatar gövdeli tren teknolojisi kullanılmaktadır. Yatar gövdeli trenler, yatay dönemeçlerden geçerken dönemeç yarıçapına ve dönemeçten geçiş hızına uygun bir açıyla dönemeç merkezine doğru eğilirler. Eğilme, bojinin vagon gövdesine göre yaptığı açısız dönme hareketiyle veya tekerlekten raya gelen kuvvetlerdeki değişimle sağlanır. Bu eğilme yardımıyla yatar gövdeli trenlerde demiryolu arabası ve içerisindekilere etkileyen dengelenmemiş merkezkaç kuvvetinin oluşturduğu konfor ivmesi azalır. Bu özellik ile eksik deyer üst sınırı arttığından, yatay dönemeçlerden geçiş daha az deyer verilerek ve daha yüksek hız ile mümkün olmakta, böylelikle yolculuk süresi azaltılabilmektedir.

Bu çalışmada, Cumhuriyetin ilk yıllarında inşa edilmiş Irmak-Karabük-Zonguldak geleneksel demiryolu hattının Karabük-Zonguldak kısmı üzerinde, yolcu taşımacılığında kullanılan yatar gövdeli tren uygulamasının sağlayacağı yolculuk süresindeki kısalma ve hız artışı incelenmiştir. İncelenen hat kesimi üzerindeki her bir yatay dönemeç için herhangi bir geometrik değişiklik yapılmadan ve yatar gövde teknolojisinin sunduğu olanaklardan yararlanılarak eksik deyer üst sınırı belirlenmiş, buna bağlı olarak geometrinin izin verdiği en büyük hızlar hesaplanmıştır. Hesaplanan hızlar ile mevcut en büyük hızlar karşılaştırılmış ve bulunan sonuçlar değerlendirilmiştir. Beklenildiği gibi yatar gövdeli trenlerin kullanılmasıyla aynı geometri üzerinde normal trenlere göre hızların arttığı görülmüştür. Zonguldak-Karabük demiryolu hattında yatar gövdeli trenler kullanıldığında, ortalama 41 km/sa (%53,4 oranında) hız artışı olduğu gözlemlenmiştir.

## ÖZET (devam ediyor)

Ardından, hat geometrisinin izin verdiği en büyük hızlar, trenin yapacağı hızları tam olarak yansıtmadığından; direnç kuvvetleri etkisi altında, istasyonlar arası tren hareket hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalarla trenlerin hat üzerindeki yapabilecekleri hızlar gerçeğe yakın bir şekilde bulunmaya çalışılmış ve elde edilen sonuçlar, mevcut durumla karşılaştırılarak sunulmuştur. Bu hesaplar sonucunda; yatar gövdeli trenin ağırlıkları eşit ve yolcu kapasiteleri farklı olan normal trene göre hat üzerinde 11 km/sa (%15,6 oranında) daha hızlı olduğu görülmüştür. Yolculuk süresinin de 13 dakika 47 saniye (827 saniye, %13,5 oranında) kısaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yatar gövdeli trenin ağırlıkları farklı ve yolcu kapasiteleri eşit olan normal trene göre hat üzerinde 11,8 km/sa (%16,8 oranında) daha hızlı olduğu ve yolculuk süresinin de 14 dakika 51 saniye (891 saniye, %14,4 oranında) kısaldığı görülmüştür.

Demiryolu taşımacılığının diğer ulaştırma türleri içerisindeki payının artırılabilmesi için yolculuk sürelerinin kısaltılması gerektiği açıktır. Yatar gövdeli tren işletmeciliği ile mevcut demiryolu hatlarında hızların artırılabilmesi, böylelikle demiryolu taşımacılığının rekabet gücünün iyileştirileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Zonguldak, Demiryolu, Yatar Gövdeli Tren, Merkezkaç Kuvveti, Dever, Eksik Dever, Konfor İvmesi

**Bilim Kodu:** 624.04.02



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **EVALUATION OF THE EFFECTS OF TILTING BODY TRAIN IN RAILWAY LINES ON SPEED AND TRAVEL TIME: THE CASE OF ZONGULDAK-KARABÜK**

**Doğancan DİLEK**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Mustafa TANIŞ**

**April 2021, 101 pages**

In Turkey, with the construction of High Speed Train (HST) lines in 2009, the total number of passengers transported by rail has increased by 207% when the data of 2019 are examined. However, both the low total length of HST lines and various operational deficiencies (e.g., operating speeds, etc) of the conventional lines, cause the share of railway in passenger transportation to be limited (1%).

The construction process of traditional railway lines in our country has started at the middle of the 19th century. Over time, even though changes such as adding new lines to the railway network, renovation of the superstructure, completion of signaling and electrification processes in some lines, etc. have been made, it is a fact that the geometry of most lines did not change since they were constructed.

## **ABSTRACT (continued)**

The construction of railway lines and especially investments of HST line are difficult, considering both their cost and long construction periods. Constructing HST lines instead of traditional lines in our country's railway network has a lot of obstacles including; lack of sufficient transport demand, inefficient use of financial means, etc. Moreover; construction of such lines requires a lot of budget and time. To use financial opportunities correctly, it would be a more logic policy to improve the existing lines and apply the technical progress in railway cars to the lines operated in our country.

In some countries, tilting body train technology is used in order to increase the travel speed of the railway enterprise with little or no change in the geometry of traditional lines. When tilting body trains pass through horizontal curves, they bend towards the center of the curve at an angle appropriate radius of the curve and the speed of transition from curve. Bending is provided by the angular rotational movement of the bogie relative to the wagon body or by the change of forces from the wheel to the rail. The comfort acceleration created by the unbalanced centrifugal force acting on the rail car and its contents decreases with the help of bending in the tilting body trains. By this bending as, since the upper limit of the cant deficiency increases, the transition from horizontal curves is possible with less cant and higher speed, thus the travel time can be reduced.

In this study, the decrease of the travel time and the increase of speed that will be provided by the tilting body train application used in passenger transportation on the Karabük-Zonguldak part of the Irmak-Karabük-Zonguldak traditional railway track, which was built in the first years of the Turkish Republic, was examined. For each horizontal curve on the studied line section, the cant deficiency upper limit was determined without making any geometric changes and by using the opportunities offered by the tilting body technology, and accordingly, the maximum speeds allowed by the geometry were calculated. Calculated present operating speeds were compared and evaluated. As expected, it is determined that with the use of tilting body trains, the speeds increased compared to normal trains on the same geometry. When tilting body trains were used on the Zonguldak-Karabük railway track, an average speed increase of 41 km/h (53.4%) was observed.

## **ABSTRACT (continued)**

As a further calculation, movement of the train was analyzed by considering the resistance forces. The main reason behind performing this calculation is because the maximum speeds allowed by the track geometry do not exactly reflect the speeds that the train would do on the track. With these calculations, the speeds that the trains can make on the track were found as close to the real ones and the results obtained were presented by comparing them with the present situation. As a result of these calculations, it has been observed that tilting body train are 11 km/h (15.6%) faster on the track than normal train with equal weights and different passenger capacities. It was concluded that the travel time was shortened by 13 minutes 47 seconds (827 seconds, by 13.5%). The tilting train is 11.8 km/h (16.8%) faster on the track than the normal train with different weights and equal passenger capacities, and the travel time is shortened by 14 minutes 51 seconds (891 seconds, 14.4%). has been seen.

It is clear that in order to increase the share of rail transport, travel times should be shortened. It is thought that the speed of the existing railway lines can be increased with the tilting body train operations, thus improving the competitiveness of the railway transportation.

**Keywords:** Zonguldak, Railway, Tilting Body Train, Centrifugal Force, Cant, Cant Deficiency, Comfort Acceleration

**Science Code:** 624.04.02



## TEŞEKKÜR

Hem lisans, hem yüksek lisans öğretimim boyunca, hem de iş ve özel hayatımda bana daima yol gösteren, anlayışını ve emeğini benden esirgemeyen, büyük bir sabır ve özenle yardımcı olan, sevgili hocam, tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TANIŞ'a, jüri heyetinde bulunan Prof. Dr. Kemal Selçuk ÖĞÜT ve Doç. Dr. Hüseyin Onur TEZCAN'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, bana karşı gösterdikleri sevgi, sabır, anlayış ve sağlamış oldukları maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme, her zaman yanımda olan meslektaşım, değerli eşim Cemre Dilara DİLEK'e ve dostlarıma teşekkür ediyorum.



## İÇİNDEKİLER

|                                                 | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------|--------------|
| KABUL .....                                     | ii           |
| ÖZET .....                                      | iii          |
| ABSTRACT .....                                  | vii          |
| TEŞEKKÜR .....                                  | xi           |
| İÇİNDEKİLER.....                                | xiii         |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                            | xix          |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                         | xxi          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....             | xxiii        |
| <br>                                            |              |
| BÖLÜM 1 GİRİŞ .....                             | 1            |
| <br>                                            |              |
| 1.1 KONU.....                                   | 2            |
| <br>                                            |              |
| 1.2 AMAÇ .....                                  | 3            |
| <br>                                            |              |
| 1.3 YÖNTEM .....                                | 3            |
| <br>                                            |              |
| BÖLÜM 2 DEMİRYOLUNA AİT TANIMLAR.....           | 5            |
| <br>                                            |              |
| 2.1 DEMİRYOLLARININ GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ ..... | 5            |
| <br>                                            |              |
| 2.1.1 Hat Açıklığı (Ekartman) .....             | 5            |
| <br>                                            |              |
| 2.1.2 Yatay Geometri.....                       | 6            |
| <br>                                            |              |
| 2.1.2.1 Yatay Dönemeç .....                     | 6            |
| <br>                                            |              |
| 2.1.2.2 Dever .....                             | 7            |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|                                                                                              | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| a. Deverin Sınırlandırılması.....                                                            | 8            |
| 2.1.3 Geçiş Eğrisi ve Dever Rampası .....                                                    | 8            |
| 2.1.4 Düşey Geometri .....                                                                   | 10           |
| 2.1.4.1 Eğimler .....                                                                        | 10           |
| 2.1.5 Enkesite İlişkin Özellikler.....                                                       | 10           |
| 2.1.5.1 Gabari .....                                                                         | 11           |
| 2.2 DEMİRYOLU HATTI VE TAŞIT İLİŞKİSİ .....                                                  | 13           |
| 2.2.1 Yatay Dönemeçte Taşıta Etkiyen Kuvvetler.....                                          | 13           |
| 2.2.2 Proje Tasarım Hızı, Denge (Teorik) ve Uygulanan Dever .....                            | 15           |
| 2.2.3 Eksik ve Fazla Dever .....                                                             | 16           |
| 2.2.4 Uygulanan Deverin Zamana Bağlı Değişimi .....                                          | 18           |
| 2.2.5 Eksik Deverin Zamana Bağlı Değişimi .....                                              | 19           |
| 2.3 DEMİRYOLUNDA DİRENÇLER .....                                                             | 20           |
| 2.3.1 Doğru ve Düzlükteki Direnç .....                                                       | 21           |
| 2.3.1.1 Demiryolu Kuruluşlarının Doğru ve Düzlükteki Direnç İçin Kullandığı Bağlıntılar..... | 23           |
| a. Fransız Demiryollarının (SNCF) Kullandığı Bağlıntılar .....                               | 23           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|                                                              | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------|--------------|
| b. ABD Demiryollarının Kullandığı Bağlantılar .....          | 25           |
| c. Alman Demiryollarının Kullandığı Bağlantılar.....         | 27           |
| 2.3.2 Tünel Direnci .....                                    | 27           |
| 2.3.2.1 Tünellerde Aerodinamik (Hava) Direncin Artması ..... | 28           |
| 2.3.3 Yatay Dönemeç Direnci.....                             | 29           |
| 2.3.4 Eğim Direnci .....                                     | 30           |
| 2.3.5 Toplam Direncin Bulunması.....                         | 31           |
| 2.4 TRENLERİN HAREKETİ .....                                 | 31           |
| 2.4.1 Başlangıç ve Çekim Kuvvetleri .....                    | 31           |
| 2.4.2 Aderans Kuvvetleri .....                               | 34           |
| 2.4.3 Hareket İçin Gerekli Tren Gücü .....                   | 37           |
| 2.4.4 Trenlerin Hızlanma ve Yavaşlama İvmeleri .....         | 38           |
| 2.4.5 Trenlerde Frenleme .....                               | 39           |
| 2.4.5.1 Fren Sistemleri .....                                | 39           |
| 2.4.5.2 Trenlerde Fren Uzunluğu .....                        | 39           |
| 2.4.6 Trenlerin Genel Hareket Denklemi.....                  | 42           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|                                                                                             | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 2.4.7 Tren Hareket Evreleri .....                                                           | 45           |
| 2.4.7.1 Hızlanma (Demeraj) Evresi.....                                                      | 45           |
| 2.4.7.2 Sabit Hız (Rejim) Evresi .....                                                      | 46           |
| 2.4.7.3 Frenleme Evresi.....                                                                | 46           |
| BÖLÜM 3 YATAR GÖVDELİ TRENLER .....                                                         | 47           |
| 3.1 YATAR GÖVDELİ TREN TEKNOLOJİSİ .....                                                    | 48           |
| 3.1.1 Yatar Gövdeli Trenlerin Eğilme Sistemleri .....                                       | 52           |
| 3.1.1.1 Pasif Eğilme Sistemi .....                                                          | 52           |
| 3.1.1.2 Aktif Eğilme Sistemi .....                                                          | 52           |
| 3.2 YATAR GÖVDELİ TRENLERİN GELİŞİM SÜREÇLERİ VE DÜNYADA KULLANIMLARI.....                  | 55           |
| 3.3 YATAR GÖVDELİ TRENLERİN MEVCUT HATLARDA İŞLETİLMESİ .....                               | 59           |
| BÖLÜM 4 KARABÜK-ZONGULDAK HATTI ÜZERİNDE YATAR GÖVDELİ TREN UYGULAMASININ İNCELENMESİ ..... | 63           |
| 4.1 KARABÜK-ZONGULDAK HATTI .....                                                           | 63           |
| 4.2 KARABÜK-ZONGULDAK DEMİRYOLU HATTI ÜZERİNDE YATAR GÖVDELİ TRENLERİN KULLANIMI .....      | 67           |
| 4.2.1 Hattın Yatay Geometrisinin İzin Verdiği En Büyük Hız.....                             | 68           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|                                                                           | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.2.2 Taşıta Etkiyen Dirençler Altında Yolculuk Hızlarının Bulunması..... | 74           |
| BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                         | 93           |
| KAYNAKLAR.....                                                            | 99           |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                            | 101          |





## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>No</u>                                                                                                                                   | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 1.1 Zonguldak- Karabük demiryolu hattı.....                                                                                           | 3            |
| Şekil 2.1 Hat açıklığının gösterimi.....                                                                                                    | 5            |
| Şekil 2.2 Dünyada kullanılan hat açıklıkları. ....                                                                                          | 6            |
| Şekil 2.3 Demiryollarında yatay dönemecin gösterimi. ....                                                                                   | 7            |
| Şekil 2.4 Dever (D) ve yatay düzlem arasında oluşan açı.....                                                                                | 7            |
| Şekil 2.5 Dış rayın dönemeç başında aniden dever kadar yükseltilmesi.....                                                                   | 9            |
| Şekil 2.6 Bir yatay dönemeç üzerinde deverin ve eğrilik değişiminin diyagramı. ....                                                         | 9            |
| Şekil 2.7 TCDD genel taşıt ve serbest alan gabarisi. ....                                                                                   | 12           |
| Şekil 2.8 Taşıta etkiyen yanal ivme ve kuvvetlerin diyagramı. ....                                                                          | 13           |
| Şekil 2.9 Hızın bir fonksiyonu olarak hava (aerodinamik) direnci ve mekanik direnç. ....                                                    | 22           |
| Şekil 2.10 Hızın bir fonksiyonu olarak toplam hareket direnci ve gerekli çekim gücü (Eğimsiz bir hat üzerinde, Fransız TGV treni için)..... | 23           |
| Şekil 2.11 Farklı taşıt tiplerine göre Amerikan Demiryollarında doğru ve düzlükteki özgül dirençler. ....                                   | 26           |
| Şekil 2.12 Eğimli bir hatta taşıta etkiyen kuvvetler ve eğim direnci. ....                                                                  | 30           |
| Şekil 2.13 Dizel çekimli bir trenin çekim kuvveti-hız grafiği.....                                                                          | 32           |
| Şekil 2.14 Elektrik çekimli bir trenin çekim kuvveti-hız grafiği. ....                                                                      | 32           |
| Şekil 2.15 Boyuna eğime göre özgül çekim kuvveti.....                                                                                       | 33           |
| Şekil 2.16 Tekerlekte oluşan kuvvet çifti.....                                                                                              | 34           |
| Şekil 2.17 Tekerlek-ray teması ve aderans kuvveti.....                                                                                      | 35           |
| Şekil 2.18 Aderans katsayısının farklı koşullarda hıza bağlı değişimi.....                                                                  | 36           |
| Şekil 2.19 Tekerlek üzerindeki hızlar ve kuvvetler.....                                                                                     | 37           |
| Şekil 2.20 Orta ve düşük hızlarda, eğimsiz bir hatta hıza göre fren uzunluğu.....                                                           | 41           |
| Şekil 2.21 Demiryolu katarının bir eksen boyunca hareketi. ....                                                                             | 42           |
| Şekil 2.22 Trenin hareket evreleri. ....                                                                                                    | 45           |
| Şekil 3.1 Yatar gövdeli olmayan trenler (a) ile yatar gövdeli trenlere (b) yatay dönemeç üzerinde etkiyen kuvvetler.....                    | 48           |
| Şekil 3.2 Normal bir trene yatay dönemeçten geçerken etkiyen ivme ve hızlar. ....                                                           | 51           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| <u>No</u>                                                                                                                                        | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 3.3 Yatar gövdeli bir trene yatay dönemeçten geçerken etkiyen ivme ve hızlar. ....                                                         | 51           |
| Şekil 3.4 Avrupa ve Japon tekniği olmak üzere iki farklı aktif eğilme teknolojisi. ....                                                          | 53           |
| Şekil 3.5 Eğilme sistemi, eğilme teknikleri ve geliştirilen teknolojiler. ....                                                                   | 54           |
| Şekil 3.6 İtalyan Demiryollarına ait bir ETR401 yatar gövdeli treni. ....                                                                        | 56           |
| Şekil 3.7 Japon üretimi KiHa 283 serisi bir yatar gövdeli DMU. ....                                                                              | 58           |
| Şekil 3.8 İngiliz Demiryollarına ait bir yatar gövdeli EMU. ....                                                                                 | 58           |
| Şekil 4.1 Karabük'ün kuzeyindeki Araç çayı üzerinde 1934 yılında inşası devam eden bir köprü. ....                                               | 64           |
| Şekil 4.2 Irmak-Karabük-Zonguldak demiryolu hattı. ....                                                                                          | 65           |
| Şekil 4.3 Yatay dönemeç yarıçaplarının dağılımı. ....                                                                                            | 66           |
| Şekil 4.4 Hat üzerindeki dönemeçlerin uygulama deveri durumları. ....                                                                            | 66           |
| Şekil 4.5 Hesaplamalar için kurgulanan tren hareket evreleri. ....                                                                               | 75           |
| Şekil 4.6 DE 3300 dizel elektrikli lokomotif için çekim kuvveti-hız grafiği. ....                                                                | 78           |
| Şekil 4.7 Talgo XXI elektrikli yatar gövdeli tren setine ait çekim kuvveti-hız grafiği. ....                                                     | 78           |
| Şekil 4.8 İstasyonlar arasında demeraj, rejim ve frenleme evrelerinin durumu. ....                                                               | 91           |
| Şekil 5.1 Yatar gövdeli tren için hesaplanan hızların, mevcut en büyük hızlara göre artış yüzdesi. ....                                          | 94           |
| Şekil 5.2 Normal trenler ve yatar gövdeli trenin ortalama hızlarının karşılaştırılması. ....                                                     | 95           |
| Şekil 5.3 1. normal tren ve yatar gövdeli trenler arasında ortaya çıkan hız artışı ve yolculuk süresinin yüzde cinsinden karşılaştırılması. .... | 96           |
| Şekil 5.4 2. normal tren ve yatar gövdeli trenler arasında ortaya çıkan hız artışı ve yolculuk süresinin yüzde cinsinden karşılaştırılması. .... | 97           |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>No</u>                                                                                                                                                            | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 2.1 EN 13803'e göre dever rampası ( $dD/ds$ ) eğim sınırları. ....                                                                                           | 10           |
| Çizelge 2.2 EN 13803'e göre eksik dever sınırları. ....                                                                                                              | 17           |
| Çizelge 2.3 EN 13803'e göre fazla dever sınırları. ....                                                                                                              | 17           |
| Çizelge 2.4 EN 13803'e göre deverin zamana bağlı değişim sınırları. ....                                                                                             | 18           |
| Çizelge 2.5 EN 13803'e göre eksik deverin zamana bağlı değişim sınırları. ....                                                                                       | 19           |
| Çizelge 2.6 Yan açıklıkları olan ve olmayan tünellerde, 705 ton ağırlığındaki bir tren için karşılaştırmalı olarak toplam hareket dirençleri ve gereken güçler. .... | 28           |
| Çizelge 2.7 Aderans katsayısı için en küçük değerler. ....                                                                                                           | 36           |
| Çizelge 2.8 Farklı tipte, frenleme durumları ve demiryolu taşıtları için fren yüzdesi ( $\lambda_f$ ). ....                                                          | 40           |
| Çizelge 2.9 Yüksek hızlarda fren uzunlukları. ....                                                                                                                   | 42           |
| Çizelge 3.1 Bir yatay dönemeçte, yatar gövdeli trenler için hesaplanmış bazı değerler. ....                                                                          | 49           |
| Çizelge 3.2 Yatar gövdeli trenlerin gelişimi ve kullanımı. ....                                                                                                      | 56           |
| Çizelge 3.3 Normal trenlere göre yatar gövdeli trenlerin geçiş eğrisi ve dönemeç olan kısımlarda yolculuk süresini kısaltması. ....                                  | 60           |
| Çizelge 3.4 İtalya'da bazı hatlarda yatar gövdeli trenlerin kullanılmasıyla elde edilen hız artışı ve zaman kazançları. ....                                         | 60           |
| Çizelge 4.1 Hat üzerindeki bir yatay dönemecin geometrik bilgileri. ....                                                                                             | 69           |
| Çizelge 4.2 Çizelge 4.1'deki dönemeç için yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan yeni değerler. ....                                                            | 69           |
| Çizelge 4.3 Zonguldak-Karabük arasındaki TCDD'nin mevcut en büyük hızlar ile yatar gövdeli tren kullanımında oluşacak yeni hızların karşılaştırılması. ....          | 72           |
| Çizelge 4.4 Hesaplamalarda kullanılan trenler ve özellikleri. ....                                                                                                   | 77           |
| Çizelge 4.5 1. normal trene ait örnek hesap tablosu. ....                                                                                                            | 80           |
| Çizelge 4.6 Yatar gövdeli trene ait örnek hesap tablosu. ....                                                                                                        | 80           |
| Çizelge 4.7 1. normal tren ve yatar gövdeli tren için yapılan hesaplamalara ait özet ve sonuçlar. ....                                                               | 87           |
| Çizelge 4.8 2. normal tren ve yatar gövdeli tren için yapılan hesaplamalara ait özet ve sonuçlar. ....                                                               | 88           |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $e$         | : Hat açıklığı, Ekartman                                                 |
| $R$         | : Yatay dönemeç yarıçapı                                                 |
| $D$         | : Dever                                                                  |
| $L_D$       | : Geçiş eğrisi boyu                                                      |
| $dD/ds$     | : Dever rampası değişim oranı                                            |
| $V$         | : Hız (km/sa)                                                            |
| $a_y$       | : Yanal İvme                                                             |
| $a_z$       | : Düşey İvme                                                             |
| $g$         | : Yerçekimi ivmesi                                                       |
| $\varphi_t$ | : Dever açısı                                                            |
| $\Phi$      | : Yanal kuvvet açısı                                                     |
| $D_{EQ}$    | : Denge (Teorik) deveri                                                  |
| $I$         | : Eksik dever                                                            |
| $E$         | : Fazla dever                                                            |
| $dD/dt$     | : Deverin zamana bağlı değişimi                                          |
| $dI/dt$     | : Eksik deverin zamana bağlı değişimi                                    |
| $R_L$       | : Doğru ve düzlükteki direnç                                             |
| $R_t$       | : Tünel direnci                                                          |
| $R_c$       | : Yatay dönemeç direnci                                                  |
| $R_g$       | : Eğim direnci                                                           |
| $R_{Tot}$   | : Toplam direnç                                                          |
| $\lambda$   | : Demiryolu taşıtının özelliklerine bağlı değişen bir parametre          |
| $M$         | : Trenin toplam ağırlığı                                                 |
| $m$         | : Dingil başına düşen yük                                                |
| $k_1$       | : Trenin ön ve arka yüzeyinin şekline bağlı bir parametre                |
| $S$         | : Tren ön yüzeyinin kesit alanı                                          |
| $k_2$       | : Trenin yan yüzlerine bağlı olan ve pürüzlülükle ilişkili bir parametre |
| $p$         | : Demiryolu taşıtının ray seviyesine kadar olan kısmi çevresi            |
| $L$         | : Trenin boyu                                                            |
| $M_L$       | : Lokomotifin ağırlığı                                                   |
| $n$         | : Lokomotifin dingil sayısı                                              |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|             |                                                                                                                |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $r$         | : Özgöl direnç                                                                                                 |
| $M_{ET}$    | : Elektrikli yolcu treninin toplam ağırlığı                                                                    |
| $N$         | : Hareket halindeyken trenden yükseltilecek pantograf sayısı                                                   |
| $C$         | : Hava direnci katsayısı                                                                                       |
| $t_s$       | : Kısa ton                                                                                                     |
| $k$         | : Karışık ve blok yük trenleri ile ilgili bir katsayı                                                          |
| $V_{ör}$    | : Trene önden harekete zıt yönde etkiyen rüzgar hızı                                                           |
| $a$         | : Makaralı rulman için bir katsayı                                                                             |
| $F_e$       | : Trenin ön yüzey alanı özellikleriyle ilgili katsayı                                                          |
| $n_w$       | : Vagon sayısı                                                                                                 |
| $r_c$       | : Yatay dönemeç özgöl direnimi                                                                                 |
| $k_c$       | : Yatay dönemeç direnç katsayısı                                                                               |
| $\omega$    | : Boyuna eğim açısı                                                                                            |
| $i$         | : Hattın boyuna eğimi                                                                                          |
| $\alpha$    | : Taşıtın ivmesi                                                                                               |
| $q$         | : Şaftlar, elektrik motorları gibi taşıtın hem sabit hem de hareketli kütlelerini hesaba katan kütle katsayısı |
| $M_{har}$   | : Trende hareketli kütle toplamı                                                                               |
| $r_L$       | : Doğru ve düzlükteki özgöl direnç                                                                             |
| $r_t$       | : Tünel özgöl direnci                                                                                          |
| $r_g$       | : Eğim özgöl direnci                                                                                           |
| $r_{Tot}$   | : Toplam özgöl direnç                                                                                          |
| $Z_{baş}$   | : Başlangıç çekim kuvveti                                                                                      |
| $Z$         | : Çekim kuvveti                                                                                                |
| $z$         | : Özgöl çekim kuvveti                                                                                          |
| $V_g$       | : Geçiş hızı                                                                                                   |
| $Z_b$       | : Bandaj çekim kuvveti                                                                                         |
| $Z_a$       | : Aderans çekim kuvveti                                                                                        |
| $\mu$       | : Aderans katsayısı                                                                                            |
| $V_{çev}$   | : Çevresel hız                                                                                                 |
| $V_{öte}$   | : Ötelenme hızı                                                                                                |
| $r$         | : Dönme yarıçapı                                                                                               |
| $n_d$       | : Devir sayısı                                                                                                 |
| $N$         | : Güç                                                                                                          |
| $L_f$       | : Fren uzunluğu                                                                                                |
| $\varphi_f$ | : Boyuna eğime bağlı bir sürtünme katsayısı                                                                    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|             |                                          |
|-------------|------------------------------------------|
| $\lambda_f$ | : Frenleme yüzdesi                       |
| $a_f$       | : Frenleme (yavaşlama) ivmesi            |
| $\Psi$      | : Fren tipine göre değişen bir parametre |
| $F_x$       | : Normal kuvvet                          |
| $F_y$       | : Teğet kuvvet                           |
| $F_z$       | : Düşey kuvvet                           |
| $v$         | : Hız (m/sn)                             |
| $\Delta v$  | : Hız farkı                              |
| $\Delta t$  | : Zaman farkı                            |
| $M_{dur}$   | : Trenin durağan kütlesi                 |
| $\xi$       | : Kütle artış katsayısı                  |
| $V_{ort}$   | : Ortalama hız                           |
| $F_f$       | : Frenleme kuvveti                       |
| $\phi_c$    | : Gövde eğilme açısı                     |
| $Z_m$       | : Motor çekim kuvveti                    |

## KISALTMALAR

|     |                                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|
| AB  | : Avrupa Birliği                                                        |
| ABD | : Amerika Birleşik Devletleri                                           |
| BB  | : Buhar beygiri                                                         |
| BR  | : British Rail - İngiliz Demiryolları                                   |
| CEN | : European Committee for Standardisation - Avrupa Standartları Komitesi |
| daN | : Dekanewton                                                            |
| DB  | : Deutsche Bahn: Almanya Demiryolları                                   |
| DE  | : Dizel Elektrik                                                        |
| DMU | : Diesel Multiple Units – Dizel Tren Seti                               |
| EMU | : Electric Multiple Unit – Elektrikli Tren Seti                         |
| EN  | : European Norm - Avrupa Standartları                                   |
| ft  | : Feet                                                                  |
| kg  | : kilogram                                                              |
| km  | : Kilometre                                                             |
| kW  | : Kilowatt                                                              |
| lb  | : Libre                                                                 |
| m   | : Metre                                                                 |
| mm  | : Milimetre                                                             |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|      |                                                                                  |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|
| MW   | : Megawatt                                                                       |
| N    | : Newton                                                                         |
| sa   | : Saat                                                                           |
| sn   | : Saniye                                                                         |
| SNCF | : Société Nationale des Chemins de fer Français: Fransız Demiryolları<br>İdaresi |
| t    | : Ton                                                                            |
| TCDD | : Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları                                        |
| TEE  | : Trans Europe Express - Transit Avrupa Ekspresi                                 |
| TGV  | : Train Grand Vitesse - Fransa'da yüksek hızlı trenlere verilen isim             |
| UIC  | : Union Internationale des Chemins de fer - Uluslararası Demiryolları<br>Birliği |
| YHT  | : Yüksek Hızlı Tren                                                              |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Ülkemizde son yıllarda Yüksek Hızlı Tren (YHT) altyapısıyla beraber demiryolu ile yolcu taşıma oranının arttığı düşünülmektedir. Ancak YHT işletmeciliği yapılan hat uzunluğu kısıtlı olduğundan çoğu bölgede bu hizmet verilememektedir. Aynı zamanda, geleneksel demiryolu hatlarının da altyapı bakımından yüksek hızlarda işletilmeye elverişsiz olması ve karayolu gibi kapıdan kapıya bir taşımacılık yapmaması nedeniyle demiryolunun yolcu taşımacılığındaki payının sınırlı kalmaktadır.

Ülkemizde geleneksel demiryolu hatlarının uzunluğu 2019 yılsonu itibariyle 11.590 km iken yüksek hızlı hatların uzunluğu 1.213 km'dir (TCDD 2019). Geleneksel hatların işletme hızlarının yükseltilmesi için her birinin yerine YHT altyapısı yapmak hem maliyetli olmaları hem de uzun inşa süreleri düşünüldüğünde, inşası güç yatırımlardır. Bu nedenle, çeşitli demiryolu idareleri, geleneksel hatların mevcut altyapısı ile korunup veya az maliyetlerle altyapının sorunlu kısımları var ise iyileştirilip daha hızlı nasıl işletilebileceği üzerine çalışmalar yapmaktır. Bu çalışmalar gelişen teknoloji ile beraber sonuçlandığında yatar gövdeli tren teknolojisi ortaya çıkmıştır.

Dünyada bazı ülkelerde, geleneksel hatların geometrilerinde değişiklik yapmadan veya çok az değişiklik yapılarak demiryolu işletmesinin yolculuk hızını artırmak için yatar gövdeli tren teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknoloji ile tren gövdesinin eğilmesi; bojinin gövdeye göre yaptığı açısız dönme hareketiyle veya tekerlekten raya gelen kuvvetlerdeki değişimle sağlanır. Bu eğilme yardımıyla yatar gövdeli trenlerde demiryolu arabası ve içerisindekilere etkiyen dengelenmemiş merkezkaç kuvvetinin oluşturduğu konfor ivmesi azalır (Evren ve Dündar 2016). Bu özellik ile eksik deyer üst sınırı arttığından, yatay dönemeçlerden geçiş, daha az deyer verilerek ve daha yüksek hız ile mümkün olmakta, böylelikle yolculuk süresi azaltılabilmektedir.

## 1.1 KONUSU

Geleneksel demiryolu hatlarının ülkemizdeki inşaa süreci 19. yüzyıl ortalarına kadar gitmektedir. Bu hatların büyük bir çoğunluğunda, hat üstyapılarının yenilenmesi, bazı hatlara sinyalizasyon ve elektrifikasyon özelliklerinin kazandırılması vb. yenilikler yapılmış olmasına karşın çoğu hattın geometrik özellikleri inşa edildiğı yılı halini korumaktadır. Ülkemizde, 2009 yılında Ankara-Eskişehir, 2011 yılında Ankara-Konya ve 2014 yılında Ankara-İstanbul arasında olmak üzere YHT hatlarında işletme başlamıştır. YHT hatlarının inşa edilmesiyle birlikte demiryolu ile taşınan yolcu sayısı artmıştır. 2009 yılında YHT'lerin yolcu taşımacılığindeki payı, toplam 3.469 (milyon) yolcu-km'lik taşıma içerisinde 237 (milyon) (%7) yolcu-km iken, 2019 yılına gelindiğinde bu pay, toplam 4.841 (milyon) yolcu-km'lik taşıma içerisinde 2.678 (milyon) (%55) yolcu-km olmuştur (TCDD 2019). Ancak farklı nedenlerle birlikte YHT hatlarının ülke geneline yayılmış bir işletme ağına olmaması ve geleneksel hatların işletme hızlarının düşük olması; demiryolunun, yolcu taşımacılığında diğer ulaşım türleriyle rekabet etmesinin önüne geçmektedir.

Yeni bir demiryolunun ve özellikle YHT hattının inşası, hem yüksek maliyetli olması hem de uzun inşa süreleri gerektirmektedir. Ülkemiz demiryolu ağına bulunan geleneksel hatların yerine YHT hatlarının inşa edilmesi, çok fazla bütçe ve zaman isteyen işlerdir. Yeni bir hattın yatırım bütçesi ile mevcut hatlar iyileştirilebilir ve demiryolu taşıtlarındaki teknolojik gelişmelerin ülkemizde işletilen hatlara uygulanması mümkün olabilir.

Bu çalışmada, Karabük-Zonguldak geleneksel demiryolu hattı üzerinde, yolcu taşımacılığında kullanılan yatar gövdeli tren uygulamasının sağlayacağı yolculuk süresindeki kısalma ve hız artışının değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Çalışma yapılan demiryolu hat kesimini gösteren ölçeksiz harita Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 Zonguldak- Karabük demiryolu hattı (URL-1 2021).

## 1.2 AMAÇ

Çalışmanın amacı, yatar gövdeli tren uygulamasının, geleneksel bir demiryolu hattı üzerinde yolculuk hızı ve yolculuk süresi üzerindeki etkisinin ölçülmesidir. Böylelikle yeni demiryolu hattı inşa etmek yerine mevcut hatlarda kullanılan tren teknolojisinin değiştirilmesinin getireceği yarar değerlendirilmiştir.

Bu konuda ülkemizde ciddi bir çalışmanın olmaması, konunun çalışılması ihtiyacını doğurmuştur.

## 1.3 YÖNTEM

İncelenen hattın geometrik özellikleri ve trenlerin işletme hızları TCDD'den elde edilmiştir.

Yatar gövdeli trenler için sınır değerler ve bağıntılar EN 13803 standardından alınmıştır. Yapılan hesapta sınırlandırılması gereken bir değer var ise EN 13803 standardından kontrol edilip düzeltilmiştir. Yeni hız değerleri mevcut hızlar ile karşılaştırılarak aralarındaki farklılık değerlendirilmiştir.

Ayrıca trenin hareketi sırasında karşılaştığı dirençler altında yapabileceği hızlar belirlenmiştir. Bu hızlar da mevcut tren tarifi ile karşılaştırılmıştır.

Kısaca; hesaplama ve karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır.



## BÖLÜM 2

### DEMİRYOLUNA AİT TANIMLAR

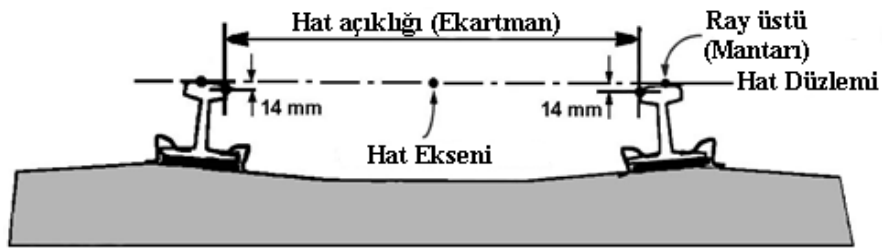
#### 2.1 DEMİRYOLLARININ GEOMETRİK ÖZELLİKLERİ

Demiryolu hatlarının planlanması, tasarımı ve işletimi için bazı geometrik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bölüm altında bu özellikler açıklanmaktadır.

##### 2.1.1 Hat Açıklığı (Ekartman)

Demiryolu hatlarında paralel iki rayın iç yanakları arasında kalan aralık hat açıklığı olarak adlandırılır. Hat açıklığı genelde hat boyunca sabittir. Ancak hattın inşası sırasında oluşabilen hatalar veya hattın işletilmesinden kaynaklanan ray aşınmaları nedeniyle yer yer kabul edilebilir ölçüde farklılıklar gösterebilir. Ayrıca küçük yarıçaplı dönemeçlerde taşıtların geçişini kolaylaştırmak için hat açıklığı küçük ölçülerde artırılabilir (Evren ve Dünder 2016).

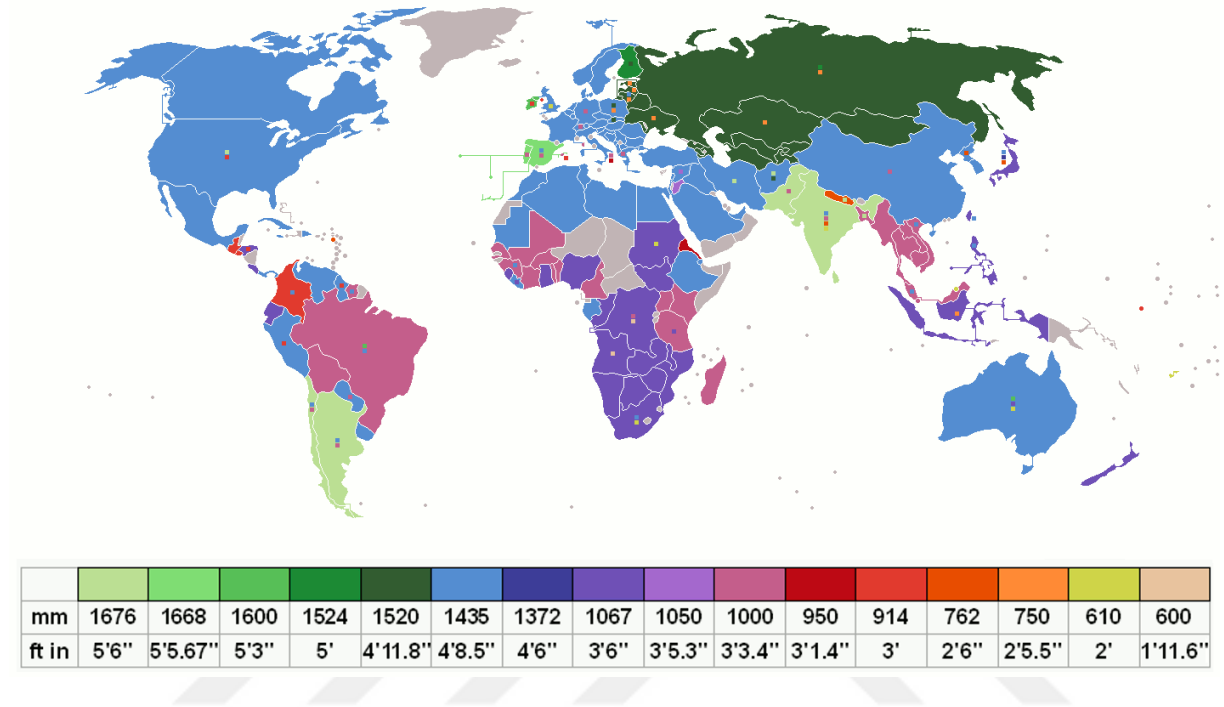
Hat açıklığı, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, ray mantarlarının 14 mm altından olacak şekilde iki ray iç yanağının arasında kalan açıklık ölçülerek belirlenir ve “e” ile gösterilir.



Şekil 2.1 Hat açıklığının gösterimi (Lindahl 2001).

Demiryolu hatları, 1435 mm’lik genişlik değeri temel alınarak dar, normal ve geniş hat olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. 1825 yılında George Stephenson’un posta arabalarının dingil açıklığını temel alarak uyguladığı 1435 mm’lik hat açıklığına sahip hatlar “normal” olarak

adlandırılmaktadır. Hat açıklığı 1435 mm olan normal bir hatta ray eksenleri arası açıklık ise 1500 mm olmaktadır. Günümüzde dünyadaki hatların büyük bir kısmı normal açıklığa sahiptir (Evren ve Dündar 2016). Dünya genelinde kullanılan hat açıklıkları Şekil 2.2'deki haritada gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Dünyada kullanılan hat açıklıkları (URL-2 2020).

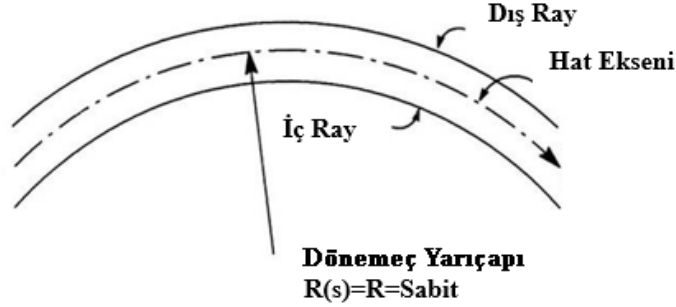
## 2.1.2 Yatay Geometri

Demiryolu hatları planda temel olarak doğrusal kesimler ve bunlar arasında yerleştirilmiş olan daire yayı şeklindeki dönemeçlerden oluşmaktadır. Ayrıca doğrusal kesimler ile dönemeçler arasına yerleştirilen ve geçiş eğrisi veya birleştirme eğrisi adı verilen özel eğri tipleri de bulunmaktadır (Evren ve Dündar 2016).

### 2.1.2.1 Yatay Dönemeç

Demiryollarında hatların eğri kesimlerine yatay dönemeç adı verilir. Demiryolu hatlarında yatay dönemeçler, daire yayları şeklinde olup hattın doğrultu değiştirmesi gereken yerlerinde, doğrusal kesimlerin (teğetlerin) arasına yerleştirilirler. Bir yatay dönemecin en önemli geometrik özelliği yarıçapıdır. Yarıçap  $R$ , yarıçapın tersi olan eğrilik ise  $1/R$  ile

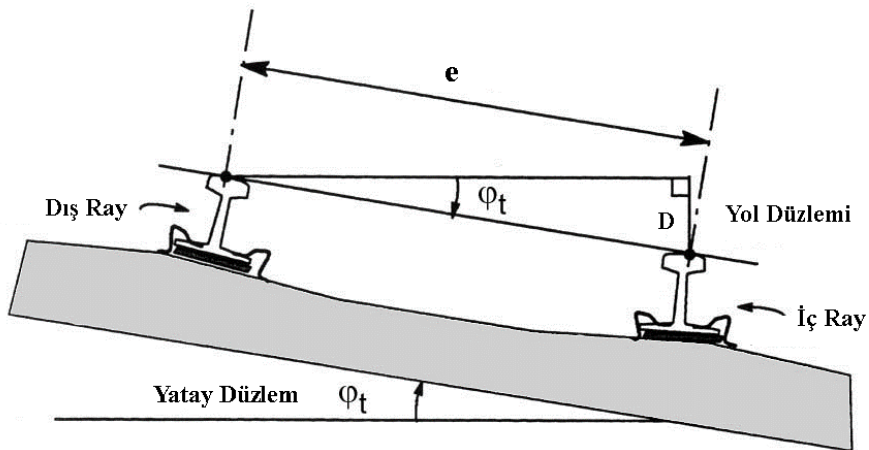
gösterilmektedir (Evren ve Dünder 2016). Şekil 2.3’de bir yatay dönemecin plan üzerinde görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Demiryollarında yatay dönemecin gösterimi (Lindahl 2001).

#### 2.1.2.2 Dever

Yatay dönemeçlerde ortaya çıkan merkezkaç kuvvetinin zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için geçkinin doğru kesimlerinde yatay olan yuvarlanma yüzeyi, dönemeçlerde dış ray dizisine doğru yükselen bir eğik yüzey haline getirilir. Bu eğik yuvarlanma yüzeyini oluşturabilmek için dış ray dizisi, iç raya göre daha yüksek bir kota çıkartılır. Şekil 2.4’de görülen bu yükseklik fazlasına dever adı verilir ve  $D$  ile gösterilir. Dever uygulamasıyla taşıt ağırlığı, merkezkaç kuvvete karşıt yönde bir merkezci kuvvet yaratmış olur. Böylelikle merkezkaç kuvvetinin olumsuz etkileri azaltılabilmektedir (Evren ve Dünder 2016).



Şekil 2.4 Dever ( $D$ ) ve yatay düzlem arasında oluşan açı (Lindahl 2001).

Dever değeri, iki ray arasındaki kot farkının milimetre cinsinden ifade edilmesi ile verilmektedir.

### **a. Deverin Sınırlandırılması**

Bazı teknik koşullar dever yüksekliğinin belirli bir üst değer ile sınırlandırılması zorunluluğunu doğurmaktadır. Bu koşullar şöyle sıralanabilir (Evren ve Dündar 2016);

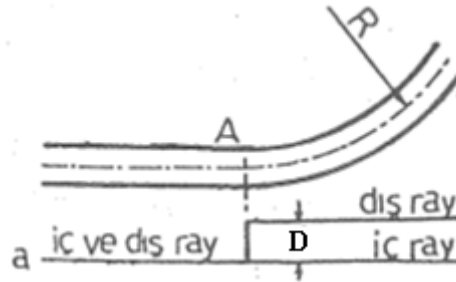
- Dever uygulanmış bir dönemeçte, taşıtların dış ray tarafındaki üst köşesi yükselirken, iç ray tarafındaki üst köşesi de iç tarafa doğru kayar. Dever belirli bir değeri aştığında, gabarinin büyümesine, dolayısıyla sanat yapılarının kesitlerinin de artmasına neden olur.
- Rüzgârlı kesimlerde, dever belli bir değeri aştığında ray düzlemindeki eğim sebebiyle yüklü vagonlar dönemeç içine doğru devrilme tehlikesi ile karşılaşabilir.
- Trenlerin dönemeçte durmaları halinde, vagonların dış tarafındaki kapıların açılması ve vagona iniş-binişler güçleşir.
- Hareket halindeki bir trenin, arıza durumunda deverli bir yatay dönemeç üzerinde durması halinde, devrilme olasılığı ortaya çıkabilmektedir.

Yukarıda sayılan nedenlerle dever; Polonya'da 130 mm, Hollanda ve İsveç'te 120 mm, Macaristan'da 110 mm, Almanya'da 160 mm, Fransa'da 180 mm, Japonya'da 200 mm ile sınırlandırılmıştır. Ülkemizde ise TCDD, deverin üst sınırı olarak 150 mm değerini kullanmaktadır (Evren ve Dündar 2016).

### **2.1.3 Geçiş Eğrisi ve Dever Rampası**

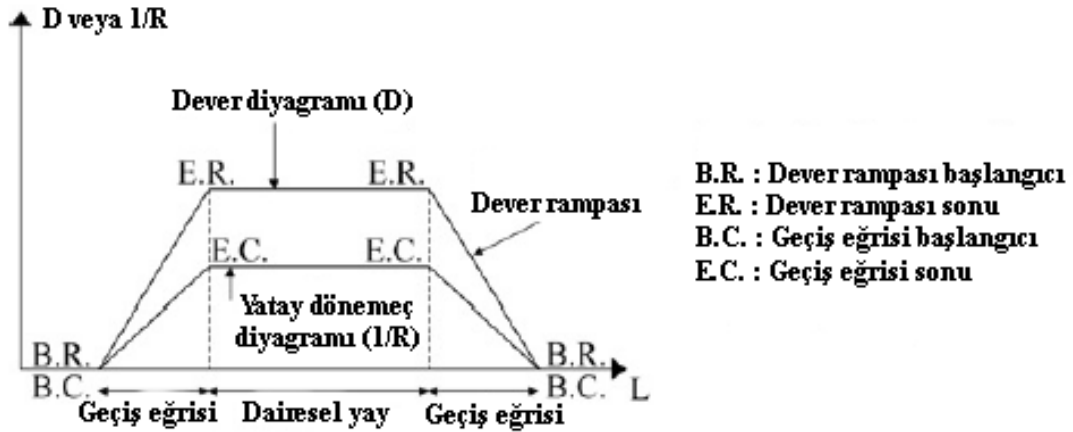
Bir demiryolu hattında, doğrusal kesimlerden dönemeçlere girildiğinde, Şekil 2.5'deki gibi, dış ray D kadar yükseltildiğinde, taşıtların tekerlekleri oluşan bu çıkıntıyı aşamaz ve boyuna yönde bir şok hareketi (çarpma) meydana gelir. Aynı zamanda merkezkaç veya merkezcil kuvvet fazlası da ani olarak etkiyeceği için enine yönde başka bir şok (çarpma) dalgası da oluşur. Bu nedenle uygun çözüm, deverin aniden değil uygun bir uzunluk ( $L_D$ ) boyunca yavaş yavaş artırılmasıdır. Yapılması gereken, hem deverin ani olarak başlamasını sağlamak hem de dengelenmemiş bir yanal kuvvet ortaya çıkmasını engelleyecek bir çözüm ortaya koymaktır. Bu nedenle, dever uygulamasının başladığı kesim ile D yüksekliğine ulaştığı kesim arasına bazı koşulları sağlayacak bir geçiş eğrisinin (birleştirme eğrisinin) yerleştirilmesi gerekir. Bu eğrinin sahip olması gereken iki temel özellik aşağıda verilmiştir.

- Eğri üzerindeki her nokta, dış rayın o noktadaki yükselme miktarı ile oluşan merkezci kuvveti dengeleyecek bir merkezkaç kuvvet oluşturacak eğrilik yarıçapına sahip olmalıdır.
- Başlangıç noktasında geçkinin doğru kesimine, dış raydaki yükselme miktarı  $D$ 'ye eşit olduğunda ise daire yayına teğet olmalıdır (Evren ve Dündar 2016).



**Şekil 2.5** Dış rayın dönemeç başında aniden dever kadar yükseltilmesi (Evren ve Dündar 2016).

Birleştirme eğrisi boyunca deverin doğrusal veya doğrusal olmayan şekilde değiştiği bölgelere dever rampası adı verilir. Bu bölgelerde Şekil 2.6'da görüldüğü gibi dever değeri sıfırdan başlayarak uygulanacak dever değerine kadar yükselmektedir. Yatay dönemeç başlangıç ve bitişlerinde dever değişimleri geçiş eğrisi boyunca başlar ve son bulur.



**Şekil 2.6** Bir yatay dönemeç üzerinde deverin ve eğrilik değişiminin diyagramı (Profillidis 2014).

Dever rampasının bilinmesi gereken özelliği eğimidir. Bu eğim ise birim uzunluktaki dever değişiminin hesaplanması ile bulunabilir ve  $dD/ds$  oranı ile gösterilir. Dever rampası sınırları EN 13803'e göre Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1** EN 13803’e göre dever rampası (dD/ds) eğim sınırları (CEN 2017).

|                   | Normal Sınırlar | Özel Sınırlar |
|-------------------|-----------------|---------------|
| $V \leq 50$ km/sa | 2,50 mm/m       | 3,33 mm/m     |
| $V > 50$ km/sa    | 2,50 mm/m       |               |

#### 2.1.4 Düşey Geometri

Demiryolu hatları düşey doğrultuda, farklı eğimlere sahip doğrusal kesimler ile bu kesimleri birleştiren eğrilerden oluşur. Bu nedenle boykesitte incelenen geometrik özellikler farklı türde ve değerlerde eğimler ile düşey dönemeçlerdir (Evren ve Dündar 2016).

##### 2.1.4.1 Eğimler

Arazinin yüzey özelliklerinden dolayı hat boyunca farklı boyuna eğimlere gereksinim duyulmaktadır. Demiryolu hatlarında eğim diğer ulaştırma türlerine, özellikle de karayoluna kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle demiryolu mühendisliğinde eğimler binde (‰) cinsinden ifade edilir. Binde cinsinden eğim, yatayda kat edilen 1000 metre (1 km) uzunluk başına oluşan metre cinsinden yükseklik (kot) değişimidir. Eğer yükseklik artıyorsa çıkış eğimi, azalıyorsa iniş eğimi olarak adlandırılır (Evren ve Dündar 2016). Ülkemizde genel olarak düşey eğimin üst sınırı ‰16’dır.

Eğimin en büyük değeri aynı zamanda demiryolu taşıtının özelliklerine ve gücüne bağlıdır. Karma trafiğe sahip ana hatlarda 200 km/sa’e kadar hızların olağan en büyük eğim değerleri ‰12-‰15 arasındadır. Demiryollarında genellikle en büyük eğim değerleri olarak ‰20-‰25 kullanılır. Ray ve tekerlek arasındaki adhezyon kuvvetlerinden dolayı, en büyük eğimler en fazla ‰40 olabilir (Profillidis 2014).

##### 2.1.5 Enkesite İlişkin Özellikler

Enkesite ilişkin en önemli özelliklerden biri gabaridir. Bu özellik tasarımı etkileyen önemli unsurlardandır. Özellikle sanat yapılarının (köprü, tünel, vb.) ne ölçüde olacağına büyük ölçüde etki eder.

### 2.1.5.1 Gabari

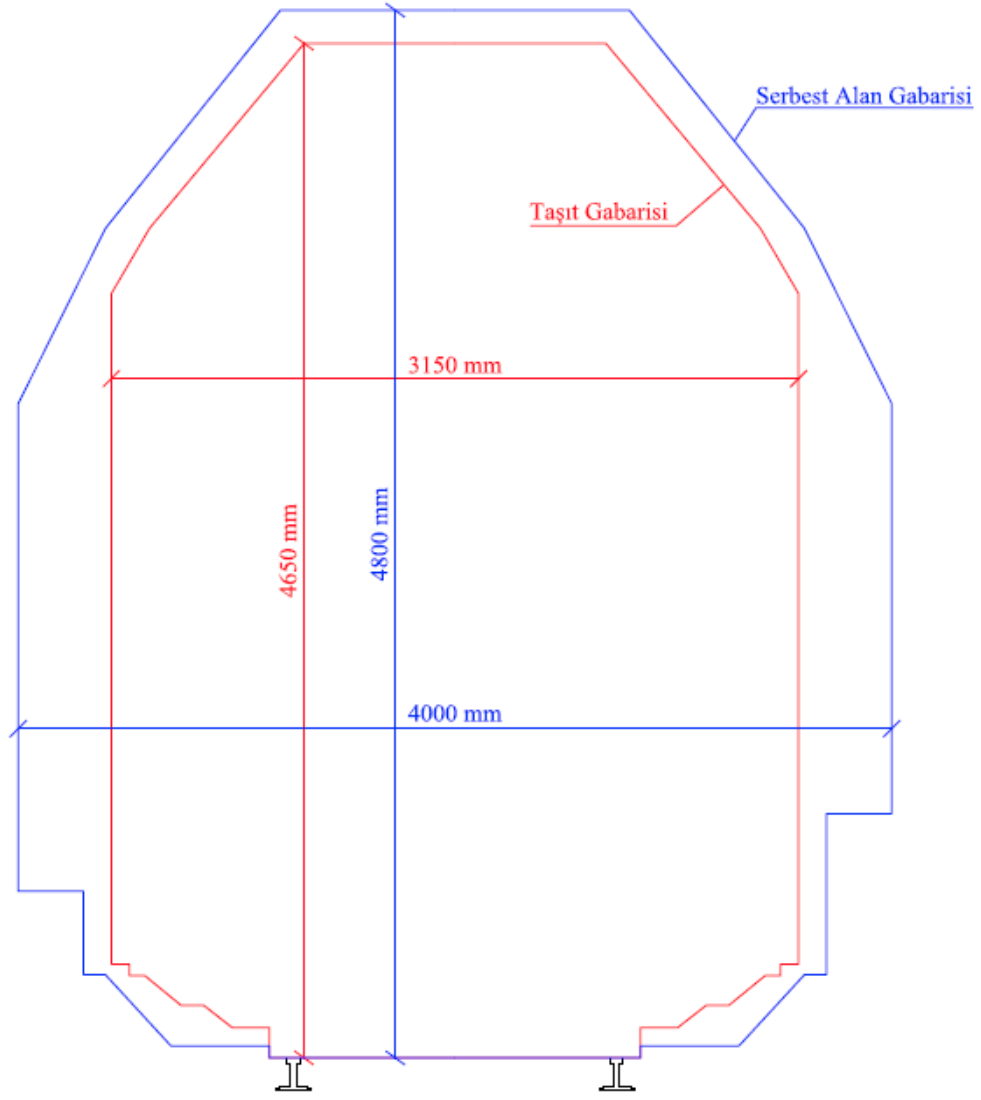
Demiryolu taşıtlarının enkesitte dış çizgilerini belirleyen boyutlara gabari adı verilir Gabari, demiryolu taşıtlarının mümkün olan en büyük dış çerçeve çizgisini, hat üzerindeki sabit tesislerin konumlarını ve sanat yapılarının boyutlarını belirlemekte kullanılır. Gabari iki ana başlıkta incelenir. Bunlar; serbest alan ve taşıt gabarisidir. Ayrıca taşıt gabarisi de statik ve kinematik gabari olmak üzere iki tiptir (Evren ve Dündar 2016).

Serbest alan gabarisi, bir demiryolu taşıtının içinden güvenlikle geçebileceği alanı göstermektedir. İşletilen taşıt türlerine göre serbest alan gabarisi de değişmektedir Elektrifikasyon tesisleri gibi bazı sabit tesisler bu gabarinin içerisinde bulunur (Evren ve Dündar 2016).

Statik gabari demiryolu taşıtlarının durağan haldeyken aşmamaları gereken sınır çizgisini ve açık vagonların üzerindeki yüklemelerin boyutlarını göstermektedir (Evren ve Dündar 2016).

Kinematik gabari, UIC tarafından geliştirilmiştir. Taşıtların, özellikle süspansiyonların esnekliğinin etkisiyle karşı karşıya kaldıkları geometrik ve dinamik yer değiştirmeleri de hesaba katar. Kinematik gabari, demiryolu taşıtların aşmaması gereken sınır çizgileri ile taşıtların boyutlarının belirlenmesini sağlar. Statik gabariden farkı dinamik yer değiştirmeleri ve bir güvenlik payını hesaba katmasıdır (Evren ve Dündar 2016).

Ülkemizde kullanılan genel gabari ölçüleri, ölçeksiz olarak Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu durumda serbest alan gabarisi 4000 mm genişlik ve 4800 mm yükseklik, taşıt gabarisi ise 3150 mm genişlik ve 4650 mm yüksekliktedir.

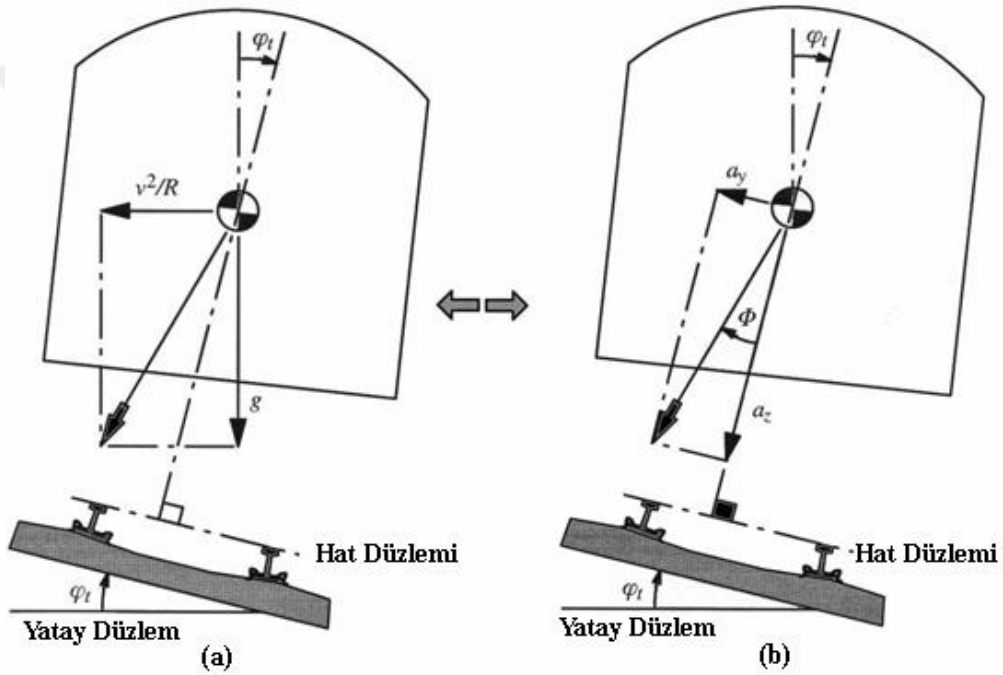


Şekil 2.7 TCDD genel taşıt ve serbest alan gabarisi (TCDD 2020).

## 2.2 DEMİRYOLU HATTI VE TAŞIT İLİŞKİSİ

### 2.2.1 Yatay Dönemeçte Taşıta Etkiyen Kuvvetler

Teorik olarak kusursuz bir hat geometrisine sahip sabit yarıçaplı bir yatay dönemeçte sabit hızda ilerleyen taşıt, Şekil 2.8 (a)'da görüldüğü üzere yatay yönde merkezkaç ivmesine, düşey yönde ise yerçekimi ivmesine maruz kalır. Bu ivmelerin bileşke vektörü Şekil 2.8 (b)'de görüldüğü gibi iki farklı bileşen olarak gösterilebilir. Hat düzlemine paralel olan  $a_y$  ivmesi yanal ivme ve hat düzlemine dik olan  $a_z$  ivmesi ise düşey ivme olarak adlandırılır (Lindahl 2001).



Şekil 2.8 Taşıta etkiyen yanal ivme ve kuvvetlerin diyagramı (Lindahl 2001).

Şekil 2.8 (b)'de verilen  $a_y$  yanal ivme ve yanal kuvvet açısı “ $\Phi$ ” için aşağıda verilen denklemler yazılabilir (Lindahl 2001).

$$a_y = \frac{v^2}{R} \cdot \cos \varphi_t - g \cdot \sin \varphi_t \quad (2.1)$$

$$a_z = \frac{v^2}{R} \cdot \sin \varphi_t + g \cdot \cos \varphi_t \quad (2.2)$$

Dever açısı ( $\varphi_t \leq 8.59$  derece) çok küçük olduğundan  $\cos \varphi_t$  1 olarak kabul edilebilir.

$$a_y \cong \frac{v^2}{R} - g \sin \varphi_t = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{D}{e} \quad (2.3)$$

$$\frac{v^2}{R} = g \cdot \frac{D}{e} \quad (2.4)$$

$a_z \cong g$  eşitliği ve  $\sin \varphi_t = \tan \varphi_t$  kabulü yapıldığında  $a_z$  ve  $a_y$  'ye bağlı olarak Şekil 2.8 (b)'de görülen  $\Phi$  (yanal kuvvet açısı) aşağıda verilen Denklem 2.5 ile hesaplanabilir (Lindhahl 2001).

$$\Phi = \tan^{-1} \cdot \frac{a_y}{a_z} \quad (2.5)$$

Yukarıda verilen denklemlerde,

$a_y$ : Yanal ivme ( $m/sn^2$ )

$a_z$ : Düşey ivme ( $m/sn^2$ )

$\varphi_t$ : Deverden dolayı oluşan kot farkı ile yatay düzlem arasındaki açı

$\Phi$ : Yanal kuvvet açısı (derece)

$g$ : Yerçekimi ivmesi ( $m/sn^2$ )

$D$ : Dever değeri (mm)

$v$ : Taşıtın hızı ( $m/sn$ )

$R$ : Yatay dönemeç yarıçapı (m)

$e$ : Ray eksenleri arası genişlik (1500 mm) olmaktadır (Lindhahl 2001).

### 2.2.2 Proje Tasarım Hızı, Denge (Teorik) ve Uygulanan Dever

Bir demiryolu hattının tasarım ölçütlerine karar verilirken en önemli parametrelerden biri de proje tasarım hızıdır. Tasarım hızına karar verildiğinde tüm tasarım ölçütlerinin hesabında kullanılacak hız değeri de belirlenmiş olmaktadır. YHT hatlarında genelde başka taşıtlar işletilmediği için tek bir tasarım hızı belirlenebilir. Fakat karma trafik (yük ve yolcu) ile işletilmek istenen hatlar için hem yolcu hem de yük katarları için ayrı ayrı tasarım hızları belirlenmesi gerekmektedir.

Denge (teorik) deveri değeri dönemeçte belirli bir V hızı ile hareket etmekte olan trenler için merkezkaç kuvveti ile merkezciil kuvvetin birbirine eşit olduğu dever değeridir. V hızı ile R yarıçaplı bir yatay dönemeçte yanal ivmeyi tamamen dengeleyen yani sıfır yapan dever değerine denge (teorik) deveri denir (Evren ve DüNDAR 2016). Denklem 2.4’de değerler yerine koyulup, denge deveri ( $D_{EQ}$ ) eşitlikte yalnız bırakıldığında Denklem 2.6’da görüldüğü hali almaktadır.

$$D_{EQ} = \frac{e \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (2.6)$$

Burada  $e=1500$  mm,  $g=9,81$  m/sn<sup>2</sup> ve  $v$  hızı da km/sa’ya çevrilip ( $v = V/3,6$ ) denklem yeniden düzenlendiğinde Denklem 2.7’deki gibi olmaktadır.

$$D_{EQ} = \frac{1500 \cdot \left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{9,81 \cdot R} \quad (2.7)$$

Denklem 2.8 düzenlendikten sonra denge deverinin ( $D_{EQ}$ ) genel denklemi Denklem 2.8 ile hesaplanır (CEN 2017).

$$D_{EQ} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (2.8)$$

V: Proje tasarım hızı (km/sa)

R: Yatay dönemeç yarıçapı (m)

Demiryolu hatlarında değişik tipte trenler birbirlerinden farklı hızlarda seyredebilmektedir. Bu nedenle, dönemeçte dikkate alınan V hızından daha farklı hareket eden trenlere dengelenmemiş bir yanal kuvvet fazlası etkiyecektir. Eğer tren dönemeçte V hızından daha büyük bir hızla hareket etmekteyse dengelenmemiş merkezkaç kuvvet, daha küçük bir hızla hareket etmekteyse de dengelenmemiş merkezciil kuvvet oluşmaktadır.

İşletilmekte olan tüm trenlerin aynı hızda hareket ettiği kentsel raylı sistem veya YHT hatlarında yatay dönemeçlerde uygulanacak dever yüksekliği denge deveri formülü ile hesaplanabilir (Evren ve Dünder 2016). Ancak farklı hızlarda hareket eden trenler (yük ve yolcu) söz konusu olduğunda, yolcu treni için hızlar yüksek, yük trenleri için düşük olacaktır. Bu nedenle yolcu treni için hesaplanan denge deveri, yük treni için fazla olacaktır. Aynı şekilde yük treni için hesaplanan dever de yolcu treni için eksik kalacaktır. Yani denge deverini, hatta doğrudan uygulamak yerine, hem yolcu hem de yük trenleri için uygun olarak seçilen bir dever değerine gereksinim duyulur. Bu dever değerine uygulanan dever denir ve D ile gösterilir.

### 2.2.3 Eksik ve Fazla Dever

Karma trafikli hatlarda her iki tren trafiği için de uygun deverler seçilmelidir. Eğer uygulanan dever denge deverinden az ise aradaki farka eksik dever (I) adı verilir ve Denklem 2.9 ile hesaplanır. EN 13803 standardına göre eksik dever sınırları Çizelge 2.2’de verilmiştir (CEN 2017).

$$I = D_{EQ} - D = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - D \quad (2.9)$$

I: Eksik dever (mm)

D<sub>EQ</sub>: Denge deveri (mm)

D: Uygulama deveri (mm)

**Çizelge 2.2** EN 13803'e göre eksik dever sınırları (CEN 2017).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Normal Sınırlar <sup>a</sup> | Özel Sınırlar <sup>a</sup> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Normal Trenler                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                              |                            |
| $V \leq 220$ km/sa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 153 mm                       | 180 mm <sup>b</sup>        |
| $220 \text{ km/h} < V \leq 300$ km/sa                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 153 mm <sup>b</sup>          |                            |
| $300 \text{ km/h} < V \leq 360$ km/sa                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 100 mm <sup>b</sup>          |                            |
| Yatar Gövdeli Trenler                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                              |                            |
| $80 \text{ km/h} \leq V \leq 260$ km/sa <sup>c</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 275 mm                       | 300 mm                     |
| <sup>a</sup> Farklı tren sınıflarına farklı sınırlar uygulamak yaygın bir uygulamadır. Her taşıtın kendi çalışma dever eksikliği aralığını kapsayan koşullarda EN 14363'teki prosedürlere göre test edildiği ve onaylandığı varsayılır (EN 14363'te $I_{adm}$ olarak belirtilir). Yerel sınır örnekleri bilgilendirmek için Ek H'de gösterilmiştir. |                              |                            |
| <sup>b</sup> Eğilme dışında bir dever eksikliği telafi sistemi ile donatılmış, EN 14363'e uygun trenlerin İdare tarafından daha yüksek dever eksiklik değerleriyle çalışmasına izin verilebilir.                                                                                                                                                    |                              |                            |
| <sup>c</sup> Şu anda Avrupa'da, yatar gövdeli trenler için en büyük hızın 260 km/sa değerini aştığı işletmede veya planlama safhasında hiçbir hat bulunmamaktadır.                                                                                                                                                                                  |                              |                            |

Eğer uygulanan dever denge deverinden fazla ise, aradaki farka fazla dever (E) adı verilir. Fazla dever; demiryolu taşıtlarının proje tasarım hızından daha düşük hızlarda hareket ettiği durumlarda meydana gelir. Denklem 2.10'da fazla dever bağıntısı verilmiştir. EN 13803 standardına göre fazla dever sınırları Çizelge 2.3'de verilmiştir.

$$E = -I = D - D_{EQ} = D - 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (2.10)$$

E: Fazla dever (mm)

I: Eksik dever (mm)

**Çizelge 2.3** EN 13803'e göre fazla dever sınırları (CEN 2017).

| Normal Sınırlar | Özel Sınırlar |
|-----------------|---------------|
| 110 mm          | 150 mm        |

## 2.2.4 Uygulanan Deverin Zamana Bağlı Değişimi

Uygulama deveri geçiş eğrisi üzerinde, eğri uzunluğu boyunca artarak dönemeç başlangıcında en büyük değerine ulaşır ve dönemeç çıkışında geçiş eğrisi boyunca azalarak son bulur. Deverin geçiş eğrisi boyunca doğrusal olarak artıp azalması için uygun bir geçiş eğrisi uzunluğu ( $L_D$ ) gerekmektedir. Böylece uygun bir uzunluk belirlenecek, deverin bir anda değişmesi engellenip doğrusal olarak değişmesi sağlanacaktır. Bu nedenle CEN standartlarına göre deverin zamana bağlı değişimine ( $dD/dt$  değerine) de sınırlama getirilmiştir. Doğrusal bir dever değişiminin zamana bağlı değişimi Denklem 2.11’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Delta D}{L_D} \cdot \frac{V}{3,6} < \left( \frac{dD}{dt} \right)_{lim} \quad (2.11)$$

$dD/dt$ : Deverin zamana bağlı değişimi (mm/sn)

$\Delta D$ : Geçiş eğrisi boyunca dever değişim miktarı (mm)

$L_D$ : Geçiş eğrisinin uzunluğu (m)

EN 13803 standardına göre deverin zamana bağlı değişimi ( $dD/dt$ ) ile ilgili sınırlar Çizelge 2.4’de verilmektedir.

**Çizelge 2.4** EN 13803’e göre deverin zamana bağlı değişim sınırları (CEN 2017).

|                                                                                                                                                                    | Normal Sınırlar | Özel Sınırlar         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| <b>Normal Trenler <math>V \leq 200</math> km/sa</b>                                                                                                                |                 |                       |
| $I \leq 160$ mm                                                                                                                                                    | 50 mm/sn        | 70 mm/sn <sup>a</sup> |
| $160 \text{ mm} < I \leq 180$ mm                                                                                                                                   | 50 mm/sn        | 60 mm/sn              |
| <b>Normal Trenler <math>200 \text{ km/sa} &lt; V \leq 360</math> km/sa</b>                                                                                         |                 |                       |
|                                                                                                                                                                    | 50 mm/sn        | 60 mm/sn              |
| <b>Yatar Gövdeli Trenler <math>V \leq 200</math> km/sa</b>                                                                                                         |                 |                       |
|                                                                                                                                                                    | 75 mm/sn        | 95 mm/sn              |
| <b>Yatar Gövdeli Trenler <math>200 \text{ km/sa} &lt; V \leq 260</math> km/sa <sup>b</sup></b>                                                                     |                 |                       |
|                                                                                                                                                                    | 60 mm/sn        | 70 mm/sn              |
| <sup>a</sup> $I \leq 153$ mm ve $dI/dt \leq 70$ mm/sn, olduğunda, $dD/dt$ için özel sınır 85 mm/sn’ye yükseltilebilir.                                             |                 |                       |
| <sup>b</sup> Şu anda Avrupa’da, yatar gövdeli trenler için en büyük hızın 260 km/sa değerini aştığı işletmede veya planlama safhasında hiçbir hat bulunmamaktadır. |                 |                       |

### 2.2.5 Eksik Deverin Zamana Bağlı Değişimi

Eksik deverin zamana bağlı değişimi bir geçiş eğrisi boyunca eksik deverin birim zamanda (sn) değiştiği miktar olarak tanımlanmaktadır ( $dI/dt$ ), sademe olarak da bilinir. Aslında eksik deverin değişimi, yanal ivmenin de değişimi anlamına gelmektedir. Dever değişimi doğrusal olan bir geçiş eğrisinde, eksik deverin zamana bağlı değişimi EN 13803'e göre Denklem 2.12'de verilmiştir.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\Delta I}{L_D} \cdot \frac{V}{3,6} < \left( \frac{dD}{dt} \right)_{lim} \quad (2.12)$$

$dI/dt$ : Eksik deverin zamana bağlı değişimi (mm/sn)

$\Delta I$ : Geçiş eğrisi boyunca eksik dever değişim miktarı (mm)

$L_D$ : Geçiş eğrisinin uzunluğu (m)

EN 13803 standardına göre eksik deverin zamana bağlı değişimi ( $dI/dt$ ) ile ilgili sınırlar Çizelge 2.5'de verilmektedir.

**Çizelge 2.5** EN 13803'e göre eksik deverin zamana bağlı değişim sınırları (CEN 2017).

|                                                                                                                                                                     | Normal Sınırlar | Özel Sınırlar |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|
| Normal Trenler $V \leq 220$ km/sa                                                                                                                                   |                 |               |
| $I \leq 160$ mm                                                                                                                                                     | 55 mm/sn        | 100 mm/sn     |
| $160 \text{ mm} < I \leq 180$ mm                                                                                                                                    | 55 mm/sn        | 90 mm/sn      |
| Normal Trenler $220 \text{ km/sa} < V \leq 300$ km/sa                                                                                                               |                 |               |
|                                                                                                                                                                     | 55 mm/sn        | 75 mm/sn      |
| Normal Trenler $300 \text{ km/sa} < V \leq 360$ km/sa                                                                                                               |                 |               |
|                                                                                                                                                                     | 30 mm/sn        | 55 mm/sn      |
| Yatar Gövdeli Trenler $V \leq 225$ km/sa                                                                                                                            |                 |               |
|                                                                                                                                                                     | 100 mm/sn       | 180 mm/sn     |
| Yatar Gövdeli Trenler $225 \text{ km/sa} < V \leq 260$ km/sa <sup>a</sup>                                                                                           |                 |               |
|                                                                                                                                                                     | 80 mm/sn        |               |
| <sup>a</sup> Şu anda Avrupa'da, yatar gövdeli trenler için en büyük hızın 260 km/sa değerini aştığı işletmede veya planlama safhasında hiç bir hat bulunmamaktadır. |                 |               |

## 2.3 DEMİRYOLUNDA DİRENÇLER

Direnç kuvvetleri, trenin hareketine ters yönde etkiyen ve istenilen hareketin sağlanabilmesi ve sürdürülebilmesi için aşılması gereken kuvvetlerdir. Direnç kuvvetleri genellikle hıza bağlı olarak değişmektedir. Hızın yanı sıra, dirençleri etkileyen diğer özellikler aşağıda verilmiştir (Evren ve Dünder 2016).

- Taşıtların türü (lokomotif, vagon veya otomotris/otoray) ve tipi (bojili veya bojisiz)
- Taşıtların ağırlıkları
- Hava koşulları (sıcaklık ve nem gibi)
- Hat ve taşıt bakım koşulları
- Ray tipi, uzunluğu ve ağırlığı
- Vagonların yükleme biçimi
- Vagonların birbirine olan etkileri ve oluşturdıkları iç tepkiler

Demiryolu taşıtlarına etkiyen dirençler, hattın özelliklerine bağımlı ve bunlardan bağımsız olabilmektedir. Hat özelliklerinden bağımsız olan dirençlerin toplamı hareket direnci, hat özelliklerine bağlı olan dirençler ise hat dirençleri olarak adlandırılmaktadır (Evren ve Dünder 2016).

Demiryolunda dirençler 4 başlık altında aşağıda verildiği şekliyle incelenebilir.

- Doğru ve düzlükteki direnç ( $R_L$ )
- Tünel direnci ( $R_t$ )
- Yatay dönemeç direnci ( $R_c$ )
- Eğim direnci ( $R_g$ )

Toplam direnç ( $R_{Tot}$ ), bu 4 direncin toplamı olarak hesaplanır.

Bu bölümde farklı demiryolları [İngiliz (BR), Alman (DB), Fransız (SNCF), ABD] kuruluşlarının bahsi geçen tüm dirençleri hesaplamak için kullandıkları denklemler verilmiştir. Verilen denklemlerin çoğu deneysel çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır ve belirli bir demiryolu taşıt türü için bulunan değerlere sahip katsayıları içermektedir (Profillidis 2014).

### 2.3.1 Doğru ve Düzlükteki Direnç

Doğru ve düzlükteki direnç ( $R_L$ ), hattın geometrik özelliklerinden bağımsız olarak etkiyen dirençlerin toplamıdır. Taşıtın hareketinde dolayı oluşan mekanik ve hava dirençlerinin toplamı olarak da söylenebilir (Evren ve Dündar 2016).

Doğru ve düzlükteki direncin genel bağıntısı, Denklem 2.13’de verilmiştir.

$$R_L = A + B \times V + C \times V^2 \quad (2.13)$$

Denklemde,  $A+B \times V$  terimleri çeşitli mekanik dirençleri içerir. Birinci terim  $A$ , hıza bağlı değildir ve yalnızca demiryolu hattının özelliklerine bağlıdır. Yuvarlanma dirençleri ile dönemeç ve geçiş eğrilerinde tekerlek budeni ile ray arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan dirençleri gösterir. İkinci terim  $B \times V$ , hızla doğru orantılı olan çeşitli mekanik dirençleri gösterir. Bunlar; aksların ve şaftların dönüşü, mekanik şanzıman, frenleme gibi unsurlardır. Üçüncü terim  $C \times V^2$ , hava (aerodinamik) dirençleri gösterir (Profillidis 2014).

$A$ ,  $B$  ve  $C$  parametreleri, aşağıdaki denklemlerle, demiryolu taşıtlarının özelliklerine bağlı olarak gösterilebilir (Profillidis 2014).

$$A = \lambda \times M \times \sqrt{\frac{10}{m}} \quad (2.14)$$

$$B \times V = 0,01 \times M \times V \text{ (iyi özelliklere sahip bir hat ve bojili taşıtlar için)} \quad (2.15)$$

$M$ : Trenin toplam ağırlığı (ton)

$m$ : Dingil başına düşen yük (ton)

$\lambda$ : Demiryolu taşıtının özelliklerine bağlı değişen bir parametre (SNCF taşıtları için  $0,9 < \lambda < 1,5$  alınır).

$V$ : Taşıtın hızı (km/sa)

$$C \times V^2 = k_1 \times S \times V^2 + k_2 \times p \times L \times V^2 \quad (2.16)$$

Denklem 2.16 'da, birinci terim ( $k_1 \times S \times V^2$ ) trenin ön ve arka yüzünde ortaya çıkan aerodinamik dirençleri, ikinci terim ( $k_2 \times p \times L \times V^2$ ) ise trenin yan yüzleri ( $p \times L$ ) boyunca oluşan aerodinamik dirençleri göstermektedir (Profillidis 2014).

$k_1$ : Trenin ön ve arka yüzeyinin şekline bağlı bir parametredir. Geleneksel orta ve düşük hızlı SNCF demiryolu taşıtlarında,  $k_1: 20 \times 10^{-4}$ , TGV trenleri için,  $k_1 = 9 \times 10^{-4}$  alınmaktadır.

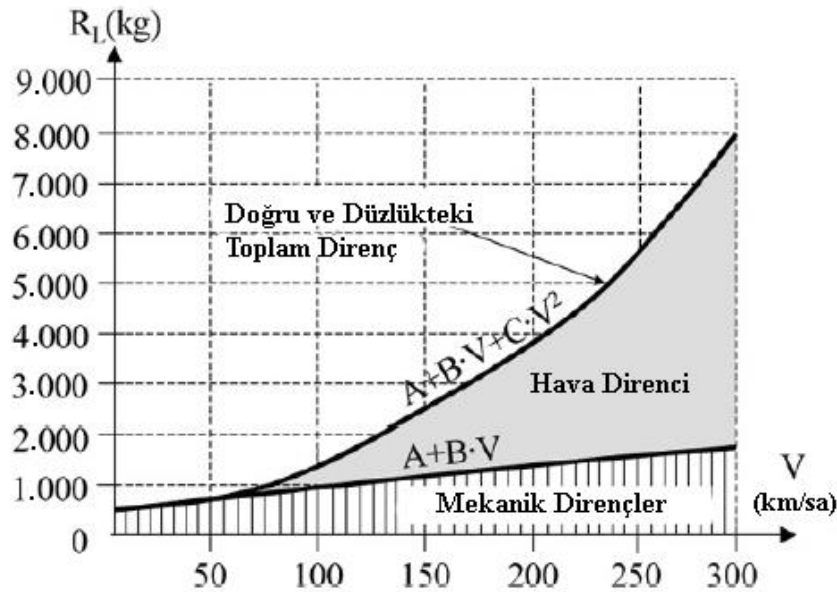
$S$ : Tren ön yüzeyinin kesit alanı ( $m^2$ ) ve genel olarak yaklaşık  $10 m^2$  alınır.

$k_2$ : Trenin yan yüzlerine ( $p \times L$ ) bağlı olan ve pürüzlülükle ilişkili bir parametredir. Geleneksel SNCF trenlerinde,  $k_2 = 30 \times 10^{-6}$ , TGV trenlerinde,  $k_2 = 20 \times 10^{-6}$  alınır.

$p$ : Demiryolu taşıtının ray seviyesine kadar olan kısmı çevresidir ve genellikle 10 m. olarak kabul edilir.

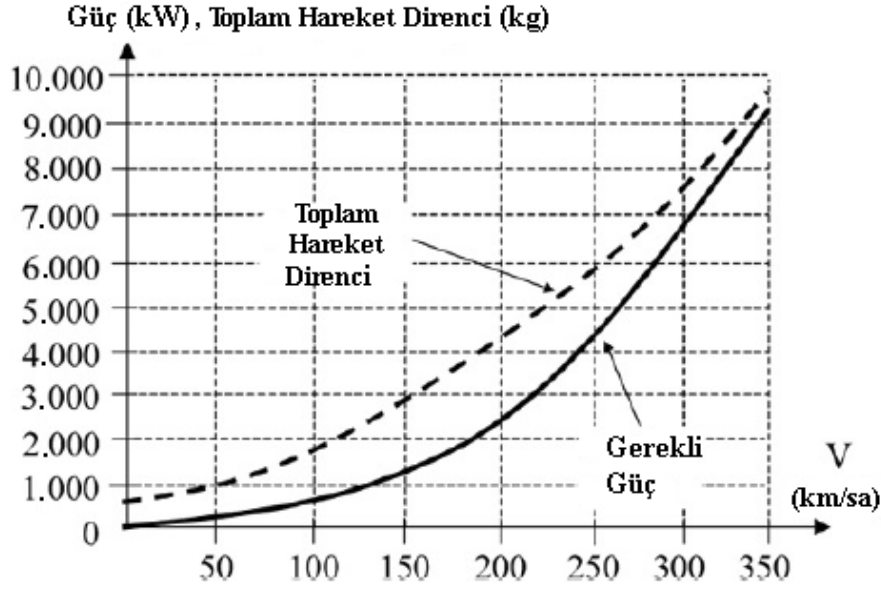
$L$ : Trenin boyu (m)

Şekil 2.9'da mekanik ve aerodinamik dirençlerin artışı hızın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Yüksek hızlarda aerodinamik dirençlerin büyüdüğü bilinmektedir ve bunu azaltmak için taşıtlara daha iyi aerodinamik tasarımlar yapılmaktadır (Profillidis 2014).



**Şekil 2.9** Hızın bir fonksiyonu olarak hava (aerodinamik) direnci ve mekanik direnç (Profillidis 2014).

Şekil 2.10’da, toplam hareket direnci (mekanik ve aerodinamik dirençler) hızın bir fonksiyonu olarak ve bu direncin üstesinden gelinmesi için gereken güç gösterilmiştir. Hızı 200 km/sa’dan 300 km/sa’ya çıkarmak için motor gücünün %200’den fazla artırılması gerektiği görülmektedir (Profillidis 2014).



**Şekil 2.10** Hızın bir fonksiyonu olarak toplam hareket direnci ve gerekli çekim gücü (Eğimsiz bir hat üzerinde, Fransız TGV treni için) (Profillidis 2014).

### 2.3.1.1 Demiryolu Kuruluşlarının Doğru ve Düzlükteki Direnç İçin Kullandığı Bağlıntılar

Denklem 2.13’te verilen doğru ve düzlükteki direncin genel bağıntısındaki A, B, C parametrelerinin değerleri, demiryolu taşıtlarının özelliklerine bağlıdır. Çeşitli demiryolu taşıt üreticileri ve bazı demiryolu kuruluşları, bu parametreler için deneysel formüller geliştirmiştir. Çeşitli demiryolu idareleri tarafından kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir (Profillidis 2014).

#### a. Fransız Demiryollarının (SNCF) Kullandığı Bağlıntılar

Dizel veya elektrikli lokomotifler için doğru ve düzlükteki direnç ( $R_L$ ) Denklem 2.17 ile bulunmaktadır (Profillidis 2014).

$$R_L = 0,65 \cdot M_L + 13 \cdot n + 0,01 \cdot M_L \cdot V + 0,03 \cdot V^2 \quad (2.17)$$

$R_L$ : Doğru ve düzlükteki direnç (daN, dekanewton)

$M_L$ : Lokomotifin ağırlığı (ton)

$n$ : Lokomotifin dingil sayısı

$V$ : Lokomotifin hızı (km/sa)

Çekilen taşıt (vagon) tiplerinin farklılığından dolayı, birçok bağıntı geliştirilmiştir. Geliştirilen bağıntılar genellikle Denklem 2.13'deki  $B \times V$  ve  $C \times V^2$  terimlerinin birleştirilmesiyle basitleştirilmiştir. Bağıntılarda genel olarak, taşıtın 1 ton ağırlığı için hesap yapılır. Buna özgül direnç ( $r$ ) denir ve kg/t cinsinden ifade edilir. Özgül direncin taşıt ağırlığıyla çarpılması sonucunda toplam direnç bulunur. Denklem 2.18, 2.19, 2.20 ve 2.21'de bazı demiryolu taşıtı tipleri için doğru ve düzlükteki özgül direnç ( $r_L$ ) bağıntıları verilmiştir (Profillidis 2014).

- Bojili ve yolcu taşıyan taşıtlar için:

$$r_L = 1,5 + \frac{V^2}{4.500} \quad (2.18)$$

- UIC tarafından standartlaştırılmış taşıtlar için:

$$r_L = 1,25 + \frac{V^2}{6.300} \quad (2.19)$$

- Bojisiz (Dingilli) yolcu taşıtları ve ekspres yük trenleri için:

$$r_L = 1,5 + \frac{V^2}{2.000 \sim 2.400} \quad (2.20)$$

- Blok yük trenleri için:

$$r_L = 1,2 + \frac{V^2}{4.000} \quad (2.21)$$

Elektrikli demiryolu taşıtları çoğunlukla YHT hatlarında ve banliyö işletmesinde kullanılır. Elektrikli banliyö trenlerinde doğru ve düzlükteki direnç ( $R_L$ ) Denklem 2.22 ile hesaplanabilir (Profillidis 2014).

$$R_L = \left( 1,3 \cdot \sqrt{\frac{10}{m}} + 0,01V \right) M_{ET} + C \cdot V^2 \quad (2.22)$$

$$C = 0,0035 \cdot S + 0,0041 \cdot \frac{p \cdot L}{100} + 0,002 \cdot N \quad (2.23)$$

$R_L$ : Doğru ve düzlükteki direnç (kg)

$M_{ET}$ : Elektrikli yolcu treninin toplam ağırlığı (ton)

$m$ : Dingil başına düşen yük (ton)

$V$ : Taşıtın hızı (km/sa)

$S$ : Tren ön yüzeyinin kesit alanı ( $m^2$ ) ve genel olarak yaklaşık 10  $m^2$  alınır.

$p$ : Demiryolu taşıtının ray seviyesine kadar olan kısmi çevresidir ve genellikle 10 m olarak kabul edilir.

$L$ : Trenin boyu (m)

$N$ : Hareket halindeyken trenden yükseltilecek pantograf sayısıdır

$C$ : Hava direnci katsayısı

## **b. ABD Demiryollarının Kullandığı Bağntılar**

Amerikan demiryolları, doğru ve düzlükteki özgül direnç ( $r_L$ ) için Denklem 2.24'ü kullanır (Profillidis 2014).

$$r_L = 0,6 + \frac{20}{M} + 0,01 \cdot V + \frac{k}{m \cdot n} \cdot V^2 \quad (2.24)$$

$$k = C \cdot S \quad (2.25)$$

Denklemlerde;

$r_L$ : Doğru ve düzlükteki özgül direnç (lb/t<sub>s</sub>)

1 lb: 0,454 kg

1 t<sub>s</sub>: kısa ton = 2000 lb = 907,2 kg

M: Trenin ağırlığı (lb)

m: Dingil başına düşen yük (lb)

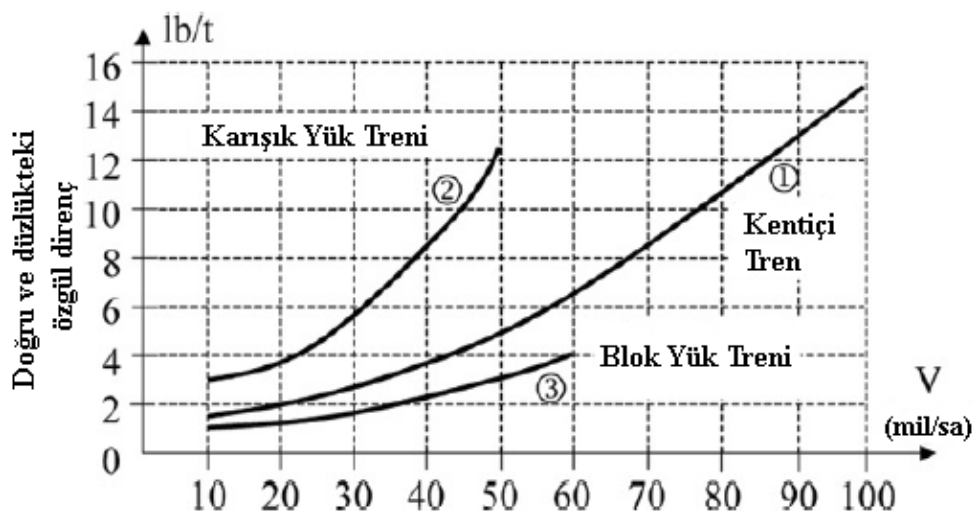
n: Dingil sayısı

V: Taşıtın hızı (mil/sa = 1,61 km/sa)

C: Hava direnci katsayısı (hesaplamalarla ilgili standartlardaki tablolardan elde edilir)

S: Tren ön yüzeyinin kesit alanıdır (ft<sup>2</sup>).

Şekil 2.11’de farklı özelliklere sahip demiryolu taşıtlarının doğru ve düzlükteki özgül dirençleri ( $r_L$ ) gösterilmiştir. 1 numaralı kent içi tren; hızı 80 mil/sa, dingil başına ağırlığı 25 t<sub>s</sub>, toplam ağırlığı 1600 kısa ton ve dizisinde 16 taşıt bulunan trendir. 2 numaralı farklı tipte vagonlara sahip karışık yük treni; hızı 60 mil/sa, dingil başına ağırlığı 15 t<sub>s</sub>, ortalama taşıt ağırlığı 45 kısa ton ve toplam ağırlığı 3000 kısa ton olan trendir. 3 numaralı aynı tip vagonlara sahip blok yük treni; hızı 60 mil/sa, dingil başına ağırlığı 60 t<sub>s</sub> ve dizisinde her birinin ağırlığı 240 kısa ton olan 21 taşıta sahip trendir (Profillidis 2014).



**Şekil 2.11** Farklı taşıt tiplerine göre Amerikan Demiryollarında doğru ve düzlükteki özgül dirençler (Profillidis 2014).

### c. Alman Demiryollarının Kullandığı Bağıntılar

Alman demiryolları yük trenleri için Denklem 2.26'da verilen Strahl formülünü kullanmaktadır (Profillidis 2014).

$$r_L = \frac{1}{10} \cdot \left[ 25 + k \cdot \left( \frac{V + V_{ör}}{10} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

Kent içi trenler için ise Denklem 2.27'de verilen Sauthoff formülü kullanılır (Profillidis 2014).

$$r_L = a + 0,0025 \cdot V + 0,48 \cdot F_e \cdot \frac{n_w + 2,7}{M} \cdot \left( \frac{V + 15}{10} \right)^2 \quad (2.27)$$

$r_L$ : Doğru ve düzlükteki özgül direnç (kg/t)

k: Karışık yük trenleri için 0,5; blok yük trenleri için 0,25 olan bir katsayı

V: Taşıtın hızı (km/sa)

$V_{ör}$ : Trene harekete zıt yönde önden etkiyen rüzgar hızıdır. Genellikle 15 km/sa alınır.

a: Makaralı rulman için 1,0 ve düz yatak için 1,9 değerini alan bir katsayı

$F_e$ : Trenin ön yüzey alanı özellikleriyle ilgili katsayıdır ve genellikle 1,45 alınır.

$n_w$ : Vagon sayısı

M: Trenin ağırlığı (ton)

### 2.3.2 Tünel Direnci

Açık havada hareket ile tünel içinde hareket karşılaştırıldığında, tünel içindeki hareketin, yolcu konforu üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan ani basınç artışları ve aynı zamanda artan aerodinamik dirençler, trenler geçerken ortaya çıkan problemler ve son olarak uygun havalandırmanın sağlanması gereksiniminden kaynaklanan belirli özellikleri vardır (Profillidis 2014).

### 2.3.2.1 Tünellerde Aerodinamik (Hava) Direncin Artması

Tünellerde artan aerodinamik dirençleri azaltmak için tünel boyunca yan duvarlarda açıklıklar bırakılarak, Çizelge 2.6'da görüldüğü üzere toplam hareket direncinin ve gerekli gücün azaltılması üzerine iyi sonuçlar alınmıştır. Örneğin, iki ayrı hattan oluşan Kanal (Manş) Tüneli'nde, her 375 metrede bir yanal açıklıklar, aerodinamik direncin üstesinden gelmek için gereken gücün 140 km/sa hızında 13,5 megawatt'tan (MW) 5,8 MW'ye düşmesine neden olmuştur (Profillidis 2014).

**Çizelge 2.6** Yan açıklıkları olan ve olmayan tünellerde, 705 ton ağırlığındaki bir tren için karşılaştırmalı olarak toplam hareket dirençleri ve gereken güçler (Profillidis 2014).

|                              | Açık Havada | Tünel İçinde             |                          |                                          |
|------------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
|                              |             | Her 250 m'de bir açıklık | Her 500 m'de bir açıklık | Açıklık yok ve tünelde bir tren daha var |
| Toplam Hareket Direnimi (kg) | 6.480       | 8.170                    | 8.830                    | 14.930                                   |
| Gerekli Güç (kW)             | 2.820       | 3.550                    | 3.840                    | 6.500                                    |

Çizelge 2.6' da görüldüğü üzere, tünel içinde her 250 metrede bir yanal açıklık bırakılması durumunda toplam hareket direnci yönünden, her 500 metrede açıklık bırakılan bir tünele göre 660 kg'lık bir azalma, gerekli güç yönünden ise 290 kW'lık azalma söz konusu olmaktadır.

Fransız ve İsveç demiryolu idarelerinin, Transit Avrupa Ekspresi (TEE) treni ile yaptığı deneysel çalışmalar kapsamında aerodinamik dirençleri azaltmak için tünellerin yan duvarlarında açıklıklar bırakılmış ve trenin toplam hareket dirençleri (mekanik ve aerodinamik dirençler) hesaplanmıştır. Bu deneysel çalışmalar sonrasında, doğru ve düzlükteki direnç ( $R_L$ ) ve tünel direnci ( $R_t$ ) için aşağıdaki bağıntılar geliştirilmiştir (Profillidis 1995).

- Yan açıklığın olmadığı tüneller için:

$$R_t = 1,107 + 8,25 \cdot V + 0,490 \cdot V^2 \quad (2.28)$$

- Her 250 m’de bir yan açıklığın bulunduğu tüneller için:

$$R_t = 1,107 + 8,25 \cdot V + 0,224 \cdot V^2 \quad (2.29)$$

- Her 500 m’de bir yan açıklığın bulunduğu tüneller için:

$$R_t = 1,107 + 8,25 \cdot V + 0,246 \cdot V^2 \quad (2.30)$$

- Açık havada hareket direnci:

$$R_L = 1,107 + 8,25 \cdot V + 0,158 \cdot V^2 \quad (2.31)$$

$R_L$ : Doğru ve düzlükteki direnç (açık havada) (kg)

$R_t$ : Tünel direnci (kg)

$V$ : Taşıt hızı (km/sa)

### 2.3.3 Yatay Dönemeç Direnci

Yatay dönemeçlerde oluşan dirençlerin bazı nedenleri vardır (Evren ve Dünder 2016).

- Tekerlek konikliğinin yatay dönemeç yarıçapına uygun olmaması nedeniyle tekerleklerden birinin ray üzerinde kayması sonucunda oluşan dirençler
- Dingillerin birbirlerine paralel bulunmaları nedeniyle tekerleklerin rayları kesmesi sonucunda oluşan dirençler
- Vagon başlarına etkiyen çekim kuvvetlerinin bir poligon şeklinde olması nedeniyle ortaya çıkan çekim kuvveti kayıplarının direnç olarak göz önüne alınması
- Budenlerle ray mantarlarının iç yanakları arasındaki sürtünmeyle tamponların birbirlerine sürtünmesinden doğan dirençler

Yatay dönemeçler boyunca meydana gelen özgül direnç ( $r_c$ ), Fransız Demiryolları (SNCF) tarafından Denklem 2.32’de verilen bağıntı ile bulunabilir.

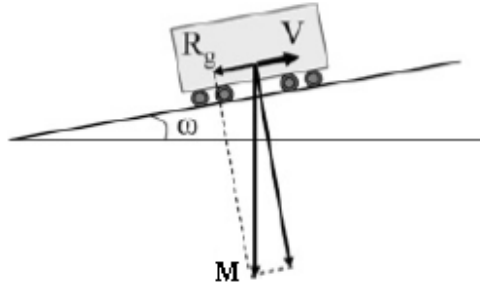
$$r_c = \frac{k_c}{R} \quad (2.32)$$

$k_c$ : 500-1200 arasında değişen bir katsayıdır ve genellikle 800 olarak alınır.

$R$ : Yatay dönemeç yarıçapı (m)

### 2.3.4 Eğim Direnci

Düz (eğimsiz) bir hat boyunca ilerleyen bir demiryolu taşıtında, yerçekimi yönüne dik olan kuvvet bileşkesi sıfırdır. Hattın düzlemi eğimli (rampa) olduğunda (örneğin, tren rampa yukarı veya rampa aşağı giderken), Şekil 2.12’de görüldüğü gibi hattın düzlemine paralel bir kuvvet bileşkesi ( $R_g$ ) ortaya çıkar. Rampa yukarı bir eğim durumunda bu kuvvet, taşıt hareketine karşı ek bir direnç yaratır. Rampa aşağı bir eğim durumunda ise taşıtın hızını artırıcı bir etki yaratır (Profillidis 2014).



**Şekil 2.12** Eğimli bir hatta taşıta etkiyen kuvvetler ve eğim direnci (Profillidis 2014).

Demiryolu hatlarında boyuna eğim az ve genellikle ‰20 dolaylarında olduğundan, eğim açısı ( $\omega$ ) çok küçük olmaktadır. Bundan dolayı  $\omega = \tan \omega$  kabulü yapılabilir. Eğim direnci, Denklem 2.33’de verilen bağıntı ile hesaplanabilir (Profillidis 2014).

$$R_g = M \cdot \sin \omega = M \cdot \tan \omega = M \cdot i \quad (2.33)$$

$M$ : Demiryolu taşıtının ağırlığı (kg)

$\omega$ : Boyuna eğim açısı

$i$ : Hattın boyuna eğimi (‰)

### 2.3.5 Toplam Direncin Bulunması

Demiryolunda dirençler 4 başlık altında incelenmiştir. Bunlar;

- Doğru ve düzlükteki özgül direnç ( $r_L$ ), Doğru ve düzlükteki direnç ( $R_L$ )
- Tünel özgül direnci ( $r_t$ ), Tünel direnci ( $R_t$ )
- Yatay dönemeç özgül direnci ( $r_c$ ), Yatay dönemeç direnci ( $R_c$ )
- Eğim özgül direnci ( $r_g$ ) Eğim direnci ( $R_g$ )

Toplam özgül direnç ( $r_{Tot}$ ), bu 4 direncin toplamıdır. Toplam özgül direnç bağıntısı Denklem 2.34'de verilmektedir.

$$r_{Tot} = r_L + r_t + r_c + r_g \quad (2.34)$$

Toplam direnç ( $R_{Tot}$ ), 4 direncin toplamıdır. Toplam direnç bağıntıları Denklem 2.35 ve Denklem 2.36'da verilmiştir.

$$R_{Tot} = (r_L + r_t + r_c + r_g) \cdot M \quad (2.35)$$

$$R_{Tot} = R_L + R_t + R_c + R_g \quad (2.36)$$

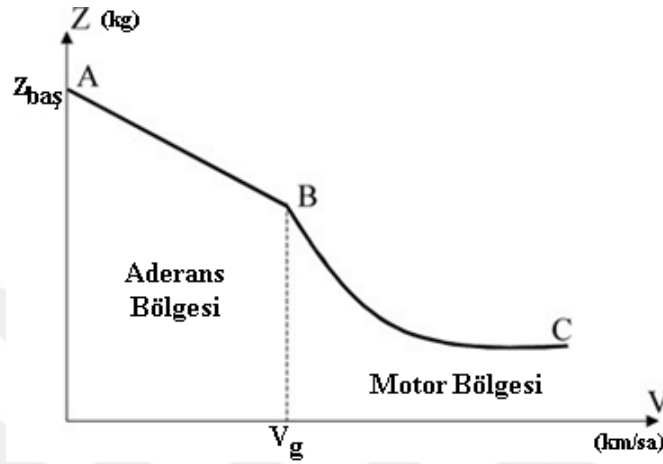
M: Demiryolu taşıtının ağırlığı (ton veya kg)

## 2.4 TRENLERİN HAREKETİ

### 2.4.1 Başlangıç ve Çekim Kuvvetleri

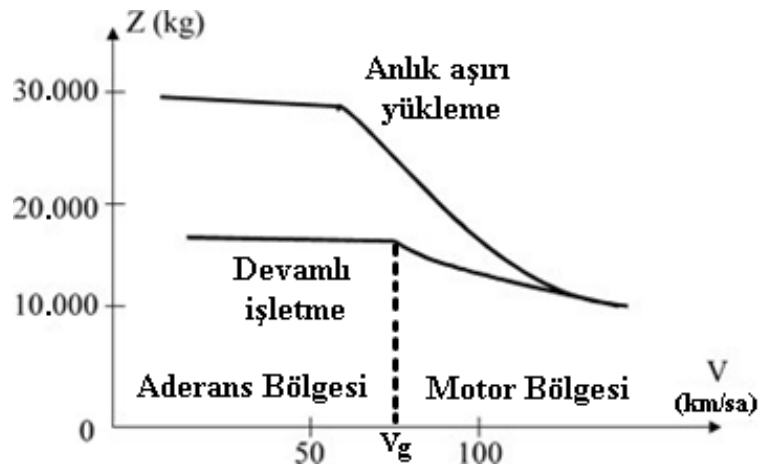
Başlangıç çekim kuvveti ( $Z_{baş}$ ), bir treni harekete geçirmek için gereken kuvvet olarak tanımlanır. Başlangıç çekim kuvveti, trene hareketi sırasında etkiyen tüm dirençlerin üstesinden gelmelidir. Teorik olarak, bir tren dizisinin tüm taşıtlarının aynı anda harekete geçtiği düşünüldüğünde, başlangıç kuvvetinin çok yüksek olması gerekirdi. Ancak pratikte, tren dizisinde birbirini izleyen taşıtlar arasındaki boşluklar nedeniyle tren bir blok olarak harekete

başlamadığından, durumun teorikteki gibi olduğu söylenemez. Tren harekete geçtikten sonra, hareketini sürdürmek için gerekli olan kuvvet (çekim kuvveti)  $Z$  ile gösterilir ve başlangıç kuvvetinden çok daha küçüktür.  $Z$ , bir ton vagon için gereken kuvveti gösteriyorsa, o zaman buna özgül çekim kuvveti denir ve  $z$  ile gösterilir. Şekil 2.13’de dizel çekimli, Şekil 2.14’de ise elektrik çekimli bir trenin çekim kuvveti-hız grafikleri verilmiştir (Profillidis 2014).



**Şekil 2.13** Dizel çekimli bir trenin çekim kuvveti-hız grafiği (Profillidis 2014).

Şekil 2.13’de görüldüğü gibi dizel çekimde, motorun ürettiği kuvvet hız arttıkça azalırken, en büyük çekim kuvveti tren hareket etmeye başladığında meydana gelir. Dizel çekimde hız arttıkça, çekim kuvveti genellikle doğrusal olarak (A-B arası) azalır ve hız daha da arttıkça, çekim kuvveti genellikle üstel bir eğri olarak azalır (B-C arası), çeken taşıtın en büyük hızına karşılık gelen minimumda yatay olur (Profillidis 2014).

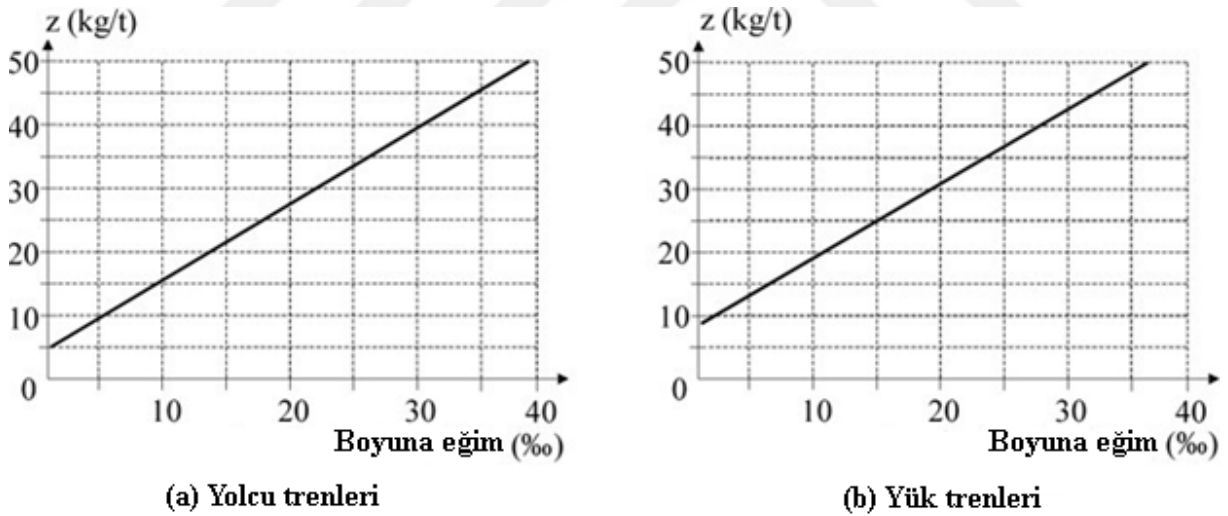


**Şekil 2.14** Elektrik çekimli bir trenin çekim kuvveti-hız grafiği (Profillidis 2014).

Şekil 2.14’de görüldüğü gibi elektrikli trenler, anlık aşırı güç yüklemelerine maruz kalabilir. Bu durumda çekim kuvveti devamlı çalışma durumuna göre daha büyüktür ve bu nedenle daha yüksek hızlara ulaşılabilir (Profillidis 2014).

Ayrıca Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’de gösterilen  $V_g$  geçiş hızı anlamına gelmektedir. Görüldüğü gibi  $V_g$  grafiği; aderans ve motor olmak üzere iki ayrı bölgeye ayırmaktadır. Geçiş hızına kadar olan bölgeye aderans, geçiş hızından sonraki bölgeye ise motor bölgesi denmektedir. Aderans bölgesi, taşıtın aderans kuvveti ile hareket ettiği kesimdir. Aderans bölgesinde, taşıtın motor gücü ile üretebileceği kuvvet aderans kuvvetinden daha fazla olmasına karşın, yuvarlanma hareketinin gerçekleşebilmesi için, taşıtın motor gücünden üretebileceği kuvvet yerine, aderans kuvveti kadar bir kuvvet üretilebilmektedir. Motor bölgesi ise taşıtın motor gücü karşılığında ortaya çıkan kuvvet ile hareket ettiği kesimdir. Burada geçiş hızı  $V_g$  grafik üzerindeki bu iki eğrinin ortak çözümü yapılarak bulunabilir.

Şekil 2.15’de, yolcu ve yük trenlerinde boyuna eğim ile özgül çekim kuvvetinin ilişkisi grafikler üzerinde örnek olarak verilmiştir (Profillidis 2014).



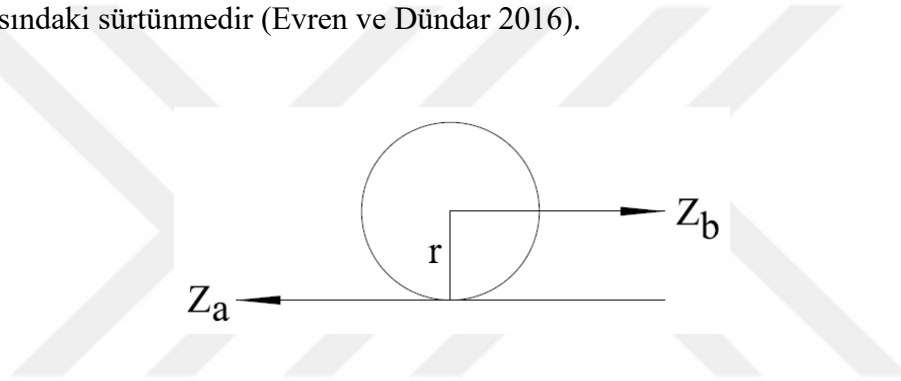
Şekil 2.15 Boyuna eğime göre özgül çekim kuvveti (Profillidis 2014).

Genellikle özgül çekim kuvvetinin normal değerleri, yolcu trenleri için 10-20 kg/t, yük trenleri için ise 10-30 kg/t aralığında olmaktadır (Profillidis 2014).

#### 2.4.2 Aderans Kuvvetleri

Kara taşıtlarının hareketleri, tekerleklerinin yuvarlanarak ilerlemesi anlamı taşıyan yuvarlanma hareketi sayesinde gerçekleşir. Bir tekerleğin yuvarlanma hareketi yapabilmesi için ray ile temas noktasının ilerlemeye olanak verecek desteği sağlaması, yani bu noktada kayma olmaması gerekir (Evren ve Dünder 2016).

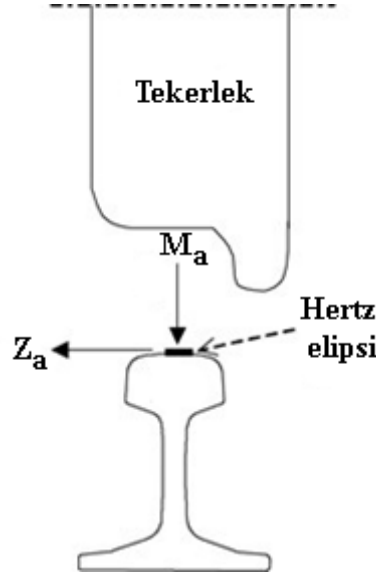
Bir demiryolu taşıtının yuvarlanma hareketi yapabilmesi için, Şekil 2.16'da görüldüğü üzere bir kuvvet çiftine gereksinim vardır. Bu kuvvetlerden ilki tekerlek bandajına etkiyen çekim kuvvetidir ( $Z_b$ ). İkinci kuvvet ise, tekerleğin raya temas noktasında ve çekim kuvvetine ters yönde etkiyen aderans kuvvetidir ( $Z_a$ ). Aderans kuvvetinin oluşmasının temel nedeni, ray ve tekerlek arasındaki sürtünmedir (Evren ve Dünder 2016).



Şekil 2.16 Tekerlekte oluşan kuvvet çifti (Evren ve Dünder 2016).

Tekerlek ve ray arasındaki temas, Şekil 2.17'de görüldüğü üzere Hertz elipsi olarak bilinen eliptik bir yüzey boyunca meydana gelir. Hertz elipsi boyunca, tekerleğin sürekli dönüşünü sağlamak için gerekli olan aderans kuvvetleri ( $Z_a$ ) ortaya çıkar. Aderans kuvvetinin, çekim kuvvetine eşit veya daha büyük olması gerekir (Profillidis 2014).

Aderans kuvvetinin hesabında aderans katsayısı ( $\mu$ ) denilen parametreden yararlanılır. Aderans katsayısı kaymaya neden olmaksızın tekerleğe uygulanabilen en büyük çekim kuvvetinin tahrikli (yürütücü) dingillere binen yüke (aderans ağırlığına) oranı olarak tanımlanabilir ve Denklem 2.37 ile hesaplanır (Evren ve Dünder 2016).

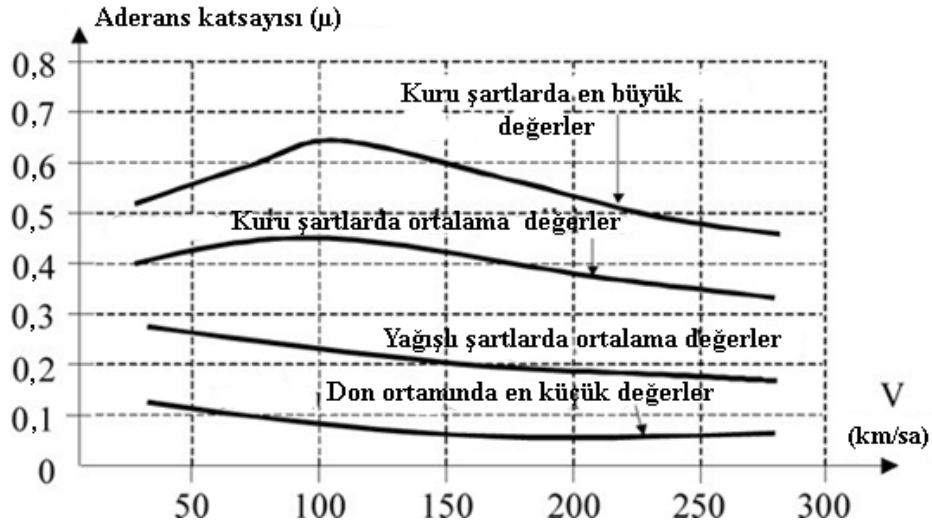


Şekil 2.17 Tekerlek-ray teması ve aderans kuvveti (Profillidis 2014).

$$\mu = \frac{Z_a}{M_a} \quad (2.37)$$

Bir katarda çeken taşıtın uygulayabileceği çekim kuvveti aderans kuvvetine bağlıdır. Dolayısıyla çekim kuvvetini artırabilmek için aderans kuvvetinin artırılması gerekmektedir. Bu amaçla aderans katsayısının veya ağırlığının artırılması gerekmektedir. Aderans katsayısının artırılması için ray üzerine kum dökülerek pürüzlülük artırılabilir. Ayrıca aderans ağırlığının artırılması dingillerin birbirine bağlanması suretiyle de sağlanabilir (Evren ve Dünder 2016).

Aderans katsayısı, rayın ve tekerleğin pürüzlülüğü ile bunların kuru veya nemli oluşu ve havanın yağışlı olup olmamasına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.18’de aderans katsayısının farklı koşullarda hıza bağlı olarak değişimi görülmektedir. Ayrıca,  $Z_a \geq Z$  koşulunun sağlanması için minimum aderans katsayısı ile ilgili çalışmalar yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.18** Aderans katsayısının farklı koşullarda hıza bağlı değişimi (Profillidis 2014).

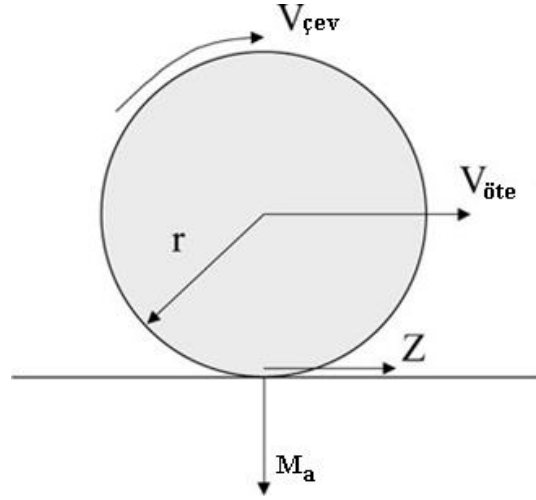
**Çizelge 2.7** Aderans katsayısı için en küçük değerler (Profillidis 2014).

| Çekim Evresi |              | Frenleme Evresi<br>(Elektrikli fren ile iniş rampasında) |              |
|--------------|--------------|----------------------------------------------------------|--------------|
| V (km/sa)    | $\mu_{\min}$ | V (km/sa)                                                | $\mu_{\min}$ |
| 160          | 0,30         | 0-200                                                    | 0,095        |
| 200          | 0,10         | 200-300                                                  | 0,060        |
| 300          | 0,07         |                                                          |              |

Aderans katsayısı hızla ilişkili olarak hesaplanmak istenirse Denklem 2.38 kullanılabilir (Profillidis 2014).

$$\mu = \frac{7,5}{V + 44} + 0,161 \quad (2.38)$$

Tren hareketi ile ilgili olarak, Şekil 2.19'daki gibi bir tekerleğin düzgün yuvarlanabilmesi için tekerleğin teorik çevresel hızının gerçek ötelenme hızından daha büyük olması gerekmektedir ve Denklem 2.39'da gösterilmiştir (Profillidis 2014).



**Şekil 2.19** Tekerlek üzerindeki hızlar ve kuvvetler (Profillidis 2014).

$$V_{\text{çev}} > V_{\text{öte}} \quad (2.39)$$

$$V_{\text{çev}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_d$$

$V_{\text{çev}}$ : Çevresel hız

$V_{\text{öte}}$ : Ötelenme hızı

$r$ : Dönme yarıçapı

$n_d$ : Devir sayısı

Aşağıda farklı koşullarda meydana gelebilecek durumlar verilmiştir.

- Eğer  $V_{\text{çev}} < V_{\text{öte}}$  ise, taşıt frenleme yapmaktadır.
- Eğer  $V_{\text{öte}} < V_{\text{çev}} \neq 0$  ise, taşıt tekerleğinde patinaj meydana gelmektedir.
- Eğer  $V_{\text{çev}} = 0 > V_{\text{öte}} \neq 0$  tekerlek kitlenmiştir ve taşıt kızaklıyordur (Profillidis 2014)

Yukarıda söylenenlerin tümünden, sabit veya artan tren hızında; çekim kuvvetinin, tren hareketi sırasında oluşan toplam dirence eşit veya daha büyük olması gerektiği anlaşılmaktadır (Profillidis 2014).

### 2.4.3 Hareket İçin Gerekli Tren Gücü

Tren hareketi için gerekli motor gücü, nominal güç (anma gücü) ile efektif güç olarak ikiye ayrılır. Nominal güç, motor üreticisi tarafından teorik olarak belirtilen güçtür. Motorun

yardımcı cihazları, nominal gücün bir kısmını kullanır ve bir kısmı da motor şaftından tekerleklerle aktarılırken kaybolur. Kalan güç, efektif güç olarak adlandırılır ve asıl olarak trene sağlanan güç bu olmaktadır. Motor gücü, beygir gücü (hp) veya kilowatt (kW) ile gösterilir. Motor gücü, buhar beygiri gücü (bb) cinsinden Denklem 2.40 ile hesaplanabilir. (Profillidis 2014).

$$N = \frac{Z(kg) \cdot V(km/sa)}{270} \quad (2.40)$$

Motor gücü, kilowatt (kW) cinsinden Denklem 2.41 ile hesaplanabilir (Evren ve Dünder 2016).

$$N = \frac{Z(kg) \cdot V(km/sa)}{367} \quad (2.41)$$

#### 2.4.4 Trenlerin Hızlanma ve Yavaşlama İvmeleri

Bir trenin hızlanma ve yavaşlama ivmeleri, tren tipine (yolcu, yük) ve trenin en büyük hızına ulaşması gereken uzunluğa bağlıdır. Bu uzunluk ne kadar kısa olursa (kent içi ve banliyö hatlarında olduğu gibi), hızlanma ve yavaşlama ivmeleri de o kadar yüksek olur. İnsan fizyolojisine ilişkin nedenlerden dolayı en büyük hızlanma ivmesi 1,0 m/sn<sup>2</sup>'yi geçmemelidir. Çeşitli demiryolu taşıtları için kabul edilebilir hızlanma ivmeleri aşağıda verilmiştir (Profillidis 2014).

- Yük trenleri için: 0,20-0,40 m/sn<sup>2</sup>
- Şehirlerarası (bölgesel) trenler için: 0,40-0,60 m/sn<sup>2</sup>
- Banliyö trenleri için: 0,60-0,80 m/sn<sup>2</sup>
- Metrolar için: 0,80-1,0 m/sn<sup>2</sup>

Yavaşlama ivmeleri ise şu şekildedir:

- Geleneksel (konvansiyonel) yük trenleri için: 0,10 m/sn<sup>2</sup>
- Ekspres yük trenleri için: 0,25 m/sn<sup>2</sup>
- Yolcu trenleri için: 0,40-0,50 m/sn<sup>2</sup>
- Banliyö ve metrolar için: 0,60 m/sn<sup>2</sup>

Yolcu konforu için kritik parametrelerden biri olan ivmenin zamana bağlı değişimi (sademe), 1,5 m/sn<sup>3</sup> değerini aşmamalıdır. Bu değer aşıldığında yolcular üzerinde rahatsız edici bir etki oluşmaya başlar (Profillidis 2014).

## 2.4.5 Trenlerde Frenleme

### 2.4.5.1 Fren Sistemleri

Trenlerde, pabuç (blok) fren ve disk fren olmak üzere iki ayrı fren sistemi kullanılmaktadır. Pabuç (blok) frenler, metal veya sentetik malzemelerden üretilmiş pabuçların, tekerleklerle yaptığı baskı ile ortaya çıkan sürtünme kuvveti ile çalışırlar. Frenleme yapılan dingillerin her iki tarafında da pabuç frenler bulunmaktadır. Disk frenlerde frenleme eylemi, frenleme yapılan dingillere sabitlenmiş çelik veya dökme demir diskler üzerinde oluşan sürtünme kuvveti ile elde edilir. Disk frenlerin kötü yanı, frenleme esnasında ve sonrasında 500 derecelere ulaşan yüksek sıcaklıkların oluşmasıdır (Profillidis 2014).

### 2.4.5.2 Trenlerde Fren Uzunluğu

Geçmişten günümüze farklı tren tipleri için deneysel çalışmaların sonucunda fren uzunluğunu ( $L_f$ ) tayin edebilmek için ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Bu bağıntılardan bazıları aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

Hızı 70 km/saatten küçük olan yük trenleri için fren uzunluğu  $L_f$  (m), Maison'un geliştirdiği bağıntı ile hesaplanabilir ve bu bağıntı Denklem 2.42'de verilmiştir (Profillidis 2014).

$$L_f = \frac{4,24 \cdot V^2}{1.000 \cdot \varphi_f \cdot \lambda_f + 0,0006 \cdot V^2 + 3 \mp i} \quad (2.42)$$

i: Boyuna eğim (‰ veya mm/m cinsinden). Boyuna eğim, aşağı yönlü olduğunda pozitif, yukarı yönlü ise negatif değer olarak hesaba katılır.

$\varphi_f$ : Boyuna eğime bağlı bir sürtünme katsayısıdır. Boyuna eğim ‰15'den küçük ise 0,10 alınır, büyük ise  $(0,10 - 0,00133 \times (i - 15))$  işlemi ile bulunur.

$\lambda_f$ : Frenleme ağırlığının toplam taşıt ağırlığına oranı olarak tanımlanan ve bir ton için gerekli frenleme kuvvetini gösteren frenleme yüzdesi.

Frenleme yüzdesi ( $\lambda_f$ ), fren uzunluğu için önemli bir parametredir. Çizelge 2.8’de, çeşitli demiryolu taşıtları ve frenleme durumları için  $\lambda_f$  değerleri verilmiştir (Profillidis 2014).

Ayrıca farklı tiplerde ve hızlardaki trenler için fren yüzdesine bağlı olarak fren uzunlukları Denklem 2.43 ve 2.44’de verilmiştir.

**Çizelge 2.8** Farklı tipte, frenleme durumları ve demiryolu taşıtları için fren yüzdesi ( $\lambda_f$ ) (Profillidis 2014).

|                                                        | Fren Yüzdesi<br>( $\lambda_f$ ) |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Normal frenleme durumunda</b>                       |                                 |
| Dingil yükü 15-20 ton aralığında olan çeken taşıtlar   | %80-%95                         |
| Dingil yükü 15-20 ton aralığında olan çekilen taşıtlar | %65-%90                         |
| <b>Acil frenleme durumunda</b>                         |                                 |
| Çeken taşıtlar                                         | %160-%220                       |
| Çekilen taşıtlar                                       | %130-%220                       |

Hızı 70 ile 140 km/sa arasında olan yolcu trenleri için fren uzunluğu, Denklem 2.43’de verilen Pedeluck bağıntısıyla elde edilebilir (Profillidis 2014).

$$L_f = \frac{\varphi_f \cdot V^2}{1,09375 \cdot \lambda_f + 0,127 - 0,235 \cdot i \cdot \varphi_f} \quad (2.43)$$

Dizel elektrikli yolcu taşıtların fren uzunluğunu bulmak için Denklem 2.44 kullanılabilir (Profillidis 2014).

$$L_f = \frac{0,0386 \cdot V^2}{\alpha_f - \frac{i}{100}} \quad (2.44)$$

$a_f$ : Trenin yavaşlama (frenleme) ivmesi

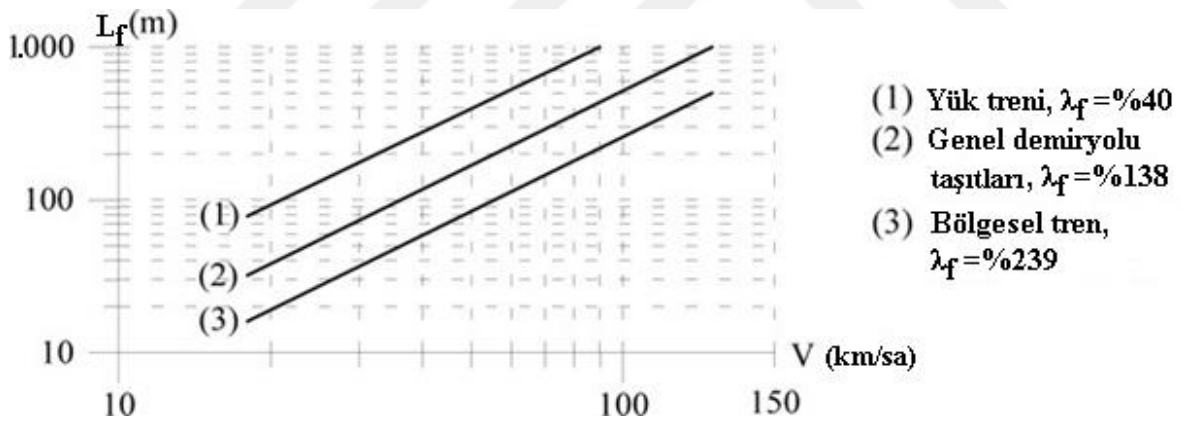
Yukarıda fren uzunluğu için verilen bağıntılar, Fransız Demiryolları tarafından geliştirilmiş ve UIC tarafından kabul edilmiştir. Ayrıca, Alman Demiryolları (DB) fren uzunluğunun hesabında, Minden bağıntılarını kullanır. Bu bağıntılar Denklem 2.45 ve 2.46'de verilmiştir (Profillidis 2014).

$$L_f = \frac{3,85 \cdot V^2}{\left[6,1 \cdot \Psi \cdot \left(1 + \frac{\lambda_f}{10}\right)\right] + i} \quad (2.45)$$

$$L_f = \frac{3,85 \cdot V^2}{5,1 \cdot \Psi \cdot \sqrt{\lambda_f - 5} + i} \quad (2.46)$$

$\Psi$ : Fren tipine göre değişen bir parametredir. 0,50-1,25 değerleri arasında bir değer alır.

Şekil 2.20'de; düşük ve orta hızlar, farklı tren tipleri ve fren yüzdeleri için fren uzunluğu gösterilmiştir.



**Şekil 2.20** Orta ve düşük hızlarda, eğimsiz bir hatta hıza göre fren uzunluğu (Profillidis 2014).

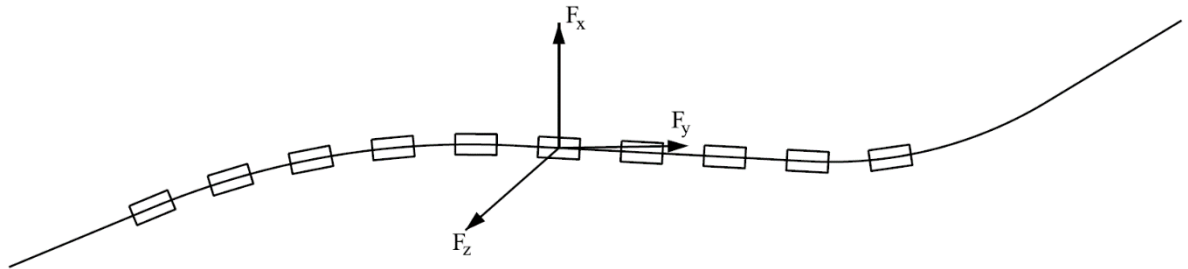
Yukarıdaki bağıntılarla hesaplanan fren uzunluğu, sinyalizasyon sistemine bağlı olarak uygulamada (güvenli tarafta kalabilmek adına) en az %10 artırılır. Hız ne kadar fazlaysa, fren uzunluğu de o kadar uzun olmaktadır. Bununla ilişkili olarak Çizelge 2.9'da, yüksek hızlarda hareket eden trenler için fren uzunlukları verilmiştir (Profillidis 2014).

**Çizelge 2.9** Yüksek hızlarda fren uzunlukları (Profillidis 2014).

| V (km/sa) | Fren Uzunluğu (m) |
|-----------|-------------------|
| 160       | 1.300-1.400       |
| 200       | 2.500-3.000       |
| 260       | 6.000-8.000       |
| 320       | 7.500-9.000       |

#### 2.4.6 Trenlerin Genel Hareket Denklemi

Bir katardaki her bir demiryolu taşıtının hareketi, katardaki diğer taşıtlardan bağımsız olarak incelenebilir ve hareket denklemi elde edilebilir. Fakat bu tür bir inceleme katar hareketinin incelenmesini zorlaştırır. Bu nedenle, katarı oluşturan tüm taşıtlar tek bir nesne olarak ele alınıp tüm kütlenin ağırlık merkezinde toplandığı bir taşıt olduğu varsayılarak incelenmektedir. Böylece katarın hareketi daha kolay incelenebilmektedir. Bu şekilde incelenen bir katarın hareketi, Şekil 2.31’de görüldüğü gibi, herhangi bir noktaya etkiyen  $F$  kuvvetinin, normal kuvvet ( $F_x$ ), teğet (boyuna) kuvvet ( $F_y$ ), ve düşey kuvvet ( $F_z$ ) bileşenleri hesaplanabilir. Bu kuvvetleri hesaplamak için kullanılan bağıntılar Denklem 2.47 ve Denklem 2.48’de verilmiştir. (Evren ve Dündar 2016).



**Şekil 2.21** Demiryolu katarının bir eksen boyunca hareketi (Evren ve Dündar 2016).

$$F_x = M \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2.47)$$

$$F_y = M \cdot a = M \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.48)$$

$$F_z = 0 \quad (2.49)$$

$v$ : Taşıtın hızı (m/sn)

$\alpha$ : Taşıtın ivmesi (m/sn<sup>2</sup>)

M: Taşıtın toplam kütlesi (kg)

R: Eğrilik yarıçapı (m)

$\Delta v$ : Hız farkı

$\Delta t$ : Zaman farkı

Bir demiryolu katarının hat eksenine göre normal ( $F_x$ ) ve düşey ( $F_z$ ) doğrultudaki hareketleri sınırlandırılmaktadır. Bu yüzden yalnızca eksene göre teğet doğrultudaki ( $F_y$ ) hareketin incelenmesi gerekmektedir (Evren ve Dünder 2016).

Katar oluşturan taşıtlarda dönme hareketi yapan dingiller, aydınlatma dinamoları, aktarma organları gibi kısımlar bulunmaktadır. Dönme hareketi yapan bir cisim, durağan haldekine kıyasla daha büyük bir kütleyle sahip olmaktadır. Bu nedenle hareket halindeki bir trenin kütlesi ( $M_{har}$ ) Denklem 2.50'den bulunabilir (Evren ve Dünder 2016).

$$M_{har} = M_{dur} + \sum \frac{I}{r^2} \quad (2.50)$$

$M_{har}$ : Trenin hareketli kütlesi

$M_{dur}$ : Trenin durağan kütlesi

I: Dönme hareketi yapan kısımların kutupsal atalet momentleri

r: Dönme yarıçapı

Denklem 2.50'de düzenlemeler yapıldıktan sonra Denklem 2.51'deki halini alır.

$$M_{har} = M_{dur} \cdot \left( 1 + \frac{1}{M_{dur}} \cdot \sum \frac{I}{r^2} \right) \quad (2.51)$$

$$\left( \frac{1}{M_{dur}} \cdot \sum \frac{I}{r^2} \right) = \xi \quad (2.52)$$

$$M_{har} = M_{dur} \cdot (1 + \xi) \quad (2.53)$$

$\xi$  : Kütle artış katsayısı

Kütle artış katsayısı, dönme hareketi yapan kısımların sayısına ve ağırlıklarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle çeken ve çekilen taşıtlar için farklı değerler almaktadır. Uygulamada ortalama olarak 0,06-0,10 aralığında bir değer olarak kullanılır (Evren ve Dündar 2016).

Yukarıdaki denklemlerden yola çıkarak  $F_y$  kuvvetinin bağıntısı (Denklem 2.48) düzenlendiğinde Denklem 2.54'deki gibi olur (Evren ve Dündar 2016).

$$F_y = M \cdot a = M \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = (1 + \xi) \cdot M \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.54)$$

Katara etkiyen net kuvvetin iki bileşkesi vardır. Bunlar, çeken taşıtın uyguladığı çekim kuvveti ( $Z$ ), diğeri de katar hareketine zıt yönde etkiyen ve harekete karşı koymaya çalışan direnç kuvvetleridir ( $R_{Tot}$ ). Bu iki kuvvet altında  $F_y$  kuvvetinin eşitliği Denklem 2.55'deki gibi olur (Evren ve Dündar 2016).

$$F_y = Z - R_{Tot} \quad (2.55)$$

$$(1 + \xi) \cdot M \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = Z - R_{Tot} \quad (2.56)$$

$$(1 + \xi) \cdot \frac{M}{g} \cdot 1000 \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = Z - R_{Tot} \quad (2.57)$$

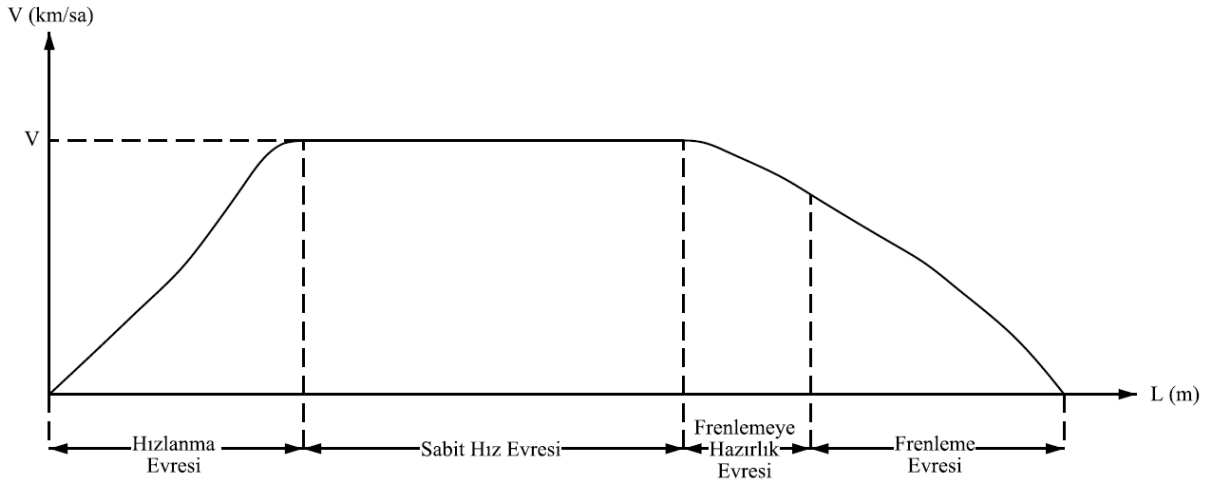
$$\frac{1000 \cdot (1 + \xi)}{g} = \beta \quad (2.58)$$

$$\beta \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Z}{M} - \frac{R_{Tot}}{M} \quad (2.59)$$

$$\beta \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{Z}{M} - r_{Tot} \quad (2.60)$$

#### 2.4.7 Tren Hareket Evreleri

Bir trenin hareketinde genel olarak, Şekil 2.22’de görüldüğü üzere dört evre söz konusudur. İlk evre, başlangıç (sıfır) hızından başlayarak harekete geçip belirli bir sabit hıza (rejim hızına) ulaşmadır. İkinci evre rejim hızının sürdürüldüğü evredir. Geçkinin farklı kesimlerindeki rejim hızları farklı olabilir. Bu durumda birinden ötekine hızlanarak veya yavaşlayarak geçmek gerekmektedir. Üçüncü evrede, varış noktasına yaklaşıldığında çekim kuvvetini keserek hız azaltılır. Bu evre frenlemeye hazırlık evresi diye adlandırılır. Son evre olan frenleme evresinde varış noktasında durabilmek amacıyla hareket yönüne ters yönde fren kuvveti uygulanır (Evren ve Dünder 2016).



Şekil 2.22 Trenin hareket evreleri (Evren ve Dünder 2016).

##### 2.4.7.1 Hızlanma (Demeraj) Evresi

Hızlanma evresinde katarın harekete geçerek belirli bir rejim hızına ulaşması söz konusudur. Bu evrede, hareketin hızlanan (ivmeli) bir hareket olması nedeniyle çekim kuvvetinin harekete karşı koyan dirençlerden büyük olması zorunludur. Yani  $Z - R_{Tot} > 0$  olmalıdır. Bu evredeki hareketin genel denklemi Denklem 2.61’deki gibi olur (Evren ve Dünder 2016).

$$(1 + \xi) \cdot M \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = Z - R_{Tot} \quad (2.61)$$

Hızlanma evresindeki katarın yolculuk süresi Denklem 2.62'den  $\Delta t$ 'nin bulunması ile elde edilir (Evren ve Dünder 2016).

$$\Delta t (sn) = \frac{\frac{\Delta V}{3,6}}{\frac{Z}{M} - r_{Tot}} \cdot \beta \quad (2.62)$$

Hızlanma evresindeki katarın  $V_1$  hızından  $V_2$  hızına çıkış boyu, yani kat edilen uzunluk Denklem 2.63'deki bağıntı ile bulunabilir (Evren ve Dünder 2016).

$$\Delta \ell (m) = \Delta t \cdot \frac{V_{ort}}{3,6} \quad (2.63)$$

$$V_{ort} = \frac{V_2 - V_1}{2} \quad (2.64)$$

#### 2.4.7.2 Sabit Hız (Rejim) Evresi

Sabit hız (rejim) evresinde ivmenin sıfır olmasından dolayı  $Z - R_{Tot} = 0$  ( $Z = R_{Tot}$ ) olmaktadır. Yani, çekim kuvveti, toplam direnç kuvvetlerine eşit olmaktadır. Hat ve tren karakteristiklerinin seçimi ve saptanması ile ilgili tüm sorunlar sabit hız evresi göz önüne alınarak çözümlenir (Evren ve Dünder 2016).

#### 2.4.7.3 Frenleme Evresi

Frenleme evresinde çekim kuvveti uygulanmamakla birlikte aynı zamanda hareket yönüne ters yönde olmak üzere fren kuvveti ( $F_f$ ) uygulanır. Bu evrede hareket bağıntısı Denklem 2.65'deki gibidir (Evren ve Dünder 2016).

$$(1 + \xi) \cdot M \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = -F_f - R_{Tot} \quad (2.65)$$

## BÖLÜM 3

### YATAR GÖVDELİ TRENLER

Günümüzdeki demiryolu hatlarının büyük bir kısmı, bir asır ve daha uzun bir süre önce inşa edilmiştir. Dolayısıyla, birçok demiryolu hattının geometrik özellikleri halen ilk inşa edildiği günkü özellikleri taşımakta ve özellikle dağlık alanlardaki hatlarda halen çok küçük yarıçaplara sahip hat geometrileri bulunmaktadır. İnşa edildiği zamanların şartlarını sağlayan bu hatlar, günümüz teknoloji ve ulaşım gereksinimleri karşılayamamakta ve inşa edildiği zamandaki hızlar, günümüz için düşük kalmaktadır (Profillidis 2014).

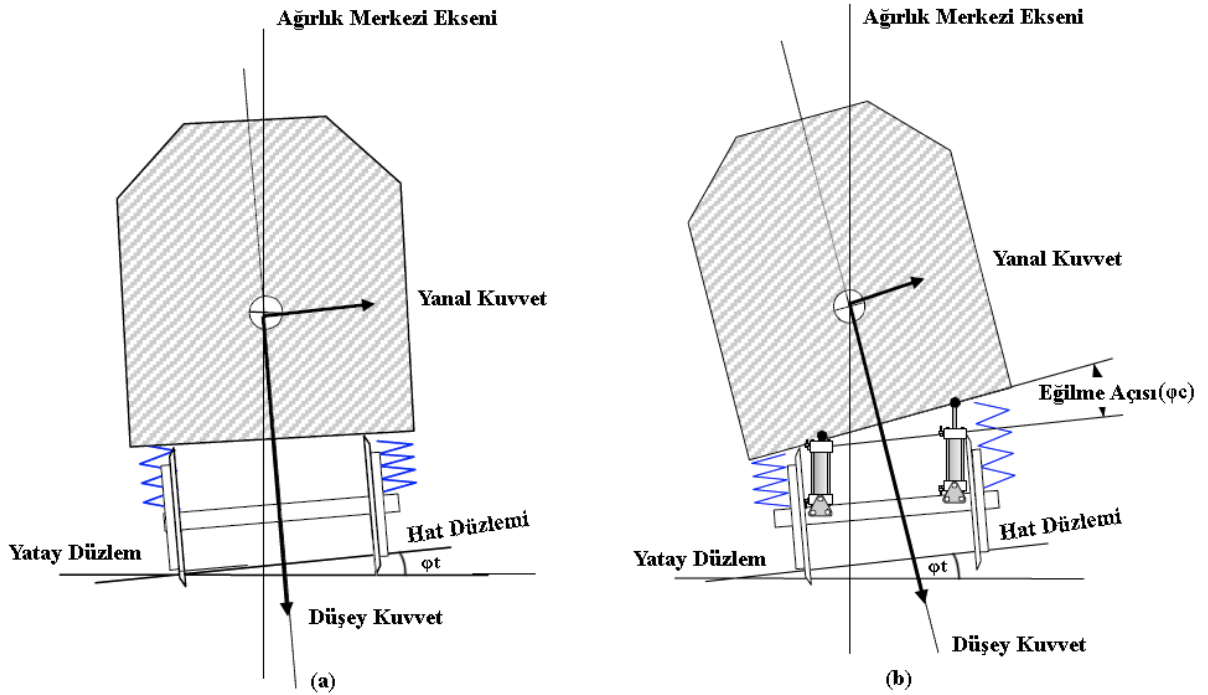
Geçtiğimiz 60 yıl boyunca, demiryolu idareleri, çoğu zaman küçük yatay dönemeç yarıçapı sorununa değinmeden, temel hat bileşenlerini (raylar, traversler, balast, sinyalizasyon, vb.) iyileştirerek teknolojik gelişmelerin getirdiği yeniliklere uyum sağlamaya çalışmışlardır. Yine de bu konuda bazı istisnalar vardır. Örneğin, dünyanın bazı bölgelerinde eski hatlar yerine yeni yüksek hızlı hatlar inşa edilmiş ve bazı mevcut hatların geometrik özelliklerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Bu çalışmalara karşın demiryolu hatlarının çoğunda, ilk inşa edildikleri zamandaki özelliklerin üzerine çok bir katkı sağlanamamıştır. Demiryolu idareleri, yeni bir yüksek hızlı hat inşasının yüksek maliyetleri ve uzun inşa süreleri gibi nedenlerden dolayı, yeni hatlar inşa etmek yerine mevcut hatların altyapı ve geometrik özelliklerinin iyileştirilmesini sağlayarak, yolculuk sürelerini kısaltmak suretiyle ulaşım gereksinimlerini karşılamak istemektedir (Profillidis 2014). Mevcut hatlar üzerinde geometrik özellikleri değiştirmeden hız artışının sağlanması ve yolculuk sürelerinin kısılmasını sağlayacak olan yatar gövdeli tren teknolojisi, demiryolu idarelerine başka bir çözüm seçeneği sunmaktadır.

Yatar gövdeli trenler, yatay dönemeçlerden geçerken, trenin taşıt gövdesini eğen bir mekanizma sayesinde mevcut demiryolu hatlarında işletilebildiğinden ve yatar gövdeli olmayan normal trenlerle karşılaştırıldığında daha yüksek hızlara ulaşabildiğinden, yeni bir hat inşasına göre düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır (Profillidis 2014).

### 3.1 YATAR GÖVDELİ TREN TEKNOLOJİSİ

Yatar gövdeli trenler, mevcut hatların hızlarının yükseltilmesi amacıyla hat geometrisinde yapılacak maliyeti yüksek düzeltmeleri azaltmak ve hat iyileştirmelerine ek olarak hızları yükseltmek için kullanılmaktadır. Altyapıda daha az değişikliklerle daha yüksek hızlara çıkılmasına izin veren bu taşıtlar, yatay dönemeçlerden geçtikleri sırada yarıçapa ve hıza uygun bir açıyla dönemeç merkezine doğru eğilirler. Eğilme, Şekil 3.1(b)'de görüldüğü gibi, bojinin vagon gövdesine göre yaptığı dönme hareketiyle veya tekerlekten raya gelen kuvvetlerdeki değişimle 6 veya 8 derece açılı olacak şekilde sağlanır. Trenler, bu eğilme sayesinde dengelenmemiş merkezkaç ivmesini (konfor ivmesini) azaltırlar (Evren ve Dünder 2016).

Şekil 3.1 (a)'da, yatay dönemeçte, normal bir demiryolu taşıtına, Şekil 3.1 (b)'de ise yatar gövdeli bir demiryolu taşıtına etkiyen kuvvetler ve gövdenin dönemeç içine yatmasından dolayı ortaya çıkan eğim açısı ( $\phi_c$ ) görülmektedir. Yatar gövdeli trenlerdeki kuvvetlerin dengeleri Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 ile gösterilebilir.



**Şekil 3.1** Yatar gövdeli olmayan trenler (a) ile yatar gövdeli trenlere (b) yatay dönemeç üzerinde etkiyen kuvvetler (Persson 2007).

Yatay dönemeçte taşıta etkiyen kuvvetler bu tezin 2. bölümünde incelenmişti. Yatay ve düşey ivmelerin bağıntıları, sırasıyla Denklem 2.2 ve Denklem 2.3’de verilmişti. Yatar gövdeli trenlerde bu bağıntılardaki duruma ek olarak eğilme açısı ( $\varphi_c$ ) dahil olmaktadır. Yani, deverden dolayı oluşan kot farkı ile yatay düzlem arasındaki açıya ( $\varphi_t$ ) ek olarak, yatar gövdeli trenlerin dönemeç içine eğilmesinden dolayı ortaya çıkan eğilme açısı ( $\varphi_c$ ) da hesaba katılmaktadır.

Yatay ve düşey ivme için bağıntılar bu duruma göre düzenlendiğinde aşağıdaki halleri almaktadır (Persson 2007).

$$a_y = \frac{v^2}{R} \cdot \cos(\varphi_t + \varphi_c) - g \cdot \sin(\varphi_t + \varphi_c) \quad (3.1)$$

$$a_z = \frac{v^2}{R} \cdot \sin(\varphi_t + \varphi_c) + g \cdot \cos(\varphi_t + \varphi_c) \quad (3.2)$$

Eğilme açısının hesaba katılmasıyla veya daha yüksek deverler verilerek dever açısının artırılmasıyla, yanal ivmede bir azalma söz konusu olmaktadır. Fakat aynı zamanda, düşey ivme de biraz artmaktadır. Çizelge 3.1’de bu duruma örnek bazı hesaplamalar gösterilmiştir (Persson 2007).

**Çizelge 3.1** Bir yatay dönemeçte, yatar gövdeli trenler için hesaplanmış bazı değerler (Persson 2007).

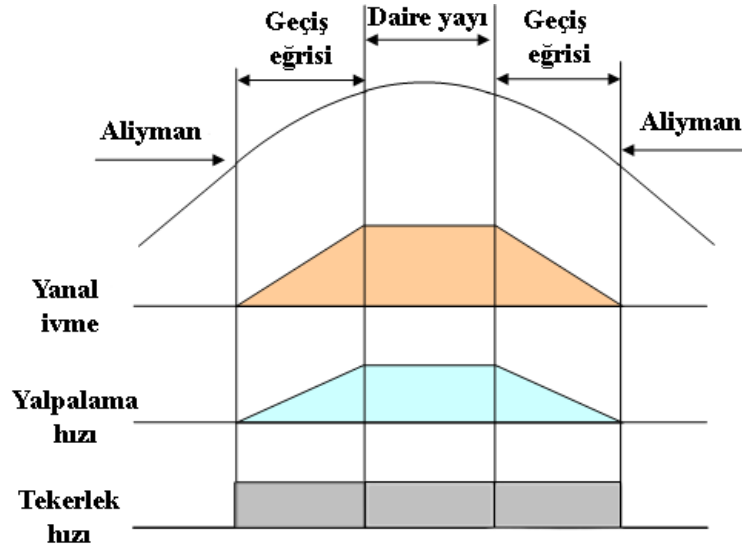
| Hız<br>(km/sa)                                                                                                                                                                | Dönemeç<br>yarıçapı<br>(R, m) | Dever<br>(D, mm) | Taşıt eğilme<br>açısı ( $\varphi_c$ ) | Yanal ivme<br>( $a_y$ , m/sn <sup>2</sup> ) | Düşey ivme<br>( $a_z$ , m/sn <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 113                                                                                                                                                                           | 1000                          | 0                | 0                                     | 0,98 <sup>2</sup>                           | 0                                           |
| 113                                                                                                                                                                           | 1000                          | 150              | 0                                     | 0                                           | 0,05                                        |
| 160                                                                                                                                                                           | 1000                          | 150              | 0                                     | 0,98                                        | 0,15                                        |
| 166                                                                                                                                                                           | 1000                          | 150              | 6,5 <sup>1</sup>                      | 0                                           | 0,23                                        |
| 201                                                                                                                                                                           | 1000                          | 150              | 6,5 <sup>1</sup>                      | 0,98 <sup>2</sup>                           | 0,44                                        |
| <p>1: Taşıt eğilme açısı, aktif sistemli bir yatar gövdeli trenden ölçülmüştür.<br/> 2: Gerçek değer, süspansiyonlardaki yuvarlanma nedeniyle %15 ila %30 daha yüksektir.</p> |                               |                  |                                       |                                             |                                             |

Çizelge 3.1’deki hesaplanan değerlerden de görüldüğü üzere, yalnızca devertle dengelenmiş bir yanal ivme, eğilme açısı devreye girdiğinde, daha yüksek hızlarda bile dengelenip etkisi azaltılmaktadır. Etkisi azalan yanal ivmeyi, eğilme açısı olmadığı durumdaki değerine tekrar ulaştırabilmek için hızların artırılabilirdiği görülmektedir.

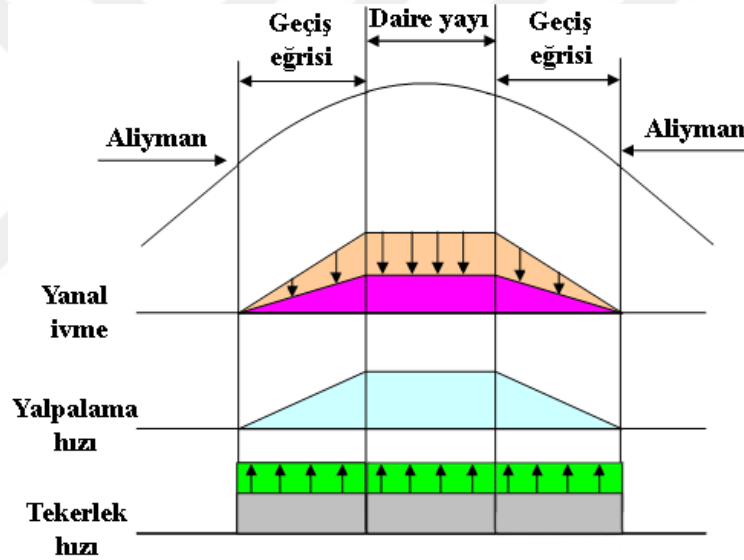
Normal ve yatar gövdeli trenlerde, yatay dönemeçlerden geçerken ortaya çıkan yanal ivmeleri araştırmak için bazı çalışmalar yapılmıştır. Şekil 3.2’de, yatay dönemeçten geçişi sırasında normal bir trenin hız ve ivme değişimleri ölçeksiz olarak gösterilmiştir. Şekil 3.3’de ise yatay dönemeçten geçişi sırasında yatar gövdeli bir trenin hız ve ivme değişimleri ölçeksiz olarak gösterilmiştir. Bu çalışmalar sırasında taşıtlar, aynı hat kesiminde, eğimsiz bir hat üzerinde ve eşit hızlarda hareket ettirilmiştir. Taşıtlar yalnızca normal ve yatar gövdeli tren olarak farklılık göstermektedir (Rochat 2007).

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, normal bir tren, sabit bir hız (gri alanlar) ile teğetten geçiş eğrisine girdiğinde, yanal ivmenin etkisine maruz kalmakta ve bu etki daire yayı boyunca sabit olarak devam etmekte ve çıkış geçiş eğrisinde azalarak teğette sonlanmaktadır. Buradaki yanal ivmenin etkisi, devert durumu ile orantılı olmaktadır (Rochat 2007).

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi, yatar gövdeli bir tren, yatay dönemeçten geçerken normal trenle aynı etkilere maruz kalmaktadır. Fakat maruz kaldığı etki aynı olmasına karşın bu etkilerin şiddetleri daha düşük olmaktadır. Burada, yatar gövdeli trenin, geçiş eğrisi başladığı andan itibaren eğilmeye başladığı varsayılmıştır. Normal trenle aynı hızda dönemece giren yatar gövdeli trene, Şekil 3.3’de görüldüğü gibi daha az (mor alan) bir yanal ivme etkimektedir. Aynı yanal ivme etkisinin ortaya çıkması için ise Şekil 3.3’de görüldüğü üzere, tekerlek hızı grafiğindeki yeşil alanlar kadar hız yükseltilmesi gerekmektedir. Bu da, yatar gövdeli trenlerin eğilme özelliğinin getirdiği fayda ile eksik devert sınırını yükseltmesiyle (dolaylı olarak) yanal ivmenin etkisini azaltıcı yönde bir etki yaratmaktadır (Persson 2007).



Şekil 3.2 Normal bir trene yatay dönemeçten geçerken etkiyen ivme ve hızlar (Rochat 2007).



Şekil 3.3 Yatar gövdeli bir trene yatay dönemeçten geçerken etkiyen ivme ve hızlar (Rochat 2007).

Mevcut bir hat üzerinde, altyapıda ve geometride bir değişiklik yapılamayacağından, uygulanmış deverler ve yatay dönemeç yarıçapları aynı kalacaktır. Yatar gövdeli trenlerin eğilmesi, devere ek olarak fazladan bir merkezci kuvvet ortaya çıkarır. Ortaya çıkan bu merkezci kuvvete karşılık azalan merkezkaç kuvvetin de eski değerlerine getirilebilmesi için artırılması gerekir. Geometrik özellikler (dönemeç yarıçapı) ve uygulanan dever değiştirilemediği için merkezkaç kuvvet, yalnızca taşıtın hızı yükseltildiğinde artırılabilir. Taşıtın hızı artırıldığında denge (teorik) deveri de artacaktır. Uygulanmış dever değişmediği ve

denge (teorik) deveri artacağı için eksik dever miktarı artacaktır. Bu eksik dever miktarı, yatar gövdeli trenlerin sunduğu teknoloji ile karşılanmaktadır. Daha önce Çizelge 2.3’de gösterildiği üzere, yatar gövdeli trenlerin eksik dever üst sınırları, normal trenlere göre oldukça yüksektir. Bu sayede yatar gövdeli trenler, mevcut hatlar üzerinde değişiklik yapılmadan, hızın yükselmesiyle ve eksik dever üst sınırının fazla olması sebebiyle kullanılabilir.

### **3.1.1 Yatar Gövdeli Trenlerin Eğilme Sistemleri**

Yatar gövdeli trenlerde iki eğilme teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, taşıt gövdesi eğilmesinin gerçekleşme yöntemine bağlı olarak pasif eğilme ve aktif eğilme olmak üzere iki türde incelenir (Profillidis 2014).

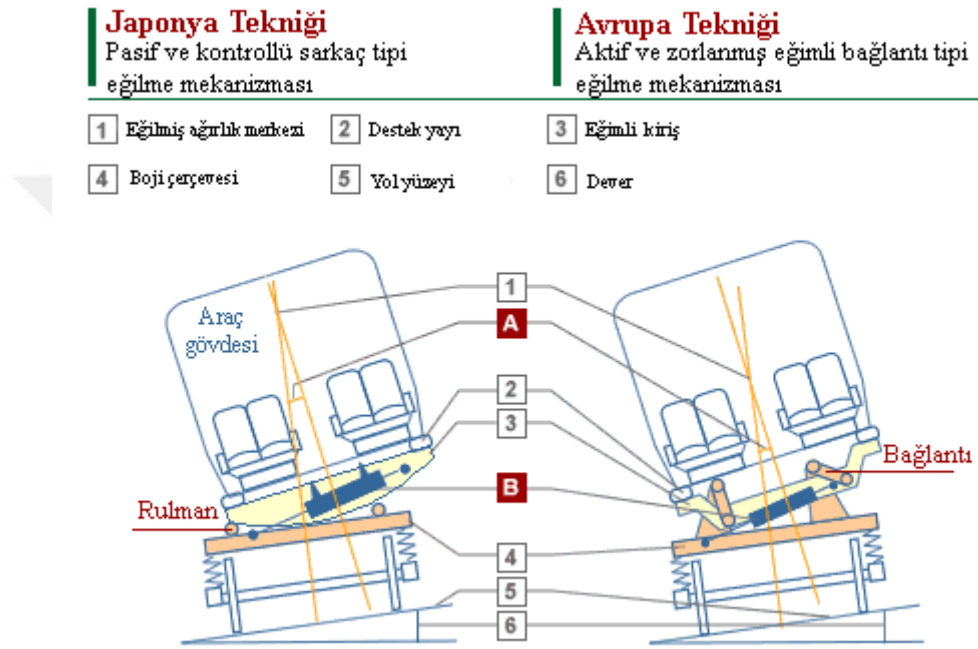
#### **3.1.1.1 Pasif Eğilme Sistemi**

Pasif eğilme sisteminde eğilme, elektronik sistemlerle değil, taşıtın kendi atalet kuvvetlerinin etkileriyle sağlanır. Bu tip eğilme sistemine sahip taşıtlar, yatay dönemeçte ortaya çıkan merkezkaç kuvvetinin, taşıtı eğilmeye zorlaması için ağırlık merkezinin yeri normal trenlere göre daha alçakta olacak şekilde üretilmiştir. Bu şekilde merkezkaç kuvvetinin etkisiyle taşıtlar eğilmeye uygun hale getirilmiştir. Bu eğilme sistemi, ilk olarak ABD’de geliştirilmiş ve taşıtlara uygulanmıştır. Daha sonra, İspanya’da da bu sisteme sahip taşıtlar (Talga) üretilmiş ve işletilmiştir. Pasif eğilme sistemi kullanılarak, taşıt gövdesi ile boji arasındaki eğilme açısı ( $\phi_c$ ) 3 ile 5 derece arasında bir değere ulaşabilmektedir (Pyrgidis 2016).

#### **3.1.1.2 Aktif Eğilme Sistemi**

Aktif eğilme sisteminde, istenen eğilme açısını elde etmek ve elde ettikten sonra korumaktan daha önemli olan, taşıtın gövdesinin, doğru zamanda eğilmeye başlamasını sağlamaktır. Eğilmenin iki sistem için de, taşıtın geçiş eğrisine girmeden çok az bir süre önce gerçekleşmeye başlaması istenmektedir. Taşıtın gövdesi eğildikten sonra yine aynı şekilde geçiş eğrisinden çıktıktan sonra da, teğette tekrar eğimsiz haline gelmesi ve bu işlemin zamanında gerçekleşmesi önemlidir. Eğer bu işlem zamanında gerçekleşmez ise, taşıt içindeki yolcular, çok kısa süreli de olsa şiddetli bir yanal etkiye maruz kalabilirler. Ayrıca, iki ters yatay dönemeçte gerçekleşebilecek bir zamanlama sorunu, bu etkilerin daha da şiddetli hissedilmesine sebep olabilmektedir (Pyrgidis 2016).

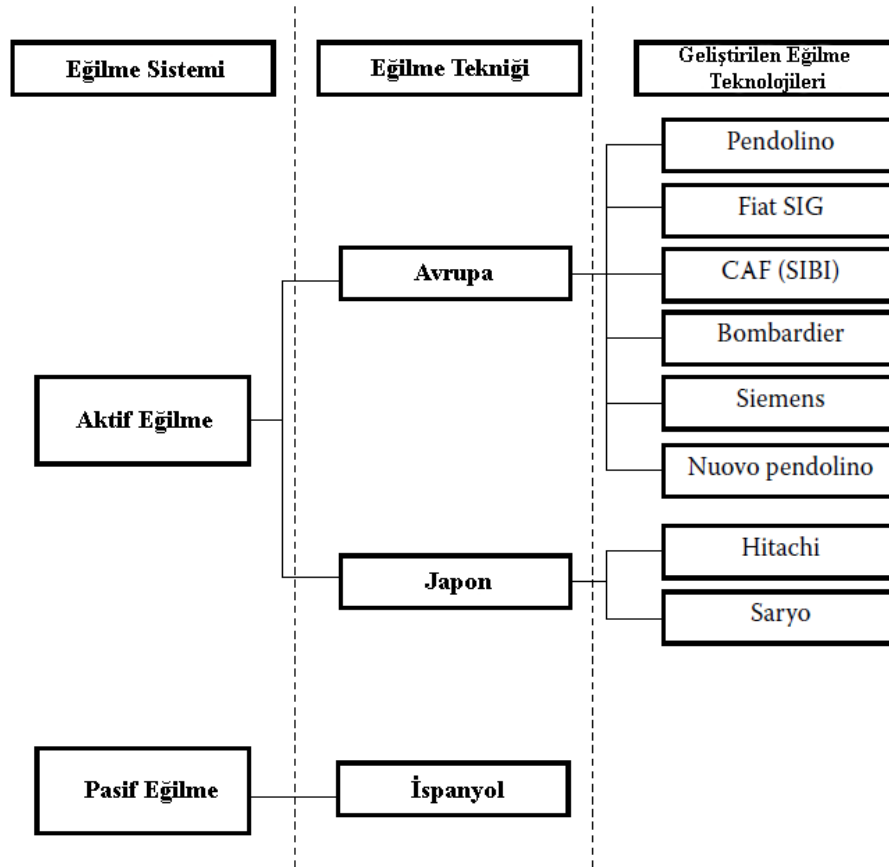
Yukarıda söz edilen etkilere maruz kalınmaması için taşıtın geçiş eğrisine girmeden hemen önce istenen eğilme açısının elde edilmiş olması gerekmektedir. Bunun gerçekleşebilmesi için eğilme işleminin tamamlanması gereken sürenin çok az (yaklaşık 2 saniye kadar) olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Taşıt gövdesinin yatırılması işlemi, pasif eğilme sistemini uygulamaktan ziyade mekanik veya elektronik bazı sistemler ile mümkün olacaktır. Aktif eğilme sistemi altında bugüne kadar Şekil 3.4’de görüldüğü üzere Avrupa ve Japon tekniği olmak üzere iki teknik geliştirilmiştir (Pyrgidis 2016).



**Şekil 3.4** Avrupa ve Japon tekniği olmak üzere iki farklı aktif eğilme teknolojisi (Pyrgidis 2016).

Avrupa tekniğinde eğilme, taşıta bağlanan elektrikli veya hidrolik sistemlerle çalışan ekipmanlar kullanılarak gerçekleştirilir. Taşıtın baş kısmına yerleştirilen bir jiroskop (düzdöner), dış rayın yükseldiği kesimleri algılar ve dever miktarına göre vagon eğilme açısını belirler. Aynı zamanda ön bojiye yerleştirilen bir ivmeölçer, yatay dönemeçlerde yanıl ivmeyi ölçer ve taşıt gövdesi eğilme açısının aşamalı olarak uygulanmasını sağlar. Bu iki alet, gerekli komutları üretebilen bir mikrobilgisayar ünitesi ile etkileşime girer. Bu şekilde gerçekleşen bir eğilme sistemi ile eğilme açısı ( $\phi_c$ ) 8 dereceye kadar ulaşabilmektedir. Avrupa tekniği, çeşitli demiryolu taşıt üreticileri tarafından temel bir prensip olarak benimsenmiş ve farklı teknik versiyonları da geliştirilmiştir. Pendolino, Fiat SG, Nuovo Pendolino, ASEA, Bombardier, CAF (SIBI), Adtranz ve Siemens adını almış bu teknolojilerde Avrupa tekniği kullanılmış ve kullanılmaya devam edilmektedir (Pyrgidis 2016).

Japon tekniğinde ise eğilme, hem hat üzerine hem de taşıta yerleştirilen ekipmanlarla sağlanmaktadır. Bu teknik, merkezkaç kuvvetinin etkisini kullanan pasif eğilme sistemini (basit sarkaç) pnömatik (hava) basınçlı mekanik bir sistemle birleştirmektedir. Hat üzerindeki yatay dönemeçlerin algılanması, eğriliği algılayabilen elektromanyetik bir sistem ile gerçekleştirilmektedir. Hattın geometrik özellikleri, taşıta monte edilmiş bir bilgisayar kullanılarak, elektronik formatta, hattın tümü boyunca sisteme kaydedilir. Taşıtın hat üzerindeki konumu, taşıt ile raylara monte edilmiş ekipmanlar arasında sürekli iletişimi sağlayan bir sistem yardımıyla her an hızına göre hesaplanır ve belirlenir. Bu tekniğin, bir yatay dönemece girerken ve çıkarken yolcuların hissettiği konfor nedeniyle Avrupa tekniğine göre daha verimli olduğu söylenebilir. Çünkü bu sistemde kullanılan teknolojilerden dolayı eğilmenin gerçekleşmesi olayında bir zamanlama hatası olması pek mümkün değildir. Ancak yalnızca taşıta değil hat boyunca da ekipman gerekliliği söz konusu olduğundan maliyet açısından çok ekonomik değildir. Bu teknik kullanılarak Japonya’da, Hitachi ve Saryo adında teknolojiler geliştirilmiştir ve eğilme açısı ( $\phi_c$ ) 5 dereceye kadar ulaşabilmektedir. (Pyrgidis 2016). Şekil 3.5’de; eğilme sistemleri, eğilme teknikleri ve geliştirilen teknolojiler gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Eğilme sistemi, eğilme teknikleri ve geliştirilen teknolojiler (Pyrgidis 2016).

### 3.2 YATAR GÖVDELİ TRENLERİN GELİŞİM SÜREÇLERİ VE DÜNYADA KULLANIMLARI

Yatay dönemeçlerde ortaya çıkan ve yolcular tarafından hissedilen merkezkaç kuvvetini azaltmaya ve daha yüksek hızlara ulaşabilmeye yönelik ilk düşünceler ve deneysel çalışmalar, 1930'ların sonlarında, Deischl (1937) ve Van Dorn & Beemer (1938) tarafından ortaya çıkarılmıştır. 1938'de Pullman, Atchison, Topeka ve Santa Fe demiryolu idareleri, deneysel çalışmalar kapsamında basit sarkaç sistemi mantığıyla yatar gövdeli vagon inşa etmişlerdir. Ancak bu vagonda eğilme etkisini sönümleyici bir sistemin olmaması dolayısıyla, vagon hareket halinde iken yolcularda deniz tutmasına benzer etkiler olduğu gözlemlenmiştir. İlk çalışmalarda çoğunlukla pasif eğilme sistemi temel alınarak taşıtlar inşa edilmiştir. 1956'da Pullman-Standard şirketi, ticari olarak ilk kez işletmeye alınan, Train-X adı verilen yatar seti üretmiştir. Bu trenlerin yolcular üzerinde rahatsızlık etkileri yaratmasından dolayı trenler kısa bir süre sonra hizmetten geri çekilmiştir. Bu sorunların bir kısmı çözüldükten sonra, ticari olarak hizmet vermeye başlayan ilk trenler, 1973'te Nagoya ve Nagano şehirleri arasında işletilmeye başlanan, Japon üretimi 381 adı verilen trenlerdir. Daha sonra 1980'de, İspanyol Talgo teknolojisi ile üretilen yatar gövdeli trenler, Madrid ve Zaragoza şehirleri arasında hizmete girmiştir. Sözü edilen bu trenlerin tamamı pasif eğilme sistemi ile tasarlanmıştır (Persson 2007).

1957 yılında aktif eğilme teknolojisinin ilk kez kullanıldığı ve 18 dereceye kadar eğilebilen bir tren SNCF tarafından üretilmiştir. 1965'de Alman Demiryolları, envanterinde bulunan 624 adlı dizel tren setlerini yatar gövdeli trenlere çevirmiş ve 634 olarak adlandırmıştır. 1972 yılında, yatar gövdeli sisteme dönüştürülmüş trenleri, ilk olarak Köln – Saarbrücken hattında işletmeye başlamıştır. Aktif eğilme sisteminin kullanılmasıyla ilgili en önemli gelişme, 1969'da Y0160 adında, prototip olarak üretilen ve daha sonra geliştirilerek Pendolino teknolojisinin ortaya çıkmasıdır. 1975 yılında Pendolino teknolojisi ile üretilmiş ve ticari olarak hizmete başlamış ilk trenler, Şekil 3.6'da gösterilen ETR401 adındaki trenler olmuştur (Persson 2007).

İngiliz Demiryolları 1986 yılında, Advanced Passenger Train (APT) adını verdiği trenlerin prototiplerini üretmiştir. Yapılan testlerde, konforun iyileştirildiği gözlemlenmiş fakat bazı güvenlik sorunları ortaya çıkmıştır. Aşılamayan nedenlerden ötürü proje ve patentler, İtalyan şirket Fiat'a satılmıştır (Persson 2007).



**Şekil 3.6** İtalyan Demiryollarına ait bir ETR401 yatar gövdeli treni (Persson 2007).

1990 yılında konfor ve güvenlik sorunlarının büyük ölçüde çözülmesi sonrasında yatar gövdeli trenlerin aktif olarak kullanılmaya başlanması, İtalya’da ETR450 ve İsveç’te X2000 adları verilen trenlerin piyasaya sürülmesiyle gerçekleşmiştir. Bu yıllarda yine Japonya’da hem aktif hem de pasif sistemlere sahip olan trenler ticari olarak piyasada yerini almıştır. Günümüzde, farklı ülkelerdeki üreticileri tarafından 5000’den fazla yatar gövdeli tren seti üretilmiş ve halen kullanılmaya devam edilmektedir (Persson 2007). Yatar gövdeli tren tarihinde önemli yer tutmuş taşıtlar ve özellikler Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

**Çizelge 3.2** Yatar gövdeli trenlerin gelişimi ve kullanımı (Pyrgidis 2016).

| Tren Adı       | İşletmeye Alınma Yılları | Kullanıcı Ülke   | Yatar Gövde Sistemi | En Büyük Hız (km/sa) | Hat Genişliği (mm) | Tren Tipi     | Gövde Eğilme Açısı (derece) |
|----------------|--------------------------|------------------|---------------------|----------------------|--------------------|---------------|-----------------------------|
| TurboTrain     | 1968–82                  | Kanada           | UAC (Pasif)         | 193                  | 1435               | LC + TC       | -                           |
| 381 Series     | 1973                     | Japonya          | Hitachi             | 120                  | 1067               | EMU           | 5                           |
| Talgo Pendular | 1974–93                  | İspanya-Almanya  | TALGO               | 180–220              | 1668–1435          | LC + TC       | 3–3.5                       |
| ETR 401        | 1975                     | İtalya           | Pendolino           | 250                  | 1435               | LC + TC       | 13                          |
| Class 370 APT  | 1975                     | Birleşik Krallık | Pendolino           | 200                  | 1435               | LC + TC       | -                           |
| LRC            | 1982                     | Kanada           | Bombardier          | 160                  | 1435               | LC + TC       | 4–5                         |
| TRD 594        | 1982                     | İspanya          | CAF (SIBI)          | 160                  | 1668               | DMU           | 6                           |
| ETR 450        | 1988                     | İtalya           | Pendolino           | 250                  | 1435               | EMU           | 8                           |
| 2000 Series    | 1989                     | Japonya          | Hitachi             | 130                  | 1067               | DMU           | 5                           |
| ICT            | 1989                     | Almanya          | Pendolino           | 230                  | 1435               | EMU           | 8                           |
| X 2000         | 1990                     | İsveç            | ASEA                | 210                  | 1435               | LC + TC + DVT | 8                           |
| Series 8000    | 1992                     | Japonya          | Hitachi             | 160                  | 1067               | EMU           | 5                           |
| VT 610         | 1992                     | Almanya          | Pendolino           | 160                  | 1435               | DMU           | 8                           |
| 8000 Series    | 1992                     | Japonya          | Hitachi             | 160                  | 1067               | EMU           | 5                           |
| E351 Series    | 1993                     | Japonya          | Hitachi             | 130                  | 1067               | EMU           | 5                           |
| ETR 460        | 1994                     | İtalya           | Pendolino           | 250                  | 1435               | EMU           | 8                           |
| HOT 7000       | 1994                     | Japonya          | Hitachi             | 130                  | 1067               | DMU           | 5                           |
| 83 Series      | 1994                     | Japonya          | Hitachi             | 130                  | 1067               | EMU           | 5                           |

**Çizelge 3.2 (devam ediyor).**

| Tren Adı                   | İşletmeye<br>Alınma<br>Yılları | Kullanıcı<br>Ülke | Yatar Gövde<br>Sistemi     | En Büyük<br>Hız<br>(km/sa) | Hat<br>Genişliği<br>(mm) | Tren Tipi | Gövde<br>Eğilme<br>Açısı<br>(derece) |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------------------|
| 281 Series                 | 1994                           | Japonya           | Hitachi                    | 130                        | 1067                     | DMU       | 5                                    |
| 961 Series                 | 1995                           | Japonya           | Hitachi                    | 130                        | 1067                     | EMU       | 5                                    |
| 283 Series                 | 1996                           | Japonya           | Hitachi                    | 145                        | 1067                     | EMU + DMU | 5-6                                  |
| 383 Series                 | 1996                           | Japonya           | Hitachi                    | 130                        | 1067                     | EMU       | 5                                    |
| SM 220-SM3                 | 1996-2003                      | Finlandiya        | Pendolino                  | 220                        | 1524                     | EMU       | 8                                    |
| ETR 470                    | 1996                           | İsviçre           | Pendolino                  | 200                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| VT 611                     | 1997                           | Almanya           | Adtranz                    | 160                        | 1435                     | DMU       | 8                                    |
| ETR 480                    | 1997                           | İtalya            | Pendolino                  | 250                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| BM 73                      | 1997                           | Hollanda          | ASEA                       | 210                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| QR Tilt Train              | 1998                           | Avusturalya       | Hitachi                    | 165                        | 1067                     | EMU + DMU | 5                                    |
| ALARIS 490                 | 1999                           | İspanya           | Pendolino                  | 220                        | 1668                     | EMU       | 8                                    |
| VT 612                     | 1999                           | Almanya           | Adtranz                    | 160                        | 1435                     | DMU       | 8                                    |
| CP 400                     | 1999                           | Portekiz          | Pendolino                  | 220                        | 1668                     | EMU       | 8                                    |
| ICN                        | 2000                           | İsviçre           | Adtranz                    | 200                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| ACELA                      | 2000                           | ABD               | Bombardier                 | 240                        | 1435                     | DMU       | 4.2 (4-6)                            |
| SZ 310                     | 2000                           | Slovenya          | Pendolino                  | 200                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| TALGO 350                  | 2000                           | İspanya           | TALGO                      | 330-350                    | 1435                     | LC + TC   | 3.5                                  |
| BM 93                      | 2001                           | Hollanda          | Bombardier                 | 140                        | 1435                     | DMU       | 7                                    |
| Class 221<br>Super Voyager | 2002                           | Birleşik Krallık  | Bombardier                 | 200                        | 1435                     | DMU       | -                                    |
| British Rail<br>CLASS 390  | 2003                           | Birleşik Krallık  | FIAT SIG                   | 225                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| CDT 680                    | 2005                           | Çek Cumhuriyeti   | Pendolino                  | 230                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| MEITECHU<br>Series         | 2005                           | Japonya           | Nippon Sharyo              | 120                        | 1067                     | EMU       | 5                                    |
| N 700                      | 2007                           | Japonya           | Hitachi +<br>Nippon Sharyo | 300                        | 1435                     | LC + TC   | 5                                    |
| ETR 600                    | 2008                           | İtalya            | Pendolino<br>(Yeni)        | 250                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| ETR 610                    | 2008                           | İsviçre           | Pendolino<br>(Yeni)        | 250                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| E5 Series<br>Shinkasen     | 2011                           | Japonya           | Hitachi                    | 300                        | 1435                     | EMU       | 5                                    |
| E6 Series<br>Shinkasen     | 2013                           | Japonya           | Hitachi                    | 320                        | 1435                     | EMU       | 5                                    |
| TALGO<br>AVRIL             | 2013                           | İspanya           | TALGO                      | 380                        | 1435                     | LC + TC   | 5                                    |
| TRA                        | 2013                           | Tayvan            | Nippon Sharyo              | 150                        | 1435                     | EMU       | 5                                    |
| TTX<br>(Harvit 200)        | 2013                           | Güney Kore        | KRRI                       | 180-200                    | 1435                     | EMU       | 8                                    |
| ED250                      | 2014                           | Polonya           | Pendolino                  | 250                        | 1435                     | EMU       | 8                                    |

DMU: Dizel Tren Seti, EMU: Elektrikli Tren Seti, LC: Lokomotif, TC: Çekilen Araçlar (Vagonlar), DVT: Sürücü Kabinli Araç

Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere, yatar gövdeli trenler ülkemizde bugüne kadar hiç kullanılmamıştır.

Yatar gövdeli trenlere örnek olarak, Şekil 3.7’de Japon üretimi yatar gövdeli dizel tren seti, Şekil 3.8’de ise İngiliz demiryollarına ait yatar gövdeli elektrikli tren seti verilmiştir.



Şekil 3.7 Japon üretimi KiHa 283 serisi bir yatar gövdeli DMU (URL-3 2020).



Şekil 3.8 İngiliz Demiryollarına ait bir yatar gövdeli EMU (URL-4 2020).

Yatar gövdeli trenlerin geliştirilme süreçlerinde genellikle taşıtların hızları artış eğiliminde olmuştur. İlk geliştirilen trenlerde en büyük hızlar 120 km/sa civarında olmuştur. Taşıtlar geliştikçe hızlar da artarak, Japonya’da 130 km/sa, Avrupa’da ise 160 km/sa’lere ulaşmıştır. ABD’de Acela trenleri 240 km/sa, İtalya’daki ETR450-460-480 trenleri ise 250 km/sa hızlara kadar ulaşmaktadır. Daha sonralarda, SNCF-Alstom ortaklığı yatar gövdeli TGV trenlerini, Japon Hitachi şirketi ise yatar gövdeli N700 Shinkansen trenlerini üretmiş ve işletmeye almışlardır. Bu trenler 300 km/sa hızlara kadar çıkabilmektedir (Persson 2007).

### **3.3 YATAR GÖVDELİ TRENLERİN MEVCUT HATLARDA İŞLETİLMESİ**

Demiryolu idareleri, sahip olduğu demiryolu ağındaki hatlarda, yolculuk sürelerini kısaltmak ve yolcu konforunu artırmak istemektedirler. Yatar gövdeli trenlerin işletilmeye alınması ile yeni bir yüksek hızlı tren altyapısı yerine mevcut hatlarda yüksek hızlarda ve konforlu işletme yapılabilmektedir. Bu yüzden yatar gövdeli trenler, demiryolu idarelerince yeni bir hat yapmaya karşı her zaman bir seçenek olmuştur. Ayrıca, yatar gövdeli tren işletilmesi düşünülen demiryolu hattının altyapı ve geometrik özellikleri, hat üzerinde bu trenlerin işletilmesine karar vermeyi etkileyen son derece önemli bir konudur (Pyrgidis 2016).

Yatar gövdeli trenler, demiryolu hatlarının yalnızca geçiş eğrisi ve dönemeç olan kesimlerinde bir hız artışı sağlayabilir. Teğetteki yapılabilecek hız, kullanılan taşıtın ürettiği güce bağlıdır ve yatar gövdeli trenler teğetlerde hızlanma adına bir katkı sağlamazlar. Bu nedenle, yatar gövde işletilmesi planlanan bir demiryolu hattında, Çizelge 3.3’de görüldüğü üzere, eğri kesimler (geçiş eğrisi ve dönemeç olan kısımlar) ne kadar fazla olur ise hız artışının etkisi de o oranda fazla olacaktır. Ayrıca yatar gövdeli trenlerin işletilmek istendiği hatların üstyapısı iyi durumda olmalıdır. Aynı zamanda, gövdenin eğilmesinden dolayı artan kuvvetlere karşı istenen mekanik dayanımlara sahip tekerlek, tekerlek budeni ve raylar olmalıdır. Yine eğilmeden dolayı sanat yapılarında ve özellikle tünellerde, yük gabarileri kontrol edilmeli ve mevcut gabari sınırları içinde kalan taşıtlar tercih edilmelidir (Pyrgidis 2016). Yatar gövdeli trenler, tünel içinde kalan yatay dönemeçlerde eğilmeden kaynaklanan gabari sorunlarının üstesinden gelebilmek için uygun ölçülerde üretilmektedir. Bu yüzden genellikle gabari sorunu ile karşılaşmamaktadır (Profillidis 2014).

**Çizelge 3.3** Normal trenlere göre yatar gövdeli trenlerin geçiş eğrisi ve dönemeç olan kısımlarda yolculuk süresini kısaltması (Pyrgidis 2016).

|                                                                     |    |    |    |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|
| Toplam hat uzunluğu içindeki eğri kısımlar (%)                      | 50 | 60 | 70 | 80 |
| Yatar gövdeli trenler kullanıldığında kısalan yolculuk süreleri (%) | 10 | 12 | 14 | 16 |

Çizelge 3.3’de görüldüğü üzere, yatar gövdeli trenler, hat üzerindeki geçiş eğrileri ve dönemeçlerden daha hızlı bir geçiş sağladığı için hat üzerinde bu kesimlerin artmasıyla hızlanmanın etkisi daha çok ortaya çıkmakta ve yolculuk süreleri kısalmaktadır. Yatar gövdeli trenler genel olarak uygulamada %12-%20 arasında yolculuk sürelerini kısaltmaktadırlar (Pyrgidis 2016). İtalya’da yatar gövdeli trenlerin kullanılmasıyla, yolculuk süresindeki kısalma ve hızdaki artışı gösteren sonuçlar Çizelge 3.4’de verilmiştir.

**Çizelge 3.4** İtalya’da bazı hatlarda yatar gövdeli trenlerin kullanılmasıyla elde edilen hız artışı ve zaman kazançları (Evren ve Dündar 2016).

| Hat          | Uzaklık (km) | Yeni Yolculuk Süresi | Yeni Hız (km/sa) | Eski Yolculuk Süresi | Eski Hız (km/sa) | Hız Artışı (%) | Zaman Kazancı (%) |
|--------------|--------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------|-------------------|
| Savona-Roma  | 605          | 4 saat 55 dakika     | 123              | 5 saat 48 dakika     | 104              | 18             | 15                |
| Torino-Roma  | 725          | 5 saat 35 dakika     | 130              | 6 saat 45 dakika     | 107              | 21             | 18                |
| Bergamo-Roma | 660          | 5 saat 20 dakika     | 124              | 6 saat 40 dakika     | 99               | 25             | 20                |
| Roma-Bari    | 495          | 4 saat 25 dakika     | 112              | 5 saat 56 dakika     | 83               | 35             | 15                |
| Roma-Bolzano | 674          | 5 saat 35 dakika     | 121              | 6 saat 37 dakika     | 102              | 19             | 16                |

Yatar gövdeli trenlerin normal trenlere göre daha pahalı olduğu bilinmektedir. İtalya’da üretilen yatar gövdeli trenlerin maliyetinin, normal trenlere göre %3-%5 oranında daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Fakat, Fransa’da yatar gövdeli üretilen TGV trenlerinin, normal trenlere göre %10-%20 düzeyinde daha yüksek maliyetli olduğu da bilinmektedir. SNCF tarafından yapılan araştırmalara göre, maliyeti 35-40 milyon € olan normal TGV trenleri ile karşılaştırıldığında, yatar gövdeli trenlerin yolculuk süresinde 1 dakikalık azaltma yapması, 160 km/saate kadar hızlar için 1,5-4,5 milyon € arasında ve 160 km/saatten yüksek hızlar için 9-18 milyon € tasarruf sağladığı görülmüştür. Yatar gövdeli trenlerin getirdiği ek maliyetler, taşıtların normal trenlere

göre daha maliyetli olması ile hat ve sinyalizasyon sistemlerinde yapılacak ek maliyetler olarak sıralanabilir (Profillidis 2014).

Yatar gövdeli trenlerin üstün yönleri aşağıda verilmiştir (Pyrgidis 2016).

- İşletildikleri hattın geçiş eğrisi ve dönemeç olan kesimlerinde normal trenlere göre daha yüksek hızda hareket ederek yolculuk süresini kısaltırlar. Hat üzerindeki dönemeç kesimler arttıkça yolculuk süresindeki azalma daha da belirginleşir.
- İşletilecekleri hatlarda çok düşük maliyetlerle düzenlemeler yapılacağından yeni bir hat inşasına göre daha ekonomiktir.
- Geometrik bir değişiklik yapılmayacağından karma tren trafiğine hizmet eden hatlarda yük trenleri olumsuz etkilenmeden işletilebilmektedir.

Yatar gövdeli trenlerin zayıf yönleri aşağıda verilmiştir (Pyrgidis 2016).

- Gövdenin eğilmesinden dolayı raylara ve üstyapı çerçevesine normal trenlere göre daha fazla yük etki etmektedir. Bu ek yükler üstyapının çabuk bozulmasına veya daha sık bakım yapılmasına yol açmakta ve dolaylı olarak ek bir maliyet getirebilmektedir.
- Yatar gövdeli trenler kullandıkları teknoloji, sahip oldukları sistemler ve araç-gereçler dolayısıyla normal trenlere göre %15 daha maliyetlidir.
- Yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının bakımları normal trenlere göre daha sık yapılmakta ve bakım maliyetleri daha yüksek olmaktadır.



## BÖLÜM 4

### KARABÜK-ZONGULDAK HATTI ÜZERİNDE YATAR GÖVDELİ TREN UYGULAMASININ İNCELENMESİ

Bu bölümde, yatar gövdeli trenlerin Karabük-Zonguldak hattında kullanılabilirliğinin araştırılması ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Ayrıca, incelenen hat hakkında bilgiler de verilmiştir.

#### 4.1 KARABÜK-ZONGULDAK HATTI

Zonguldak bölgesi, Osmanlı döneminden günümüze kadar Anadolu'nun taş kömürü üreticisidir. Bu nedenle, bu demiryolu hattının planlanmasındaki temel düşünce, kömürü iç pazarlarda demiryolu ile İstanbul veya Samsun'a taşımak olmuştur. Dönemin yöneticileri tarafından Karabük, yüksek fırın ve çelik fabrikası geliştirme yeri olarak seçilmiştir. Hammaddeyi taşımak için ucuz olması ve o dönemin şartlarında daha hızlı olması nedeniyle demiryolu hattı çok gerekli olmuştur. Zonguldak Demiryolu Hattı, o dönemki TCDD demiryolu ağı içinde doğrudan sanayiye hizmet ettiğinden resmi propagandada Demir ve Kömür yolu adıyla anılmıştır (URL-5 2020).

Kırıkkale'nin Irmak bucağından Karadeniz kıyısındaki Hisarönü'ne (Filyos) kadar olan bu hattın büyük kısmı, genel yüklenici Hyquist & Holms (Nohab) liderliğindeki Danimarka ve İsveç şirketlerinden oluşan bir konsorsiyuma ihale edilmiştir. Hükümet ile Nohab arasındaki ilk sözleşme, Ankara ile Ereğli arasına bir metre hat genişliğinde (1000 mm) dar bir hattın inşası için 7 Şubat 1927'de imzalanmıştır. Ön çalışmalardan sonra, yük taşımacılığı için normal genişlikte (1435 mm) bir hattın daha iyi olacağı kararına varılmıştır. 18 Ağustos 1928'de normal hat genişliğinde hat inşası için yeni bir sözleşme imzalanmıştır. Mali kaynakların yetersiz olması nedeniyle Nohab'a ihale edilen hattın Ereğli yerine Hisarönü'ne (Filyos) kadar olmasına karar verilmiştir. Daha sonradan yapılan çalışmalarla hat Zonguldak'a kadar uzatılmıştır. 1953 yılında Ereğli'den Armutçuk'a 13 km'lik bir hat daha yapılmıştır. Ancak Armutçuk ile

Zonguldak arasındaki demiryolu olmayan kesim, bu hattın yüksek maliyeti nedeniyle hiçbir zaman inşa edilememiştir (URL-5 2020).

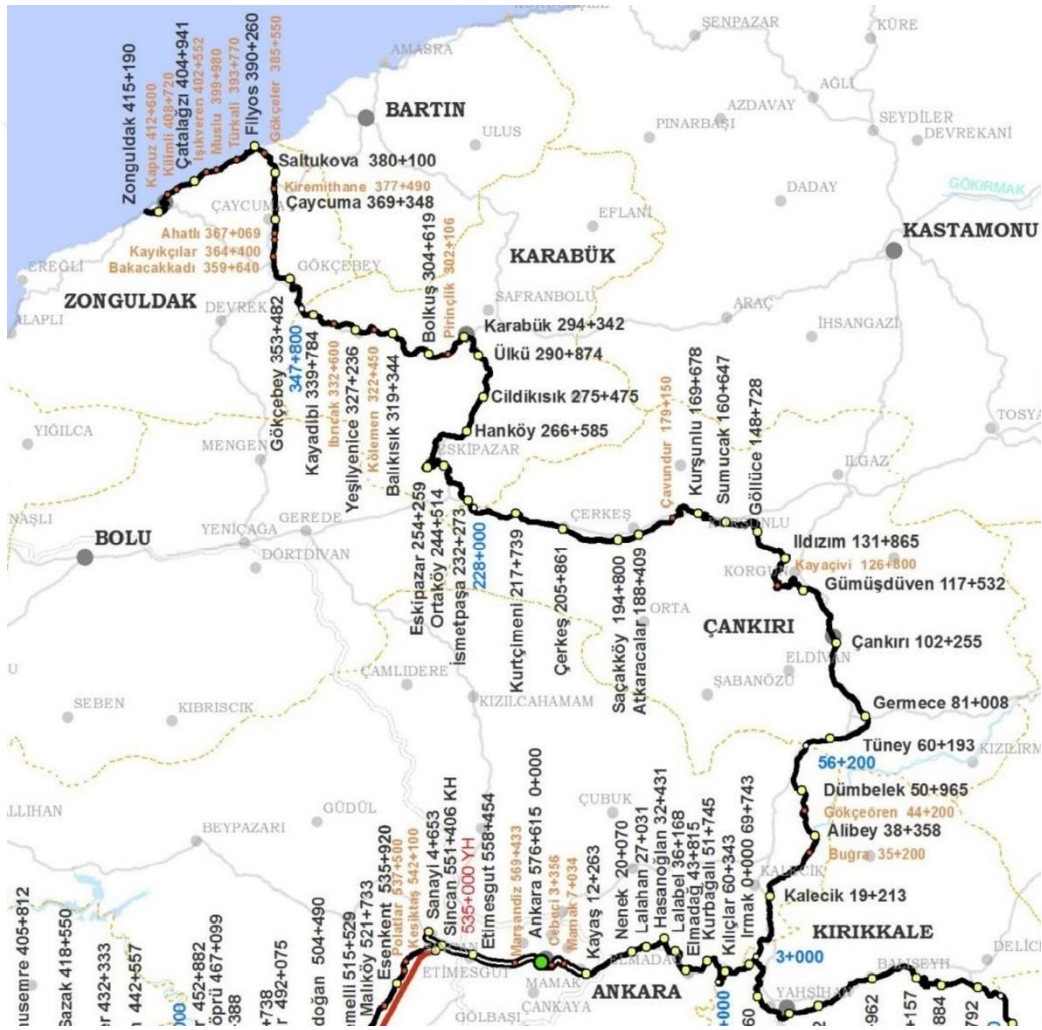
Irmak-Hisarönü hattının inşa çalışmaları topoğrafyadan dolayı çok zorlu şartlarda yapılmıştır. Köroğlu dağına geçmek için Göllüce'de 1250 m rakımda 3,5 km'lik bir tünel inşa edilmiştir. Ayrıca, Zonguldak'ta 1,5 km'lik bir daha tünel daha açılmıştır. Bu hatta, toplam uzunluğu yaklaşık 10 km olan 53 adet tünel bulunmaktadır. Şekil 4.1'de inşa süreçleri süren bir köprünün 1934 yılında çekilmiş bir fotoğrafı verilmiştir (URL-5 2020).



**Şekil 4.1** Karabük'ün kuzeyindeki Araç çayı üzerinde 1934 yılında inşası devam eden bir köprü (URL-5 2020).

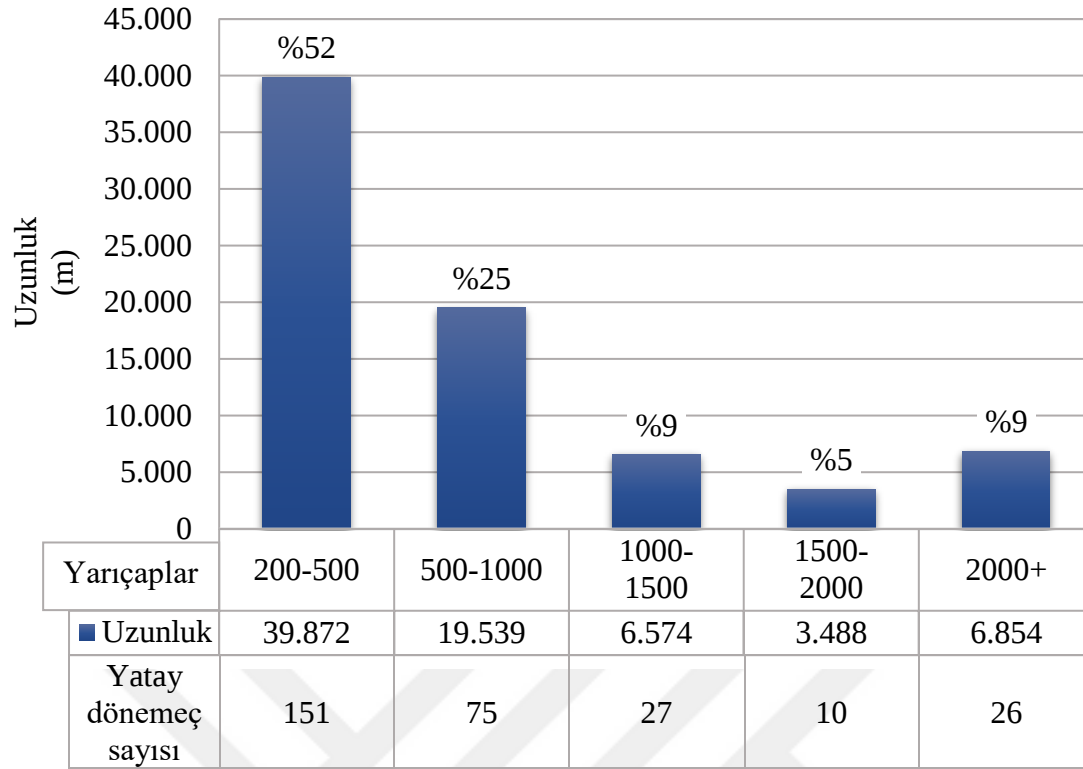
Irmak-Filyos demiryolu hattının inşası, Zonguldak'a uzatılmadan önce, 1927 yılında Filyos'a iskele kurulması ile başlamıştır. Sivas hattının ilerlemesi üzerine, Irmak'tan Filyos'a uzanacak demiryolu hattı Irmak'tan Çankırı'ya bağlanmış ve 1931 yılında işletmeye açılmıştır. Filyos hattı 1930 yılında Balıkısık'a, 1934 yılında Eskipazar İstasyonu'na ulaşmıştır. Bu sırada Çankırı-Çerkeş arasında bulunan, tamamen el yapımı olan demiryollarının 3444 m ile en uzun tüneli olan Batıbel Tüneli'nin sağlamlaştırma çalışmaları bitirilmiştir. Böylelikle hem Çankırı'dan Çerkeş'e, hem de iki taraftan süren yapım aşamaları ile Eskipazar'a ulaşılmıştır. 1935 yılında Irmak-Filyos arasında bulunan 391 km uzunluğundaki demiryolu hattı, sahip olduğu 27 istasyon, 1368 menfez ve köprü, toplam 8800 m uzunluğunda olan 37 tüneli ile hizmete girmiştir (BAKKA 2017).

Günümüzde, Karabük-Zonguldak hattı, Irmak-Karabük-Zonguldak hattının bir bölümüdür. Irmak-Karabük-Zonguldak hattı olarak anılan bu hat, Kırıkkale ilinin Yahşıhan ilçesinin Irmak adlı beldesinde bulunan Irmak İstasyonu'ndan Km:0+000'dan başlayarak, Km:294+342'de Karabük şehir merkezindeki Karabük İstasyonu'na ulaşmakta ve daha sonra Km:415+190'da Zonguldak şehir merkezindeki Zonguldak İstasyonu'nda son bulmaktadır. Irmak-Karabük arası yaklaşık 294 km ve Karabük-Zonguldak arası ise yaklaşık 121 kilometredir. Hat boyunca sinyalizasyon olup elektrifikasyon bulunmamaktadır. (TCDD 2017). Irmak-Zonguldak-Karabük demiryolu hattını gösteren harita Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

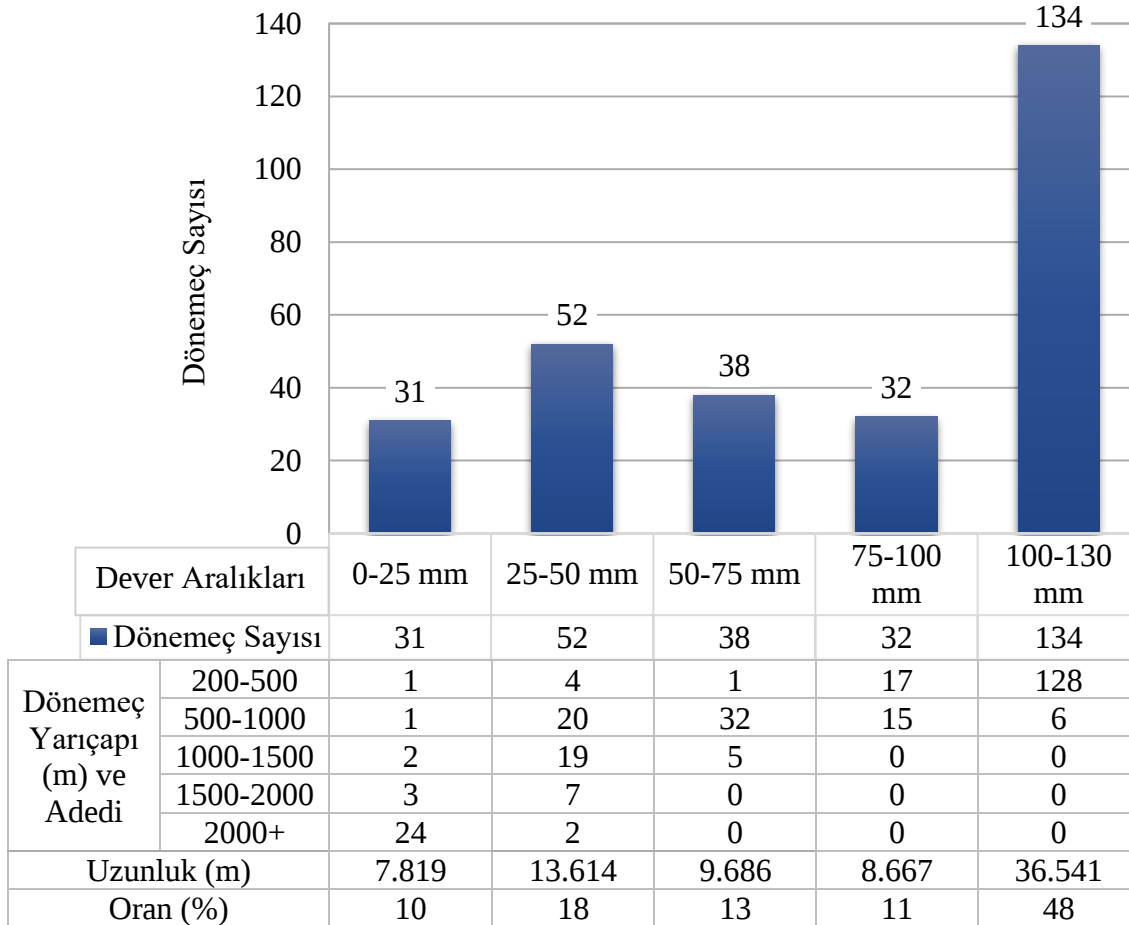


Şekil 4.2 Irmak-Karabük-Zonguldak demiryolu hattı (URL-6 2020).

Zonguldak-Karabük arası net olarak 122.588 m uzunluktadır. 122.588 metrelik hattın, 46.261 metresi (%38) teğet, 76.327 metresi (%62) ise geçiş eğrileri ve dönemeçlerden oluşmaktadır. Hat üzerindeki dönemeçlerin yarıçapları cinsinden sınıflandırılması Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Yatay dönemeç yarıçaplarının dağılımı.



Şekil 4.4 Hat üzerindeki dönemeçlerin uygulama deveri durumları.

Şekil 4.4’de hat üzerindeki dönemeçlerde uygulanan dever değerleri ve belirlenmiş dever aralıklarındaki dönemeç sayıları verilmiştir. 0’dan 130 mm’ye kadar olan dever değeri aralıklarındaki dönemeç sayıları ve sonrasında bu dönemeçlerin yarıçap bilgileri gösterilmiştir. Sayıları gösterilen dönemeçlerin uzunlukları verilmiş ve her dever aralığındaki dönemeç uzunluklarının toplam dönemeç uzunluğuna oranı sunulmuştur.

Zonguldak-Karabük hattında birçok sanat yapısı (köprü, viyadük, tünel) bulunmaktadır. Hat üzerindeki tünellerin toplam boyu 11.334,36 metre (%9,2), köprü ve viyadüklerin toplam boyu 1.787,48 metredir (%1,5). Toplamda, hat uzunluğunun yaklaşık %11’i sanat yapısından oluşmaktadır.

Günümüzde Karabük-Zonguldak arasında 13 istasyon ve istasyonların dışında 24 adet durak bulunmaktadır. Hat üzerinde yolcu ve yük taşımacılığı yapılmaktadır. Zonguldak’tan Karabük yönüne günde 9 yolcu seferi düzenlenirken bunların 4’ü Karabük istasyonuna kadar, 5’i ise Gökçebey istasyonuna kadar gitmektedir. Zonguldak-Karabük arası yolculuk süresi yaklaşık 3 saat 10 dakika, Zonguldak-Gökçebey arası ise 1 saat 45 dakika sürmektedir.

Irmak-Karabük-Zonguldak demiryolu hattında, Avrupa Birliği (AB) desteği ile 2013 yılında rehabilitasyon ve sinyalizasyon çalışmaları başlatılmış, Karabük-Zonguldak kesimi 2016 yılında yenilenerek hizmete açılmıştır. Bu iyileştirmeler kapsamında altyapı, üstyapı ve istasyonlar yenilenmiştir.

## **4.2 KARABÜK-ZONGULDAK DEMİRYOLU HATTI ÜZERİNDE YATAR GÖVDELİ TRENLERİN KULLANIMI**

Bu bölümde Zonguldak-Karabük hattı üzerinde yatar gövdeli trenlerin, işletmeye alınması durumunda yolculuk hızı ve yolculuk süresi üzerinde yaratacağı etkiler araştırılmıştır. Bu kapsamda, incelenen hattın yatay ve düşey geometrik verileri değerlendirilmiştir. Bu verilerden, yatay geçkiye ait kilometraj, yatay eleman tipi ve uzunlukları, proje hızları, denge (teorik) deveri, uygulanmış dever ve eksik dever, yanallı ivmeler, uygulanmış ve eksik deverin zamana bağlı değişimleri, dever rampalarının eğimleri; düşey geçkiye ait boyuna eğimler ve hattın düşey geometrik bilgileri yer almaktadır.

#### 4.2.1 Hattın Yatay Geometrisinin İzin Verdiği En Büyük Hız

İncelenen hat kesimi üzerindeki her bir yatay dönemeç için herhangi bir geometrik değişiklik yapılmadan ve yatar gövde teknolojisinin sunduğu olanaklardan yararlanılarak eksik dever üst sınırı belirlenmiş, buna bağlı olarak yeniden proje hızları hesaplanmıştır. Tek bir dönemece ait örnek veri Çizelge 4.1’de, örnek hesap ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Hat üzerinde yapılan ilk inceleme hız konusundadır. Hız değişkeni için iki farklı durum değerlendirilmiştir. İlki, yatay geometrinin izin verdiği kadarıyla yatar gövdeli bir trenin hat üzerinde yapabileceği en büyük hızın bulunması durumudur. Bu başlık altında bu hız anlatılacaktır. İkincisi, yatar gövdeli trenin gücü ve direnç kuvvetleri altında yapılabilen en büyük hızdır. Bu ise başlık 4.2.2 altında açıklanmıştır.

En büyük hız değerleri geçkinin her bir dönemeç kesimi için ayrı ayrı hesaplanmıştır. En büyük hız öncelikle dairesel dönemeç kesimi için yeni denge deveri (yatar gövdeli trenler için eksik dever üst sınırı kullanılarak belirlenen) kullanılarak hesaplanmış, sonrasında bu hız değeri, geçiş eğrisinde (eksik deverin zamana bağlı değişim üst sınırı kullanılarak) kontrol edilmiş ve gerekli ise azaltılmıştır.

Çizelge 4.1’de hat üzerinde bulunan yatay dönemeçlerin birine ait yatay eleman bilgileri, uzunlukları, mevcut proje hızları, dever durumları ve ivmeler görülmektedir. Bu dönemeç bilgileri kullanılarak yatar gövdeli trenler için yapılan hesaplamalar aşağıda adım adım açıklanmıştır.

Yatar gövdeli trenler, yatay dönemeçlerde, dönemeç içine eğilme hareketinden dolayı merkezkaç kuvvetinin etkisini azaltmaktadırlar. Bu sayede, aynı yatay dönemeçten normal trenlere göre daha fazla eksik dever ile geçebilmektedir. Geometrik olarak değişiklik yapılmadan (dönemeç yarıçapını ve uygulanmış deveri değiştirmeden), eksik dever (dolayısıyla denge deveri) ancak hız artırıldığında artacaktır.

**Çizelge 4.1** Hat üzerindeki bir yatay dönemecin geometrik bilgileri (TCDD 2017).

| Dönemeç Yarıçapı (m) | Eleman Tipi  | Hız (km/sa) | Eleman Uzunluğu (m) | Denge Deveri (mm) | Uygulanmış Dever (mm) | Eksik Dever (mm) | Dengelenmemiş Yanal İvme (m/s <sup>2</sup> ) | Uygulanmış Deverin Zamana Bağlı Değişimi (mm/sn) | Eksik Deverin Zamana Bağlı Değişimi (mm/sn) |
|----------------------|--------------|-------------|---------------------|-------------------|-----------------------|------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 250                  | Geçiş Eğrisi | 70          | 60                  | 231               | 130                   | 101              | 0,66                                         | 42                                               | 33                                          |
| 250                  | Dönemeç      | 70          | 113                 | 231               | 130                   | 101              | 0,66                                         | -                                                | -                                           |
| 250                  | Geçiş Eğrisi | 70          | 60                  | 231               | 130                   | 101              | 0,66                                         | 42                                               | 33                                          |

**Çizelge 4.2** Çizelge 4.1’deki dönemeç için yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan yeni değerler.

| 275 mm Eksik Dever Durumundaki Denge Deveri (mm), (275 mm+Uygulanmış Dever) | Denge Deverine Göre Yeni Hız (km/sa) | 275 mm Eksik Deverin Zamana Bağlı Değişimi (mm/sn), (Normal Sınır=100 mm/sn, Özel Sınır=180 mm/sn) | Eksik Deverin Zamana Bağlı Değişiminin Kontrolü Sonucunda Sınırlandırılmış Hız (km/sa) | Sınırlandırılmış Hıza Göre Denge Deveri (mm) | Sınırlandırılmış Hıza Göre Eksik Dever (mm) |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| ①                                                                           | ②                                    | ③                                                                                                  | ④                                                                                      | ⑤                                            | ⑥                                           |
| 405                                                                         | 92,6                                 | 118                                                                                                | 88,9                                                                                   | 373                                          | 243                                         |
| 405                                                                         | 92,6                                 | -                                                                                                  | 88,9                                                                                   | 373                                          | 243                                         |
| 405                                                                         | 92,6                                 | 118                                                                                                | 88,9                                                                                   | 373                                          | 243                                         |

Bu yüzden hesaplamanın ilk adımı, Çizelge 2.2'deki eksik dever üst sınırı olan (275 mm) ile uygulanmış deverin toplanması ile yeni bir teorik deverin elde edilmesi olmuştur. Bu değerler Çizelge 4.2'nin 1 numaralı sütununu oluşturan değerlerdir. 1 numaralı sütundaki yeni denge deveri değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$D_{EQ} = 275 \text{ mm (Eksik dever üst sınırı)} + 130 \text{ mm (Uygulanmış dever)} = 405 \text{ mm}$$

Hesaplamalarda ikinci adım, elde edilen yeni denge deverinin oluşmasını sağlayacak hızın bulunması olmuştur. Deverin genel bağıntısının gösterildiği Denklem 2.8 ile yeni hızlar bulunmuştur. Bu yeni hızlar, 275 mm eksik ve uygulanmış deverin toplanmasıyla elde edilmiş yeni denge deverini oluşturacak hızlardır ve Çizelge 4.2'nin 2 numaralı sütununu oluşturan değerlerdir. Yeni hız değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$D_{EQ} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \rightarrow 405 = 11,8 \cdot \frac{V^2}{250} \rightarrow V \cong 92,6 \text{ km/sa}$$

Eksik deverin bir geçiş eğrisi üzerindeki birim zamandaki değişimi, konfor açısından önemli bir unsurdur ve bu yüzden bir sınır değere sahiptir. Çizelge 2.5'de, 225 km/sa'dan düşük hızlardaki yatar gövdeli trenler için eksik deverin zamana bağlı değişiminin (normal şartlardaki) sınırının 100 mm/sn olduğu görülmektedir. Çizelge 4.2'deki 3 numaralı sütunda 275 mm eksik deverin zamana bağlı değişim değerleri verilmiştir. Eksik deverin zamana bağlı değişimi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\Delta I}{L_D} \cdot \frac{V}{3,6} = \frac{275}{60} \cdot \frac{92,63}{3,6} \cong 118 \text{ mm/sn} > 100 \text{ mm/sn}$$

Hesaplanan eksik deverin zamana bağlı değişim değeri sınır değer olan 100 mm/sn'den büyük olduğu görülmektedir. Bu durumda geçiş eğrisi boyunun, istenen hız ve eksik dever değeri için kısa kaldığı anlaşılmaktadır. Yani yüksek hızda eksik dever çok hızlı değişmekte ve bu da konfor açısından istenmeyen bir durum olmaktadır. O halde geçiş eğrisi uzunluğunda bir değişiklik yapılamayacağından, yeni denge deverine göre hesaplanan yeni hız değeri, konfor gerekliliği ve yolculuk güvenliği açısından, eksik deverin zamana bağlı değişiminin 100 mm/sn olduğu değere kadar sınırlandırılmalıdır. Denklem 2.9 ve Denklem 2.12 ortak olarak çözülerek, eksik deverin zamana bağlı değişiminin 100 mm/sn olduğu değer için hız sınırlandırılmış ve

aşağıdaki gibi yeniden hesaplanmıştır. Sınırlandırılmış hız değerleri Çizelge 4.2'nin 4 numaralı sütununda verilmiştir.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\Delta I}{L_D} \cdot \frac{V}{3,6} = 100 \text{ mm/sn} \rightarrow 100 = \frac{11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - D}{L_D} \cdot \frac{V}{3,6} = \frac{11,8 \cdot \frac{V^2}{250} - 130}{60} \cdot \frac{V}{3,6}$$

$$V \cong 88,9 \text{ km/sa}$$

Sınırlandırılmış hız için (aşağıda gösterildiği gibi) Denklem 2.8 çözülerek denge deveri bulunmuş ve Çizelge 4.2'nin 5 numaralı sütununda verilmiştir. Burada, hızın sınırlandırılmasından dolayı ilk aşamadaki teorik deverden daha düşük bir teorik dever elde edilmiştir. Her ne kadar yatar gövdeli trenlerin kullanımı ile hızlanma sağlansa da, hattın geometrik özelliklerinin sınırlayıcı ana etkenlerden biri olduğu söylenebilir.

$$D_{EQ} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} = 11,8 \cdot \frac{88,9^2}{250} \cong 373 \text{ mm}$$

Sınırlandırılmış hız ile Denklem 2.9 kullanılarak eksik dever aşağıdaki gösterildiği gibi hesaplanmış ve Çizelge 4.2'nin 6 numaralı sütununda verilmiştir. Sonuçta, başlangıçta 275 mm alınan eksik dever değerinden daha düşük eksik dever değeri elde edilmiştir. Bunun sebebinin hız sınırlandırılmasından (dolayısıyla hattın geometrisinden) kaynaklandığı söylenebilir.

$$I = D_{EQ} - D = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - D = 11,8 \cdot \frac{88,9^2}{250} - 130 \cong 243 \text{ mm}$$

Yukarıda adım adım verilen hesaplama yöntemi ile geçki üzerindeki tüm yatay dönemeçler hesaplanmıştır ve incelenen hatta ilişkin değerler elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak Karabük-Zonguldak arasında hattın, yatay geometrisinin, dever ve dever geçişlerinin izin verdiği ölçüde en büyük hızlar hesaplanmıştır. Hesaplanan yeni hız değerleri ile TCDD'nin hız değişim noktalarındaki hızlarla karşılaştırılmış ve Çizelge 4.3'de sunulmuştur. Yatay dönemeçlerin kilometrajı ile TCDD'nin hız değişim kesimlerinin başlangıç veya son kilometrajı aynı olmadığından karşılaştırma yapabilmek adına komşu kesimler için hesaplanan hız değerlerinin temsil ettikleri uzunluklara bağlı olarak ağırlıklı ortalamaları alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.3'de Zonguldak-Karabük yönü için sunulmuştur.

**Çizelge 4.3** Zonguldak-Karabük arasındaki TCDD'nin mevcut en büyük hızlar ile yatar gövdeli tren kullanımında oluşacak yeni hızların karşılaştırılması.

| <b>Zonguldak-Karabük Yönü</b> |                         |                   |                           |                          |                                    |                         |                       |           |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|
| <b>İstasyon Adı</b>           | <b>Kesim Başlangıcı</b> | <b>Kesim Sonu</b> | <b>Kesim Uzunluğu (m)</b> | <b>Dönemeç Oranı (%)</b> | <b>Mevcut En Büyük Hız (km/sa)</b> | <b>Yeni Hız (km/sa)</b> | <b>Hız Artışı (%)</b> |           |
| <b>Zonguldak</b>              | <b>415+776</b>          | <b>414+986</b>    | <b>790</b>                | <b>50</b>                | <b>30</b>                          | <b>95</b>               | <b>216,7</b>          | <b>54</b> |
|                               | 414+986                 | 414+892           | 94                        |                          | 70                                 | 96                      | 36,8                  |           |
|                               | 414+892                 | 405+957           | 8935                      |                          | 75                                 | 112                     | 48,8                  |           |
| <b>Çatalağzı</b>              | <b>405+957</b>          | <b>404+995</b>    | <b>962</b>                | <b>64</b>                | <b>75</b>                          | <b>112</b>              | <b>49,5</b>           | <b>53</b> |
|                               | 404+995                 | 404+678           | 317                       |                          | 75                                 | 100                     | 33,4                  |           |
|                               | 404+678                 | 394+525           | 10153                     |                          | 90                                 | 138                     | 53,3                  |           |
|                               | 394+525                 | 391+218           | 3307                      |                          | 75                                 | 116                     | 54,5                  |           |
| <b>Filyos</b>                 | <b>391+218</b>          | <b>390+365</b>    | <b>853</b>                | <b>67</b>                | <b>75</b>                          | <b>92</b>               | <b>22,7</b>           | <b>64</b> |
|                               | 390+365                 | 383+277           | 7088                      |                          | 75                                 | 131                     | 74,1                  |           |
|                               | 383+277                 | 380+819           | 2458                      |                          | 95                                 | 143                     | 50,8                  |           |
| <b>Saltukova</b>              | <b>380+819</b>          | <b>379+960</b>    | <b>859</b>                | <b>41</b>                | <b>95</b>                          | <b>151</b>              | <b>59,2</b>           | <b>52</b> |
|                               | 379+960                 | 377+316           | 2644                      |                          | 95                                 | 149                     | 56,5                  |           |
|                               | 377+316                 | 373+132           | 4184                      |                          | 75                                 | 126                     | 68,2                  |           |
|                               | 373+132                 | 370+343           | 2789                      |                          | 95                                 | 119                     | 24,8                  |           |
| <b>Çaycuma</b>                | <b>370+343</b>          | <b>369+452</b>    | <b>891</b>                | <b>42</b>                | <b>65</b>                          | <b>121</b>              | <b>86,7</b>           | <b>45</b> |
|                               | 369+452                 | 358+012           | 11440                     |                          | 95                                 | 132                     | 39,3                  |           |
|                               | 358+012                 | 354+208           | 3804                      |                          | 75                                 | 120                     | 59,8                  |           |
| <b>Gökçebey</b>               | <b>354+208</b>          | <b>353+629</b>    | <b>579</b>                | <b>91</b>                | <b>70</b>                          | <b>113</b>              | <b>60,8</b>           | <b>56</b> |
|                               | 353+629                 | 349+871           | 3758                      |                          | 70                                 | 108                     | 54,1                  |           |
|                               | 349+871                 | 348+182           | 1689                      |                          | 90                                 | 141                     | 56,6                  |           |
| <b>Gökçebey Balast Ocağı</b>  | <b>348+182</b>          | <b>347+326</b>    | <b>856</b>                | <b>61</b>                | <b>90</b>                          | <b>122</b>              | <b>35,6</b>           | <b>47</b> |
|                               | 347+326                 | 340+900           | 6426                      |                          | 70                                 | 104                     | 48,4                  |           |
| <b>Kayadibi</b>               | <b>340+900</b>          | <b>339+903</b>    | <b>997</b>                | <b>71</b>                | <b>60</b>                          | <b>87</b>               | <b>45,2</b>           | <b>59</b> |
|                               | 339+903                 | 334+448           | 5455                      |                          | 65                                 | 103                     | 58,6                  |           |
|                               | 334+448                 | 329+729           | 4719                      |                          | 75                                 | 118                     | 57,2                  |           |
|                               | 329+729                 | 328+527           | 1202                      |                          | 80                                 | 140                     | 75,5                  |           |
| <b>Yenice</b>                 | <b>328+527</b>          | <b>327+554</b>    | <b>973</b>                | <b>64</b>                | <b>65</b>                          | <b>122</b>              | <b>87,6</b>           | <b>66</b> |
|                               | 327+554                 | 320+241           | 7313                      |                          | 65                                 | 106                     | 63,0                  |           |
| <b>Balıkısık</b>              | <b>320+241</b>          | <b>319+270</b>    | <b>971</b>                | <b>78</b>                | <b>65</b>                          | <b>175</b>              | <b>168,7</b>          | <b>58</b> |
|                               | 319+270                 | 313+135           | 6135                      |                          | 70                                 | 109                     | 56,3                  |           |
|                               | 313+135                 | 310+719           | 2416                      |                          | 65                                 | 99                      | 51,6                  |           |
|                               | 310+719                 | 305+524           | 5195                      |                          | 70                                 | 100                     | 43,2                  |           |

**Çizelge 4.3** Zonguldak-Karabük arasındaki TCDD’nin mevcut en büyük hızlar ile yatar gövdeli tren kullanımında oluşacak yeni hızların karşılaştırılması (devam ediyor).

| <b>Zonguldak-Karabük Yönü</b>        |                         |                   |                           |                          |                                    |                         |                       |           |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|
| <b>İstasyon Adı</b>                  | <b>Kesim Başlangıcı</b> | <b>Kesim Sonu</b> | <b>Kesim Uzunluğu (m)</b> | <b>Dönemeç Oranı (%)</b> | <b>Mevcut En Büyük Hız (km/sa)</b> | <b>Yeni Hız (km/sa)</b> | <b>Hız Artışı (%)</b> |           |
| <b>Bolkuş</b>                        | <b>305+524</b>          | <b>304+920</b>    | <b>604</b>                | <b>63</b>                | <b>50</b>                          | <b>65</b>               | <b>30,9</b>           | <b>35</b> |
|                                      | 304+920                 | 302+858           | 2062                      |                          | 70                                 | 95                      | 35,9                  |           |
| <b>Pirinçlik</b>                     | <b>302+858</b>          | <b>301+986</b>    | <b>872</b>                | <b>73</b>                | <b>50</b>                          | <b>79</b>               | <b>57,3</b>           | <b>44</b> |
|                                      | 301+986                 | 301+655           | 331                       |                          | <b>70</b>                          | 104                     | 48,1                  |           |
|                                      | 301+655                 | 300+514           | 1141                      |                          | 90                                 | 119                     | 31,8                  |           |
|                                      | 300+514                 | 294+721           | 5793                      |                          | 70                                 | 101                     | 44,7                  |           |
| <b>Karabük</b>                       | 294+721                 | 293+681           | 1040                      |                          | <b>55</b>                          | 82                      | 49,3                  |           |
| <b>HAT BOYUNCA ORTALAMA DEĞERLER</b> |                         |                   | <b>122095</b>             | <b>62</b>                | <b>76</b>                          | <b>117</b>              | <b>53,4</b>           |           |

Çizelge 4.3 incelenirse ilk sütunda 13 istasyonun adı, 2. ve 3. sütunda kesim başlangıç ve bitiş kilometrelerinin verildiği görülür. Burada verilen kesim kilometreleri, TCDD’nin ilgili hat üzerinde hızları belirtirken kullandığı kesim sınırlarıdır. Karşılaştırılabilmesi için hız değişim noktaları değiştirilmeden aynı kilometreler korunmuştur. Mevcut en büyük hız sütununda yer alan hızlar, TCDD’nin mevcut durumda ilgili kesimde yapılabilecek en büyük hızları göstermektedir. Yeni hız sütunundaki hızlar, yatar gövdeli tren uygulaması ile eksik dever üst sınırının yükseltilmesi sonrasında ortaya çıkan yeni denge deverini sağlayan hızlardır.

Yeni hızların ilgili kilometre aralığında temsil ettiği uzunluğa bağlı olarak ağırlıklı ortalamaları alınmıştır. Yatar gövdeli trenler için hız artışı yüzde olarak son sütunda verilmiştir. Bu yüzdeler; yeni hızların, mevcut en büyük hızlara göre artışını gösteren değerlerdir. Ayrıca istasyonlar arasında hız artış değerleri de gösterilmiştir.

Mevcut en büyük hızların, istasyon bölgelerinde istasyon harici kesimlere göre biraz düşük olduğu görülmektedir. Yatar gövdeli trenler için hızlarda bu şekilde bir kısıtlama yapılmamış ve geçkinin geometrik özelliklerinin izin verdiği hızlar hesaplanarak sunulmuştur.

Çizelge 4.3’deki hızlar değerlendirildiğinde göre aynı geometri üzerinde, yatar gövdeli trenlerin normal trenlere karşılaştırıldığında daha yüksek hızlara ulaşabildiği görülmektedir. Bu hızlar uygun koşullar sağlandığında, bu hat üzerinde yatar gövdeli trenlerin yapabileceği en büyük

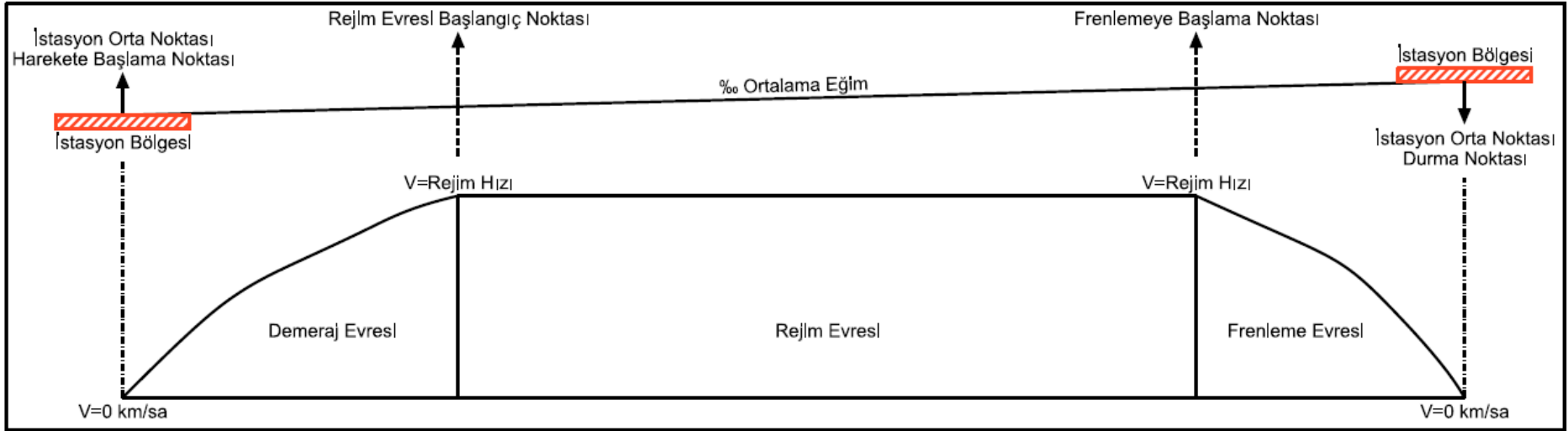
hızları göstermektedir. Hız artış yüzdelerinin tüm hat boyunca etkisinin ağırlıklı ortalaması alındığında, Çizelge. 4.3'ün son satırında da görüldüğü gibi 41 km/sa (%53,4 oranında) artış sonucu elde edilmiştir. Bu hız artışı yalnızca hattın yatay geometri özelliklerinin sınırlaması altında meydana gelen artıştır. Ancak demiryolu hatlarında hızı belirleyen (sınırlayan) unsur yalnızca yatay geometri değildir. Hattın düşey geometrisi, kullanılan taşıtın üretebildiği güç ve demiryolu hattı boyunca demiryolu taşıtının hareketine karşı oluşan direnç kuvvetleri de ulaşılabilir hızı sınırlayan diğer unsurlardır. Ayrıca hattın işletilme şekli ve işletme politikalarından ötürü de hız etkilenebilmektedir.

İncelenen demiryolu hattında, yatar gövdeli tren işletilmek istenmesi durumunda, yüksek hızlara çıkıldıkça deyer geçişlerinin gerçekleştiği geçiş eğrilerinin kısa kaldığı görülmüştür. Bu nedenle hesaplamalarda hızı sınırlayan etken geçiş eğrisinin boyu olmuştur. Eğer bu hatta yatar gövdeli tren işletilmesi kararı verilirse geçiş eğrisi uzunluklarının arttırılması gerekecektir.

#### **4.2.2 Taşıta Etkiyen Dirençler Altında Yolculuk Hızlarının Bulunması**

Bu bölümde, yatar gövdeli tren uygulamasının hız üzerindeki etkisinin araştırılmasına yatay geometri yanında hat boyunca harekete karşı koymaya çalışan direnç kuvvetleri de eklenmiştir. Bir trenin hat üzerinde yapabileceği hız yalnızca yatay geometri ile sınırlandırılmamakta, ek olarak hat üzerindeki dirençler, kullanılan taşıtın aderans ağırlığı ve toplam ağırlığı da hız üzerinde sınırlayıcı etki göstermektedir.

Zonguldak-Karabük hattı üzerindeki dirençlere bağlı hız hesapları, 13 adet istasyon arasında kalan 12 kesim için yapılmıştır. Hesaplamalar Zonguldak-Karabük yönü için yapılmıştır. Hattın boyuna eğimi Zonguldak'tan Karabük yönüne doğru çıkış yönlü bir eğime sahip olduğundan bu yön daha kritiktir. Hattın inşası Cumhuriyetin ilk yıllarına kadar gittiğinden, yapıldığı dönemin şartlarındaki geometrik özellikleri taşımaktadır. Hat boyuna eğim yönünden incelendiğinde, düşük maliyet için kısa düşey teğetlerin çok sayıda kullanıldığı görülmektedir. Trenin hızını değerlendirmede bu kısa kesimlerin incelenmesi anlamlı olmayacağından hesaplamalarda her istasyon arasında ortalama boyuna eğim değerleri kullanılmıştır. Boyuna eğim hesabı için yükseklik değeri her istasyonun orta noktası için bulunmuştur. Eğim direnci hesabında her iki istasyon arasında hesaplanan ortalama eğimler kullanılmıştır. İki istasyon arasında kurgulanan tren hareketi Şekil 4.5'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Hesaplamalar için kurgulanan tren hareket evreleri.

Yatay geometrinin tünel olan ve olmayan kesimleri, direnç hesaplarının daha kolay yapılabilmesi için aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

- Açık havada teğet ve yatay dönemeçli kesimler
- Tünel içinde teğet ve yatay dönemeçli kesimler

Böylece, açık havada ve tünelde hareket direnci hesaplamaları için veriler daha kullanışlı hale getirilmiştir. Benzer şekilde teğetler ve yatay dönemeçli kesimler de ayrılmıştır. Bu şekilde hat üzerindeki her kesimde, o kesim üzerindeki her bir direnç tek başına hesaplanabilmektedir. Ayrıca deverli bir yatay dönemeçte, giriş ve çıkıştaki geçiş eğrileri, ilgili yatay dönemeçlerle bir bütün olarak dşnlmş ve yatay dönemeç dirençleri, geçiş eğrisi başlangıcından çıkış geçiş eğrisi sonuna kadar, ilgili yatay dönemecin yarıçapında olduğu kabulü yapılmıştır. Yani, sırasıyla geçiş eğrisi-daire yayı-geçiş eğrisi düzeninde olan bir yatay dönemeç dizisinin bir bütün olduğu ve tek yarıçapa sahip olduğu kabul edilmiştir.

Her bir kesim için direnç hesapları zamanın ve hızın küçük parçalara ayrılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Her 1 km/sa'lik değişim için alınan yol ve sreler elde edilmiştir. Direnç kuvvetlerinin etkisi altındaki hız ve süre hesaplamaları  örnek taşıt üzerinden yapılmıştır. Bu taşıtlardan ikisi (yatar gövdeli olmayan) normal tren, diğeri yatar gövdeli trendir. Bu üç taşıta ait bilgiler ve hesapta kullanılan değerleri izelge 4.4'de verilmektedir.

Trenler seçilirken iki farklı senaryo oluşturulmuştur. İlki normal tren ve yatar gövdeli trenin yolcu kapasitesine bakılmaksızın aynı ağırlığa sahip olması senaryosu; ikincisi, normal tren ve yatar gövdeli trenin ağırlıklarına bakılmaksızın yolcu kapasitelerinin aynı olması senaryosudur. Ağırlığın eşit olması direnç kuvvetlerinin birbirine yakın olması için, yolcu sayılarının eşit olması ise işletme açısından rekabeti sağlayabilmek için düşünülmüştür. Bu şekilde; ağırlıkları aynı fakat normal trenlerin daha az yolcu taşıdığı durum ile ağırlıkları farklı fakat aynı sayıda yolcu taşındığı durum karşılaştırılmıştır.

Normal trenler, çeken taşıt olarak 1 adet DE 3300 dizel elektrik lokomotif, çekilen taşıt olarak 2 ve 4 yolcu vagonuna sahiptir. Lokomotifin ağırlığı 119 ton olup, 2 yolcu vagonlu halinin toplam ağırlığı 224 ton iken, 4 yolcu vagonlu halinin toplam ağırlığı 328 tondur. DE 3300 dizel elektrik lokomotifin motor gücü 3300 BB'dir.

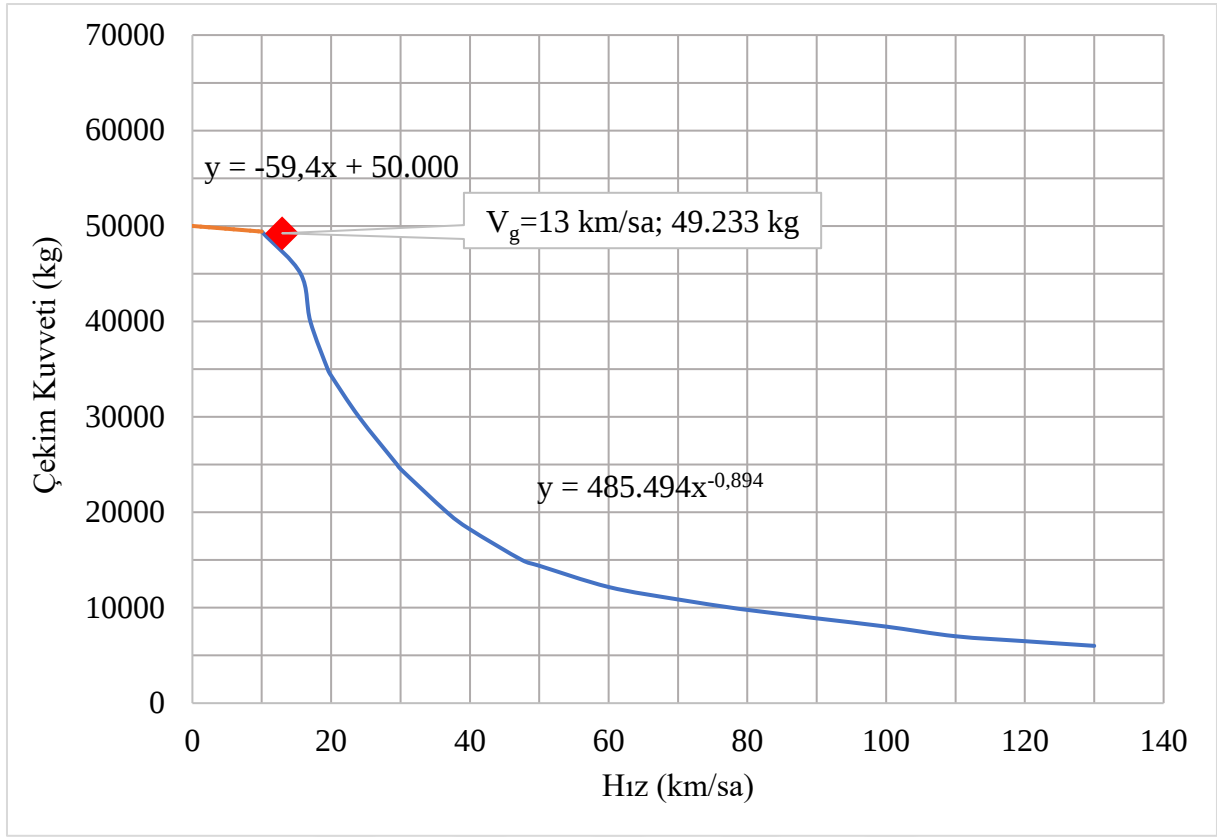
**Çizelge 4.4** Hesaplamalarda kullanılan trenler ve özellikleri.

|                    | Tren Teşkili                                                                                              | En Büyük Hız (km/sa) | En Fazla Ağırlık (t) | Yolcu Kapasitesi (kişi) | Motor Gücü (BB) | Frenleme İvmesi (m/sn <sup>2</sup> ) | Kütle Artış Katsayısı (ξ) |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1. Normal Tren     | 1 adet DE 3300 lokomotif+2 adet pulman yolcu vagonu                                                       | 131                  | 224                  | 80                      | 3300 (2426 kW)  | 0,45                                 | 0,1                       |
| 2. Normal Tren     | 1 adet DE 3300 lokomotif+4 adet pulman yolcu vagonu                                                       | 131                  | 328                  | 160                     | 3300 (2426 kW)  | 0,45                                 | 0,1                       |
| Yatar Gövdeli Tren | 1'i sürücü kabinli 5 yolcu vagonu ve 1 güç ünite vagonu olan 6'lı elektrikli tren seti (Talgo XXI modeli) | 220                  | 224                  | 160                     | 2720 (2000 kW)  | 0,45                                 | 0,1                       |

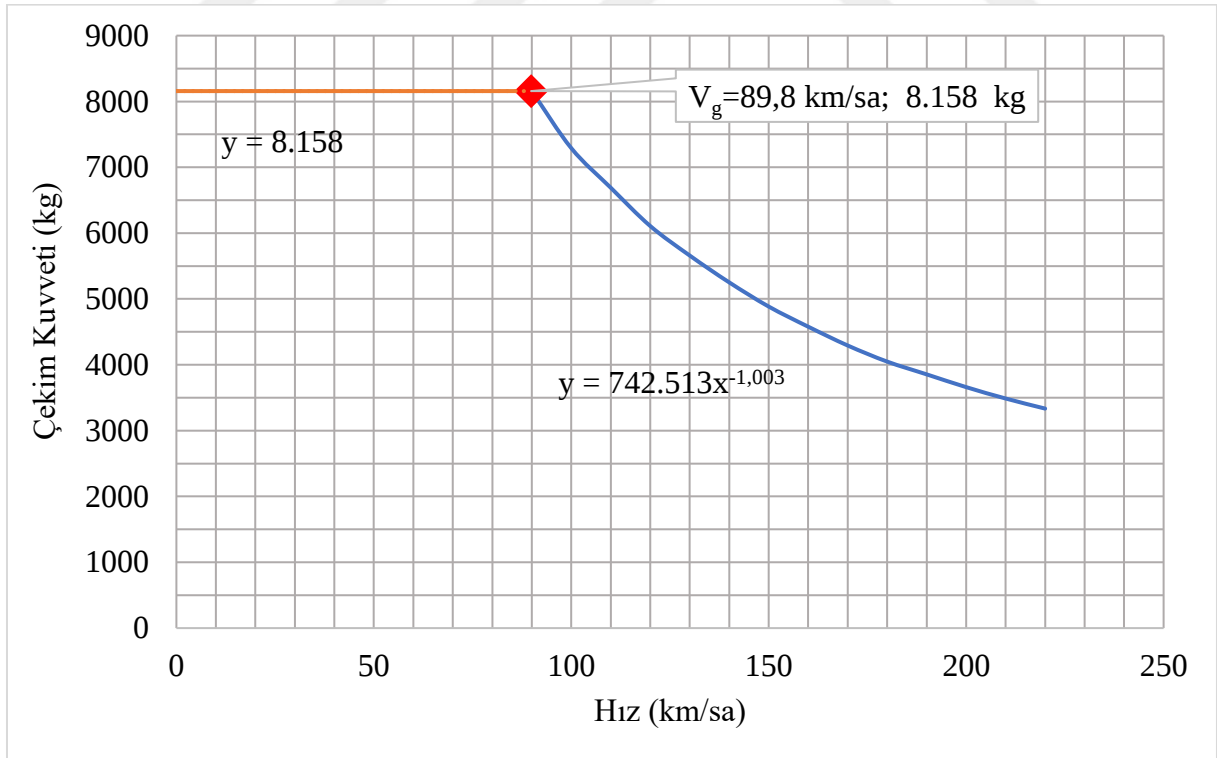
Yatar gövdeli tren, Talgo XXI modeli olan 6 taşıtlık elektrikli tren setidir. Öndeki taşıt sürücü kabinli olup diğer taşıtlarda sürücü kabini yoktur. En arka taşıt ise güç ünitesini barındırmaktadır. Toplam ağırlığı 224 ton olup motor gücü 2720 BB'dir.

Frenleme ivmesi ve kütle artış katsayısı gibi hesaplamalarda kullanılan sabit değerler, her üç taşıt için de aynı alınmıştır. Frenleme ivmesi bu tezin 2. bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmış ve yolcu trenleri için verilen değerlerin ortalaması olan 0,45 m/sn<sup>2</sup> alınmıştır. Kütle artış katsayısının 0,06-0,10 arasında bir değer olarak alabildiği bu tezin 2. bölümünde açıklanmış ve kritik durum için yüksek değer olan 0,10 değeri alınmıştır.

Şekil 4.6'da DE 3300 dizel elektrikli lokomotif, Şekil 4.7'da ise Talgo XXI elektrikli yatar gövdeli tren setine ait çekim kuvveti hız grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6 DE 3300 dizel elektrikli lokomotif için çekim kuvveti-hız grafiği (Tülomsaş 2007).



Şekil 4.7 Talgo XXI elektrikli yatar gövdeli tren setine ait çekim kuvveti-hız grafiği (Netzel 2002).

1. normal tren ve yatar gövdeli trene ait çekim kuvveti, dirençler, süre ve hızın örnek hesaplamaları Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'daki ilk iki sütun, 1 km/sa'lık değişimleri gösteren hız sütunlarıdır. Burada  $V_1$  ilgili hız diliminin ilk hızı,  $V_2$  ise son hızıdır. Her iki istasyon arasında bu hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplarda 1 km/sa'lık hız dilimleri kullanılmıştır. 3. sütundaki ortalama hız ( $V_{ort}$ ),  $V_1$  ve  $V_2$ 'nin aritmetik ortalamasıdır. Hız dilimlerindeki son hız, ilgili istasyon aralığı için karar verilmiş en büyük hız kadardır. Normal trenler için karar verilmiş en büyük hız, iki istasyon arasındaki TCDD'nin belirlemiş olduğu işletme hızlarının tanımlandıkları uzunluklara göre ağırlıklı ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

Yatar gövdeli trenler için karar verilen en büyük hız, hızlanma sırasında ve sonrasında geometrinin izin verdiği en kritik hız olarak alınmıştır. Kritik hız, hızlanma evresinden rejim evresine kadar alınan yol üzerindeki yatay dönemeçler için hesaplanan en küçük hızdır. En küçük hızın ise en küçük yarıçaplı yatay dönemeçlerde yapılabilecek en büyük hız olduğu da söylenebilir.

Daha sonra tren rejim evresinde sabit hızla hareket yapmakta ve sonrasında frenleme evresine girmektedir. Rejim evresinde sabit olan hız değeri, normal ve yatar gövdeli trenler için hızlanma evresindeki son hız değeri olarak alınmıştır. Rejim evresi sonundaki sabit hız değerinden frenleme başlatılmış ve fren uzunluğu hesaplanarak, katar istasyonun orta noktasında duracak şekilde hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'nın 4. sütunundaki aderans kuvveti ( $Z_a$ ), aderans bölgesinde uygulanabilen çekim kuvvetini göstermektedir. Aderans bölgesi içinde (geçiş hızına kadar), katar aderans çekim kuvveti etki etmektedir. Geçiş hızı, çekim kuvveti-hız grafikleri üzerinden; aderans ve motor çekim kuvvet eğri denklemlerinin ortak çözümüyle elde edilmiştir. Geçiş hızından sonra motor bölgesine girilmektedir. 5. sütundaki  $Z_m$ , ise motor çekim kuvvetini göstermektedir. Taşıtın motor gücü ile ürettiği kuvveti tanımlamaktadır. Motor bölgesinde ise katar, aderans kuvveti değil, motor gücünden üretilen motor çekim kuvveti etki etmektedir. Aderans ve motor çekim kuvvetleri, demiryolu taşıtlarının üreticileri tarafından paylaşılan, her taşıt için ayrı düzenlenmiş çekim kuvveti-hız grafikleri üzerinden hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5 1. normal trene ait örnek hesap tablosu.

| V <sub>1</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>ort</sub> | Z <sub>a</sub> | Z <sub>m</sub> | Z/M    | r <sub>L</sub> | r <sub>g</sub> | r <sub>c</sub> | Z/M-(r <sub>L</sub> +r <sub>g</sub> +r <sub>c</sub> ) | Yolculuk Süresi | Alınan Yol | Dönemeç Yarıçapı | Tünel Durumu | Kilometraj  |
|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------|-----------------|------------|------------------|--------------|-------------|
| (km/sa)        | (km/sa)        | (km/sa)          | (kg)           | (kg)           | (kg/t) | (kg/t)         | (kg/t)         | (kg/t)         | (kg/t)                                                | (sn)            | (m)        | (m)              | (-)          | 415+381,000 |
| 0              | 1              | 0,5              | 49970          |                | 223,1  | 0,024          | -0,052         | 0              | 223,1                                                 | 0,14            | 0,02       |                  |              | 415+380,981 |
| 1              | 2              | 1,5              | 49911          |                | 222,8  | 0,062          | -0,052         | 0              | 222,8                                                 | 0,14            | 0,06       |                  |              | 415+380,922 |
| 2              | 3              | 2,5              | 49852          |                | 222,6  | 0,101          | -0,052         | 0              | 222,5                                                 | 0,14            | 0,10       |                  |              | 415+380,825 |
| ...            | ...            | ...              | ...            | ...            | ...    | ...            | ...            | ...            | ...                                                   | ...             | ...        | ...              | ...          | ...         |
| 56             | 57             | 56,5             |                | 13178          | 58,8   | 4,338          | -0,052         | 1,7            | 52,9                                                  | 0,59            | 9,24       | 480              |              | 415+202,379 |
| 57             | 58             | 57,5             |                | 12973          | 57,9   | 4,455          | -0,052         | 1,7            | 51,8                                                  | 0,60            | 9,60       | 480              |              | 415+192,783 |
| 58             | 59             | 58,5             |                | 12775          | 57,0   | 4,573          | -0,052         | 1,7            | 50,8                                                  | 0,61            | 9,96       | 480              |              | 415+182,828 |
| ...            | ...            | ...              | ...            | ...            | ...    | ...            | ...            | ...            | ...                                                   | ...             | ...        | ...              | ...          | ...         |

Çizelge 4.6 Yatar gövdeli trene ait örnek hesap tablosu.

| V <sub>1</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>ort</sub> | Z <sub>a</sub> | Z <sub>m</sub> | Z/M    | r <sub>L</sub> | r <sub>g</sub> | r <sub>c</sub> | Z/M-(r <sub>L</sub> +r <sub>g</sub> +r <sub>c</sub> ) | Yolculuk Süresi | Alınan Yol | Dönemeç Yarıçapı | Tünel Durumu | Kilometraj  |
|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------|-----------------|------------|------------------|--------------|-------------|
| (km/sa)        | (km/sa)        | (km/sa)          | (kg)           | (kg)           | (kg/t) | (kg/t)         | (kg/t)         | (kg/t)         | (kg/t)                                                | (sn)            | (m)        | (m)              | (-)          | 415+381,000 |
| 0              | 1              | 0,5              | 8158           |                | 36,4   | 0,024          | -0,052         | 0              | 36,4                                                  | 0,85            | 0,12       |                  |              | 415+380,881 |
| 1              | 2              | 1,5              | 8158           |                | 36,4   | 0,062          | -0,052         | 0              | 36,4                                                  | 0,86            | 0,36       |                  |              | 415+380,525 |
| 2              | 3              | 2,5              | 8158           |                | 36,4   | 0,101          | -0,052         | 0              | 36,4                                                  | 0,86            | 0,59       |                  |              | 415+379,930 |
| ...            | ...            | ...              | ...            | ...            | ...    | ...            | ...            | ...            | ...                                                   | ...             | ...        | ...              | ...          | ...         |
| 100            | 101            | 100,5            |                | 7287           | 32,5   | 25,801         | -0,052         | 2,7            | 4,1                                                   | 7,62            | 212,73     | 297              | Tünel        | 412+863,714 |
| 101            | 102            | 101,5            |                | 7215           | 32,2   | 26,279         | -0,052         | 2,7            | 3,3                                                   | 9,47            | 267,14     | 297              | Tünel        | 412+596,578 |
| 102            | 103            | 102,5            |                | 7144           | 31,9   | 26,762         | -0,052         | 2,7            | 2,5                                                   | 12,51           | 356,28     | 297              | Tünel        | 412+240,299 |
| ...            | ...            | ...              | ...            | ...            | ...    | ...            | ...            | ...            | ...                                                   | ...             | ...        | ...              | ...          | ...         |

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilen çekim kuvveti-hız grafiklerinden, 1. normal tren ve yatar gövdeli tren için, aderans ve motor çekim kuvvetleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

- 1. normal tren için aderans ve motor çekim kuvveti

$$Z_a = -59,4 \cdot V + 50.000$$

$$\text{Örneğin } V = 0,5 \text{ km/sa için } \rightarrow Z_a = -59,4 \cdot 0,5 + 50.000 \cong 49.970 \text{ kg}$$

$$Z_m = 485.494 \cdot V^{-0,894}$$

$$\text{Örneğin } V = 56,5 \text{ km/sa için } \rightarrow Z_m = 485.494 \cdot 56,5^{-0,894} \cong 13.178 \text{ kg}$$

- Yatar gövdeli tren için aderans ve motor çekim kuvveti

$$\text{Örneğin } Z_a \cong 8.158 \text{ kg } (V_g = 89,8 \text{ km/sa geçiş hızına kadar})$$

$$Z_m = 742.513 \cdot V^{-1,003}$$

$$\text{Örneğin } V = 100,5 \text{ km/sa için } \rightarrow Z_m = 742.513 \cdot 100,5^{-1,003} \cong 7287 \text{ kg}$$

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’nın 6. sütunundaki Z/M değeri, hangi çekim kuvveti ile hareket sağlanıyorsa, bu çekim kuvvetinin toplam taşıt ağırlığına bölünmesiyle bulunan ton başına düşen çekim kuvvetini göstermektedir. Örnek hesaplar aşağıda gösterilmiştir.

$$Z/M = \frac{49.970}{224} \cong 223,1 \text{ kg/t (1. normal tren)}$$

$$Z/M = \frac{8158}{224} \cong 36,4 \text{ kg/t (Yatar gövdeli tren)}$$

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’nın 7. sütunundaki  $r_L$ , doğru ve düzlükteki özgül dirençtir. Doğru ve düzlükteki özgül direncin hesabında taşıtın tünel içinde olup olmadığının kontrolü yapılması gereklidir. Bu nedenle taşıtın hat üzerindeki konumun kilometre cinsinden bilinmesi gerekir. Çizelgelerdeki son sütundaki alınan yol, başlangıç kilometresi temel alınarak hat üzerinde

kilometre değeri olarak elde edilmiştir. Her hız değeri için elde edilen bu kilometre değerleri kullanılarak trenin hat üzerindeki konumu belirlenmiş ve tünelde (veya açık havada) olup olmadığı kontrol edilmiştir. Sonuçta, doğru ve düzlükteki direnç, taşıt tünel içindeyse Denklem 2.28 ile açık havada ise Denklem 2.31 ile hesaplanmıştır. Her hız dilimindeki ortalama hız değeri için doğru ve düzlükteki dirençler aşağıdaki gibi hesaplanmış ve taşıt ağırlığına bölünerek doğru ve düzlükteki özgül dirençler elde edilmiştir. Taşıta tünel direnci etki ettiğinde doğru ve düzlükteki direnç arttığından aracın aldığı mesafe değişmektedir. Alınan yol, yeni doğru ve düzlükteki direnç değerlerine göre tekrarlamalı hesap yapılarak yeniden hesaplanmıştır. Bu şekilde taşıtın hat üzerindeki konumu yeniden belirlenerek hesaplar tekrar yapılmıştır.

- Açık havada 1. normal tren için

$$R_L = 1,107 + 8,25 \cdot V + 0,158 \cdot V^2 \rightarrow V = 58,5 \text{ km/sa için}$$

$$R_L = 1,107 + 8,25 \cdot 58,5 + 0,158 \cdot 58,5^2 = 1024,45 \text{ kg}$$

$$r_L = \frac{R_L}{M} = \frac{1024,45}{224} = 4,573 \text{ kg/t}$$

- Tünelde yatar gövdeli tren için

$$R_L = 1,107 + 8,25 \cdot V + 0,490 \cdot V^2 \rightarrow V = 102,5 \text{ km/sa için}$$

$$R_L = 1,107 + 8,25 \cdot 102,5 + 0,490 \cdot 102,5^2 = 5994,79 \text{ kg}$$

$$r_L = \frac{R_L}{M} = \frac{5994,79}{224} = 26,762 \text{ kg/t}$$

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'nın 8. sütunundaki  $r_g$ , eğim özgül direncidir. İki istasyon arasında yapılan her hesap için, istasyonların orta noktaları arasındaki ortalama eğim değerleri kullanılmıştır. Eğimin binde cinsinden değeri özgül eğim direncine eşit olduğundan, taşıt ağırlığına bölünmesine gerek yoktur.

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'nın 9. sütunundaki  $r_c$ , yatay dönemeç özgül dirençtir. Doğru ve düzlükteki direnç hesabında olduğu gibi, bu hesapta da alınan yoldan kilometraj bulunmuş ve taşıtın bir yatay dönemeç üzerinde olup olmadığının kontrolü yapılmıştır. Eğer taşıt bir yatay dönemeç üzerinde ise ilgili yatay dönemeçin yarıçapı için Denklem 2.32 kullanılarak aşağıda gösterildiği gibi hesap yapılmıştır. Eğer taşıta dönemeç direnci etki ediyor ise hesaplamalar artan direnç değerlerine göre (tünel direncinde olduğu gibi) yeniden hesaplanmış ve alınan yol değerleri bulunmuştur. Hesaplamalarda yatay dönemeç direnç katsayısı ( $k_c$ ) 800 olarak alınmıştır.

$$r_c = \frac{k_c}{R} = \frac{800}{480} \cong 1,7 \text{ kg/t (1. normal tren için)}$$

$$r_c = \frac{k_c}{R} = \frac{800}{297} \cong 2,7 \text{ kg/t (Yatar gövdeli tren için)}$$

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'nın 10. sütunundaki  $Z/M - (r_L + r_g + r_c)$  [ $(r_L + r_g + r_c) = r_{Tot}$ ] ifadesi, özgül çekim kuvvetinden özgül direnç kuvvetlerinin çıkarılmasıyla, harekete etki eden net kuvveti göstermektedir.

- 1. normal tren için

$$\frac{Z}{M} - (r_L + r_g + r_c) \rightarrow V = 58,5 \text{ km/sa için}$$

$$\frac{Z}{M} - (r_L + r_g + r_c) = 57 - (4,573 - 0,052 + 1,7) \cong 50,8 \text{ kg/t}$$

- Yatar gövdeli tren için

$$\frac{Z}{M} - (r_L + r_g + r_c) \rightarrow V = 102,5 \text{ km/sa için}$$

$$\frac{Z}{M} - (r_L + r_g + r_c) = 31,9 - (26,762 - 0,052 + 2,7) \cong 2,5 \text{ kg/t}$$

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'nın 11. sütununda her hız dilimi için yolculuk süreleri sunulmuştur. Denklem 2.62'de yolculuk süresinin bağıntısı verilmişti.

Denklem 2.62'deki  $\Delta V$  değeri, hız dilimlerini oluşturan sınır hızların farkıdır. 1 km/saatlik hız dilimleri oluşturulduğu için her hız dilimindeki  $\Delta V$  sabit ve 1 km/sa'e eşit olmaktadır.

Denklem 2.62'de paydadaki  $(Z/M) - r_{Tot}$  ifadesi, her hız dilimi için Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'nın 10. sütununda hesaplanmıştı.

Denklemdaki  $\beta$  değeri ise, kütle artış katsayısını içeren sabit değer kısmıdır. Kütle artış katsayısı hesap boyunca 0,10 değerinde ve sabit alındığından  $\beta$  değeri de değişmemektedir.

Tüm değerler yerine yazıldığında, yolculuk süreleri her hız dilimi için aşağıdaki örnek gösterimde olduğu gibi hesaplanmıştır.

- 1. normal tren için yolculuk süresi ( $V=58,5$  km/sa)

$$\Delta t = \frac{\frac{\Delta V}{3,6}}{\frac{Z}{M} - r_{Tot}} \cdot \beta = \frac{\frac{1}{3,6}}{50,8} \cdot 112,13 \cong 0,61 \text{ sn}$$

$$\beta = \frac{1000 \cdot (1 + \xi)}{g} = \frac{1000 \cdot (1 + 0,1)}{9,81} = 112,13$$

- Yatar gövdeli tren için yolculuk süresi ( $V=102,5$  km/sa)

$$\Delta t = \frac{\frac{\Delta V}{3,6}}{\frac{Z}{M} - r_{Tot}} \cdot \beta = \frac{\frac{1}{3,6}}{2,5} \cdot 112,13 \cong 12,51 \text{ sn}$$

$$\beta = \frac{1000 \cdot (1 + \xi)}{g} = \frac{1000 \cdot (1 + 0,1)}{9,81} = 112,13$$

Yolculuk süresine bağlı olarak alınan yol Denklem 2.63 ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Alınan yol değerleri, her hız dilimi için Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'nın 12. sütununda verilmiştir.

- 1. normal tren için alınan yol ( $V=58,5$  km/sa)

$$\Delta \ell = \Delta t \cdot \frac{V_{ort}}{3,6} = 0,61 \cdot \frac{58,5}{3,6} \cong 9,96 \text{ m}$$

- Yatar gövdeli tren için alınan yol ( $V=102,5$  km/sa)

$$\Delta \ell = \Delta t \cdot \frac{V_{ort}}{3,6} = 12,51 \cdot \frac{102,5}{3,6} \cong 356,28 \text{ m}$$

Bu şekilde bir hesap yöntemi, istenilen değerlere kadar hızlandırılan katar için geçen yolculuk süresi ve alınan yol değeri istasyonların aralarındaki bütün kesimler için hesaplanmıştır.

İki istasyon arasındaki hesaplamaların, istasyonların orta noktaları arasında olduğu söylenmişti. Dolayısıyla orta noktalar kilometraj olarak bilinmektedir. Frenleme evresine ilişkin olarak fren uzunluğu Denklem 2.44 ile hesaplanmıştır. Birçok fren uzunluğu bağıntısı olmasına karşın bu denklemin kullanılmasının sebebi, Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC)'nin de bu denklemi kullanmasıdır. Bir istasyondan kalkan trenin, vardığı istasyonun orta noktasında duracağı kabulü yapılmıştır. Bu nedenle fren uzunluğu hesaplanmış ve varış istasyonunun orta nokta kilometresinden kalkış istasyonu yönünde geriye doğru frenleme uzunluğu kadar gelinerek, katarın frenlemeye başlaması gereken noktası bulunmuştur. Bu noktadan frenleme başlatılmış ve katarın istasyonun orta noktasında durması sağlanmıştır. Frenleme ivmeleri ( $a_f$ ) 2.4.4 başlığı altında verilmişti. Her iki trenin frenleme ivmesinin ( $a_f$ ) aynı olduğu kabulü yapılmıştır. Bu ivmelerden, yolcu trenleri için olan  $0,40-0,50$  m/sn<sup>2</sup> aralığından  $0,45$  m/sn<sup>2</sup> değeri kullanılmıştır. Kurgulanan tren hareketi Şekil 4.5'de şematik olarak gösterilmiştir.

- 1. normal tren için fren uzunluğu ( $V=74$  km/sa)

$$L_f = \frac{0,0386 \cdot V^2(km/sa)}{\alpha_f - \frac{i}{100}} = \frac{0,0386 \cdot 74^2}{0,45 - \frac{-(-0,052)}{100}} = 471 \text{ m}$$

- Yatar gövdeli tren için fren uzunluğu ( $V=103 \text{ km/sa}$ )

$$L_f = \frac{0,0386 \cdot V^2 (\text{km/sa})}{\alpha_f - \frac{i}{100}} = \frac{0,0386 \cdot 103^2}{0,45 - \frac{-(-0,052)}{100}} \cong 912 \text{ m}$$

Frenleme uzunluğunda geçen süre, frenleme uzunluğunun; frenlemeye başlanılan hız ile frenleme sonundaki hız değerinin ortalamasına bölünmesi ile bulunmuştur.

$$1. \text{ Normal Tren İçin Frenleme Süresi} = \frac{\Delta \ell}{\frac{V_1 - V_2}{\frac{3,6}{2}}} = \frac{471}{\frac{74 - 0}{\frac{3,6}{2}}} = \frac{471}{10,28} \cong 46 \text{ sn}$$

$$\text{Yatar Gövdeli Tren İçin Frenleme Süresi} = \frac{\Delta \ell}{\frac{V_1 - V_2}{\frac{3,6}{2}}} = \frac{912}{\frac{103 - 0}{\frac{3,6}{2}}} = \frac{912}{14,31} \cong 64 \text{ sn}$$

Frenleme evresinde geçen süre ve alınan yol, demeraj ve rejim evresindeki süre ve yol ile toplanarak toplam geçen süre ve alınan yol bulunmuştur.

Direnç kuvvetleri etkisinde, 1. normal tren ve yatar gövdeli tren için yapılan süre ve hız hesaplarının özet ve sonuç verileri Çizelge 4.7’de, 2. normal tren ve yatar gövdeli tren için Çizelge 4.8’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’in ilk iki sütununda, Zonguldak-Karabük arasındaki istasyonlar verilmiştir. 3. sütununda ise bu istasyonlar arası uzaklıklar gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’in 4., 5. ve 6. sütunlarında, normal trenler için yapılan hesapların sonuçlarına yer verilmiştir. 4. sütunda normal trenler için iki istasyon arasındaki gerçekleşen yolculuğun ortalama hızı gösterilmiştir. 5. sütunda iki istasyon arasında yapılan en büyük hızlar verilmiştir. 6. sütunda ise istasyonlar arasındaki yolculuk süreleri verilmiştir. Yolculuk süresi bilgisi frenleme süresi de dahil edilerek bulunmuştur.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’in 7., 8. ve 9. sütunlarında, yukarıda normal trenler için açıklanan değerler, bu kez yatar gövdeli tren için verilmiştir.

**Çizelge 4.7** 1. normal tren ve yatar gövdeli tren için yapılan hesaplamalara ait özet ve sonuçlar.

| Kalkış İstasyonu      | Varış İstasyonu       | İstasyonlar Arası Uzaklık (m) | 1. Normal Tren       |                      |                      | Yatar Gövdeli Tren   |                      |                      | Ortalama Hız Artışı (km/sa) | Ortalama Hız Artışı (%) | Yolculuk Süresinde Azalma (sn) | Yolculuk Süresinde Azalma (%) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                       |                       |                               | Ortalama Hız (km/sa) | En Büyük Hız (km/sa) | Yolculuk Süresi (sn) | Ortalama Hız (km/sa) | En Büyük Hız (km/sa) | Yolculuk Süresi (sn) |                             |                         |                                |                               |
| Zonguldak             | Çatalağzı             | 9905                          | 69,3                 | 74                   | 515                  | 82,8                 | 103                  | 431                  | 13,5                        | 19,5                    | 84                             | 16,3                          |
| Çatalağzı             | Filyos                | 14685                         | 80,7                 | 86                   | 655                  | 89,8                 | 104                  | 589                  | 9,0                         | 11,2                    | 66                             | 10,1                          |
| Filyos                | Saltukova             | 10402                         | 75,0                 | 81                   | 499                  | 85,4                 | 105                  | 438                  | 10,4                        | 13,8                    | 61                             | 12,1                          |
| Saltukova             | Çaycuma               | 10492                         | 75,1                 | 81                   | 503                  | 86,6                 | 107                  | 436                  | 11,5                        | 15,3                    | 67                             | 13,2                          |
| Çaycuma               | Gökçebey              | 15979                         | 83,7                 | 89                   | 687                  | 89,9                 | 103                  | 640                  | 6,2                         | 7,4                     | 47                             | 6,9                           |
| Gökçebey              | Gökçebey Balast Ocağı | 6165                          | 67,5                 | 75                   | 329                  | 70,2                 | 91                   | 316                  | 2,7                         | 4,0                     | 13                             | 3,8                           |
| Gökçebey Balast Ocağı | Kayadibi              | 7353                          | 66,4                 | 72                   | 399                  | 76,1                 | 100                  | 345                  | 9,7                         | 14,6                    | 54                             | 13,5                          |
| Kayadibi              | Yenice                | 12361                         | 67,7                 | 71                   | 657                  | 82,9                 | 97                   | 537                  | 15,1                        | 22,4                    | 120                            | 18,3                          |
| Yenice                | Balıkısık             | 8285                          | 61,4                 | 65                   | 486                  | 77,9                 | 98                   | 383                  | 16,5                        | 26,9                    | 103                            | 21,2                          |
| Balıkısık             | Bolkuş                | 14534                         | 66,5                 | 69                   | 787                  | 81,6                 | 93                   | 640                  | 15,1                        | 22,7                    | 147                            | 18,6                          |
| Bolkuş                | Pirinçlik             | 2800                          | 56,1                 | 66                   | 180                  | 58,9                 | 95                   | 171                  | 2,7                         | 4,8                     | 8                              | 4,6                           |
| Pirinçlik             | Karabük               | 8221                          | 66,2                 | 71                   | 447                  | 76,0                 | 95                   | 389                  | 9,9                         | 14,9                    | 58                             | 13,0                          |
| TÜM HAT BOYUNCA       |                       | 121180                        | 71,0                 | 89                   | 6142                 | 82,1                 | 107                  | 5316                 | 11,0                        | 15,6                    | 827                            | 13,5                          |

**Çizelge 4.8** 2. normal tren ve yatar gövdeli tren için yapılan hesaplamalara ait özet ve sonuçlar.

| Kalkış İstasyonu      | Varış İstasyonu       | İstasyonlar Arası Uzaklık (m) | 2. Normal Tren       |                      |                      | Yatar Gövdeli Tren   |                      |                      | Ortalama Hız Artışı (km/sa) | Ortalama Hız Artışı (%) | Yolculuk Süresinde Azalma (sn) | Yolculuk Süresinde Azalma (%) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                       |                       |                               | Ortalama Hız (km/sa) | En Büyük Hız (km/sa) | Yolculuk Süresi (sn) | Ortalama Hız (km/sa) | En Büyük Hız (km/sa) | Yolculuk Süresi (sn) |                             |                         |                                |                               |
| Zonguldak             | Çatalağzı             | 9905                          | 68,6                 | 74                   | 520                  | 82,8                 | 103                  | 431                  | 14,1                        | 20,6                    | 89                             | 17,1                          |
| Çatalağzı             | Filyos                | 14685                         | 79,9                 | 86                   | 661                  | 89,8                 | 104                  | 589                  | 9,8                         | 12,3                    | 72                             | 10,9                          |
| Filyos                | Saltukova             | 10402                         | 74,2                 | 81                   | 505                  | 85,4                 | 105                  | 438                  | 11,2                        | 15,1                    | 66                             | 13,1                          |
| Saltukova             | Çaycuma               | 10492                         | 74,2                 | 81                   | 509                  | 86,6                 | 107                  | 436                  | 12,3                        | 16,6                    | 72                             | 14,2                          |
| Çaycuma               | Gökçebey              | 15979                         | 82,8                 | 89                   | 694                  | 89,9                 | 103                  | 640                  | 7,1                         | 8,5                     | 55                             | 7,9                           |
| Gökçebey              | Gökçebey Balast Ocağı | 6165                          | 66,4                 | 75                   | 334                  | 70,2                 | 91                   | 316                  | 3,8                         | 5,7                     | 18                             | 5,4                           |
| Gökçebey Balast Ocağı | Kayadibi              | 7353                          | 65,6                 | 72                   | 404                  | 76,1                 | 100                  | 345                  | 10,5                        | 16,1                    | 59                             | 14,6                          |
| Kayadibi              | Yenice                | 12361                         | 67,2                 | 71                   | 662                  | 82,9                 | 97                   | 537                  | 15,7                        | 23,3                    | 125                            | 18,9                          |
| Yenice                | Balıkısık             | 8285                          | 60,9                 | 65                   | 490                  | 77,9                 | 98                   | 383                  | 17,0                        | 28,0                    | 107                            | 21,9                          |
| Balıkısık             | Bolkuş                | 14534                         | 66,1                 | 69                   | 792                  | 81,6                 | 93                   | 640                  | 15,5                        | 23,5                    | 152                            | 19,2                          |
| Bolkuş                | Pirinçlik             | 2800                          | 54,7                 | 66                   | 184                  | 58,9                 | 95                   | 171                  | 4,2                         | 7,6                     | 13                             | 7,1                           |
| Pirinçlik             | Karabük               | 8221                          | 65,5                 | 71                   | 452                  | 76,0                 | 95                   | 389                  | 10,6                        | 16,2                    | 63                             | 13,9                          |
| TÜM HAT BOYUNCA       |                       | 121180                        | 70,3                 | 89                   | 6207                 | 82,1                 | 107                  | 5316                 | 11,8                        | 16,8                    | 891                            | 14,4                          |

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'in 10. sütununda, istasyonlar arasında yapılan yolculukların ortalama hızlarının, yatar gövdeli ve normal trenlerin arasındaki farkları verilmiştir. 11. sütunda ise, yatar gövdeli trenin normal trenlere göre yarattığı hız artışının yüzde cinsinden değeri gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'in 12. sütununda, normal trenler ve yatar gövdeli tren için hesaplanan yolculuk sürelerinin arasındaki farklar verilmiştir. 13. sütunda ise yatar gövdeli trenin normal trenlere göre daha az yolculuk süresine sahip olması dolayısıyla, bu süre farklarının yüzde cinsinden değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'in son satırında tüm hat boyunca elde edilen değerler verilmiştir. Zonguldak-Karabük arasındaki toplam uzunluk 3. sütunda verilmektedir. Toplam uzunluk, toplam yolculuk süresine bölünerek, tüm hat boyunca ortalama hızlar normal trenler ve yatar gövdeli tren için bulunmuş ve son satırda 4. ve 7. sütunlarda gösterilmiştir. Elde edilen bu hızlara göre hızdaki artış ve yüzdesi ile yolculuk süresindeki azalma ve yüzdesi son satırda ve ilgili sütunlarda sunulmaktadır.

Çizelge 4.7'de verilen hız değerleri incelendiğinde, yatar gövdeli tren kullanımıyla istasyonlar arasında hızların 1. normal trene göre 2,7 km/sa ile 16,5 km/sa arasında değişen değerlerde arttığı, artış oranlarının ise %4 ile %26,9 arasında değiştiği görülebilir. Hattın genelini temsil eden ortalama değerler incelendiğinde hız artışının 11 km/sa değerinde (%15,6 oranında) olduğu görülür.

Çizelge 4.7'de verilen süre değerleri incelendiğinde, yatar gövdeli tren kullanımıyla istasyonlar arasında yolculuk sürelerinin 1. normal trene göre 8 ile 147 saniye arasında değişen değerlerde azaldığı, azalma oranlarının ise %3,8 ile %21,2 arasında değiştiği görülebilir. Hattın genelini temsil eden ortalama değerler incelendiğinde yolculuk süresindeki azalmanın 827 saniye değerinde (%13,5 oranında) olduğu görülür.

Çizelge 4.8'de verilen hız değerleri incelendiğinde, yatar gövdeli tren kullanımıyla istasyonlar arasında hızların 2. normal trene göre 3,8 km/sa ile 17 km/sa arasında değişen değerlerde arttığı, artış oranlarının ise %5,7 ile %28 arasında değiştiği görülebilir. Hattın genelini temsil eden ortalama değerler incelendiğinde hız artışının 11,8 km/sa değerinde (%16,8 oranında) olduğu görülür.

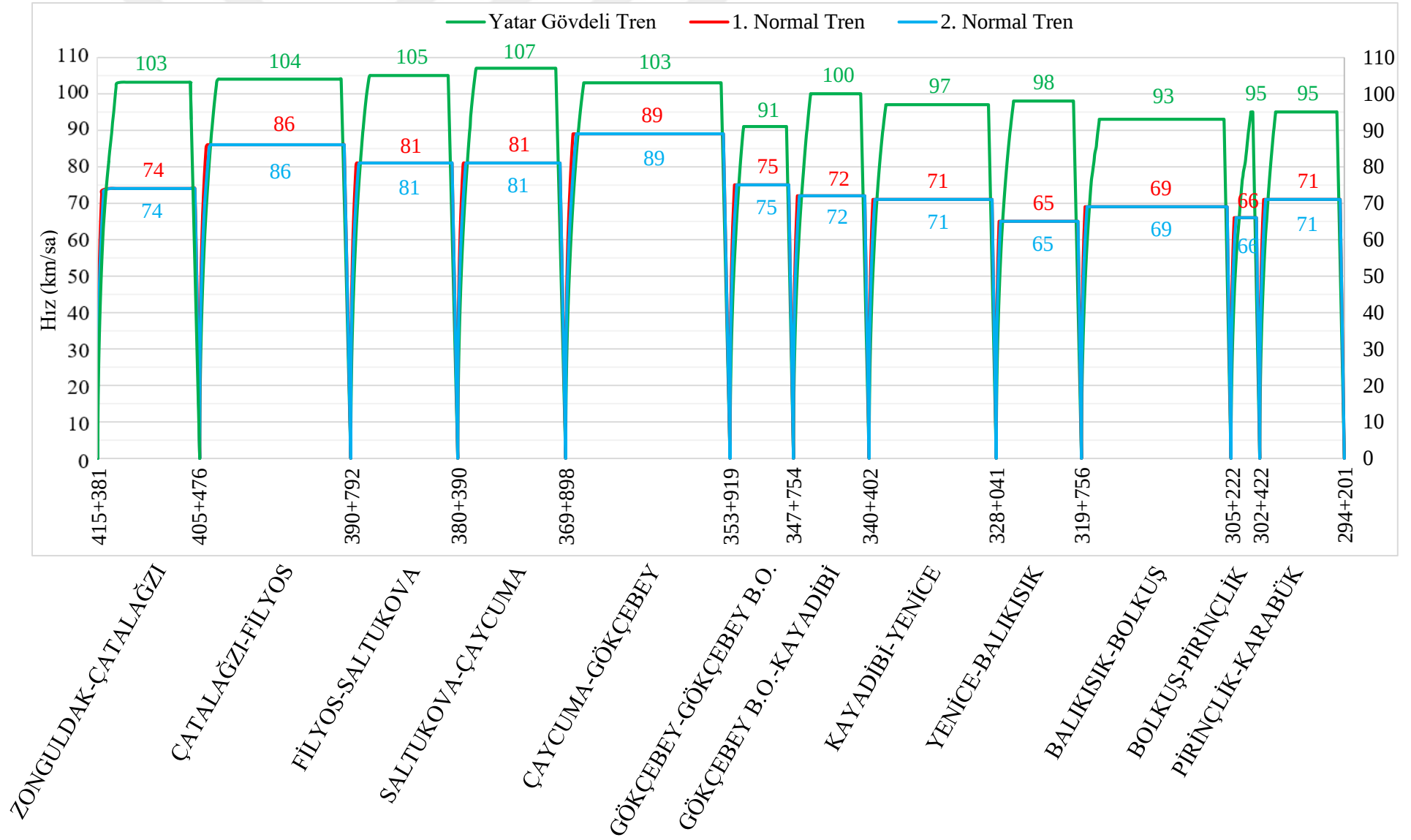
Çizelge 4.8'de verilen süre değerleri incelendiğinde, yatar gövdeli tren kullanımıyla istasyonlar arasında yolculuk sürelerinin 2. normal trene göre 13 ile 152 saniye arasında değişen değerlerde azaldığı, azalma oranlarının ise %5,4 ile %21,9 arasında değiştiği görülebilir. Hattın genelini temsil eden ortalama değerler incelendiğinde yolculuk süresindeki azalmanın 891 saniye değerinde (%14,4 oranında) olduğu görülür.

Yatar gövdeli tren ile ağırlıkları eşit fakat yolcu kapasiteleri farklı olan 1. normal tren ve yolcu kapasiteleri eşit fakat ağırlıkları farklı olan 2. normal tren için, 13 istasyon arasında 12 kesim için yapılan hesaplamalara ait hızlanma (demeraj), sabit (rejim) ve frenleme evrelerinin durumuna ilişkin sonuç grafiği ölçeksiz olarak Şekil 4.8'de verilmektedir.

Şekil 4.8'de görülen grafiğin x ekseninde istasyonların kilometresi, y ekseninde ise hızlar yer almaktadır. 3 tren için de iki istasyon arasındaki hareketin ne şekilde gerçekleştiği gösterilmiştir. Durgun halde olan tren ilk olarak demeraj evresinde hızlanarak sabit rejimdeki hızına ulaşmakta ve sonra durması gereken noktadan gerektiği kadar uzaklıkta frenleme evresine girerek yavaşlayıp durmaktadır. Her istasyon arasında ulaşılabilen en büyük ve aynı zamanda sabit rejim hızları ilgili renge ait her tren için grafik üzerinde belirtilmiştir. Grafiğin altında ilgili kilometraj aralıklarında istasyon isimleri de hareketin hangi aralığa ait olduğunun ifadesi için verilmiştir.

Şekil 4.8'deki grafiğe bakıldığında 1. normal tren ve 2. normal tren arasındaki 104 tonluk ağırlık farkının, ulaşılabilen en yüksek hızı etkilemediği, fakat fazla ağırlıktan dolayı artan direnç kuvvetleri sebebiyle aynı hıza daha uzun mesafede ulaşabildiği ve demeraj evresinin daha uzun olduğu (mavi ve kırmızı çizgi incelendiğinde) görülmektedir.

Ayrıca yatar gövdeli tren ve normal trenler arasındaki hız farklılığı Şekil 4.8'de belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.8 İstasyonlar arasında demeraj, rejim ve frenleme evrelerinin durumu.



## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yatar gövdeli trenlerin, mevcut demiryolu hatlarında işletilmesinin yolculuk süresi ve hızlar üzerindeki etkisi, Zonguldak-Karabük demiryolu hattı için incelenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında incelenen hattın yatay geometrisi üzerinde, yatar gövdeli trenlerin kullanılması durumunda yapılabilir en büyük hızlar bulunmuştur. Hattın her bir kesimi ayrı değerlendirildiğinde aynı geometri üzerinde yatar gövdeli trenlerin normal trenlere göre %22,7 ile %216,7 aralığında değişen oranlarda daha hızlı gidebileceği saptanmıştır. Hattın geneli birlikte düşünüldüğünde ise hızda 41 km/sa değerinde (%53,4 oranında) bir artış olduğu görülmüştür.

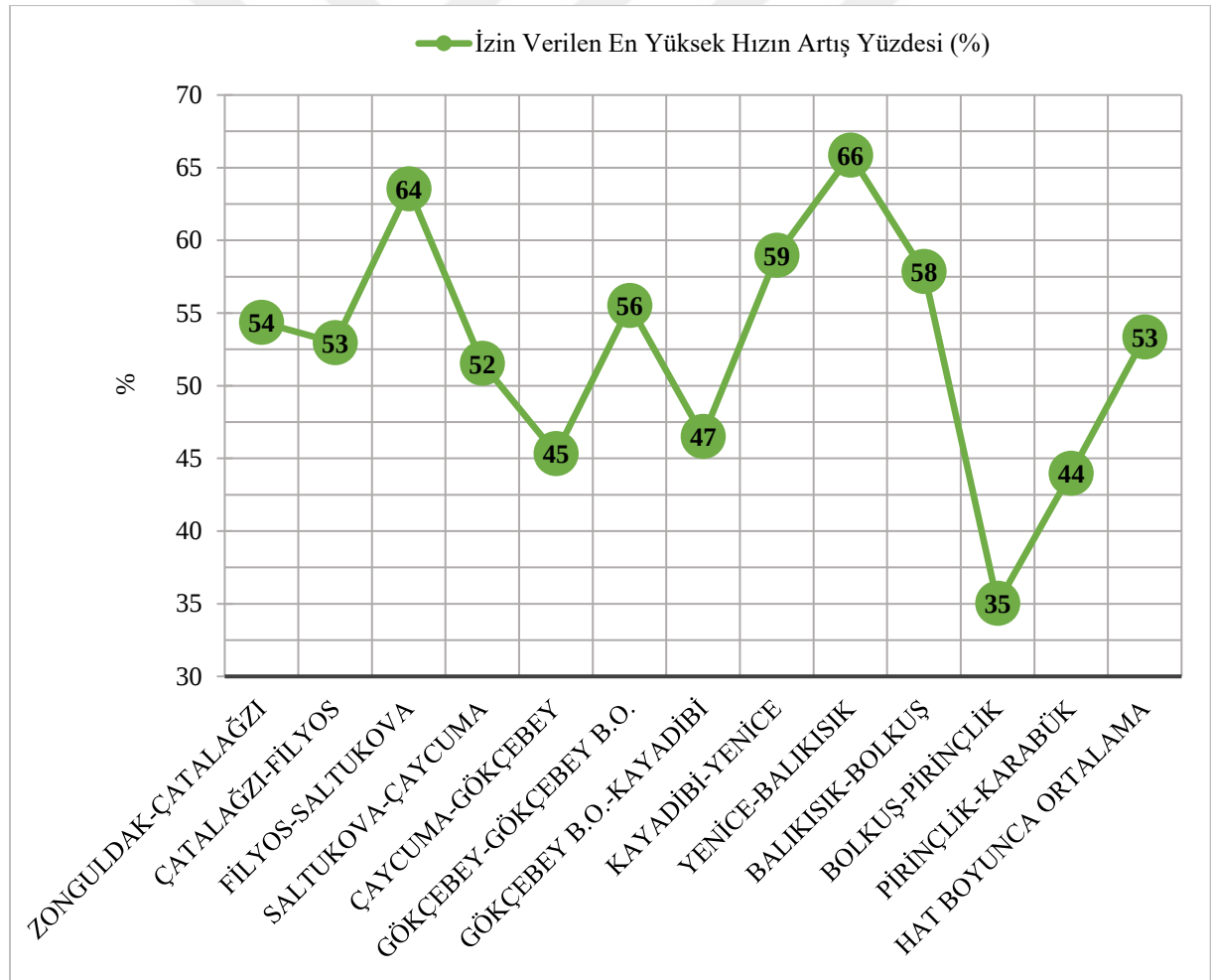
Şekil 5.1’de, her iki istasyon arasında normal trenler ile yatar gövdeli tren için yapılabilir en büyük hızların artış oranları verilmiştir. Şekilde yatar gövdeli trenlerin teknik üstünlüğünün sonuçlara hız artışı olarak yansıdığı görülebilir.

İkinci aşamada direnç kuvvetleri altında taşıt hareketleri incelenmiştir. Yolculuk hızı açısından hattın her bir kesimi ayrı değerlendirildiğinde yatar gövdeli trenin kendisiyle aynı ağırlıkta ve yarısı kadar yolcu kapasitesi olan 1. normal trene göre 2,7 km/sa ile 16,5 km/sa aralığında değişen değerlerde (%4 ile %26,9 arasında değişen oranlarda) daha hızlı gidebileceği saptanmıştır. Hattın geneli birlikte düşünüldüğünde ise hızda 11 km/sa değerinde (%15,6 oranında) bir artış olduğu görülmüştür.

Direnç kuvvetleri altında taşıt hareketleri yolculuk süresi açısından değerlendirildiğinde ise hattın her bir kesimi ayrı değerlendirildiğinde yatar gövdeli trenin kendisiyle aynı ağırlıkta ve yarısı kadar yolcu kapasitesi olan 1. normal trene göre 8 ile 147 saniye aralığında değişen değerlerde (%3,8 ile %21,2 arasında değişen oranlarda) süre azalması saptanmıştır. Hattın geneli birlikte düşünüldüğünde süre azalması 827 saniye (13 dakika 47 saniye) değerinde (%13,5 oranında) gerçekleşmektedir.

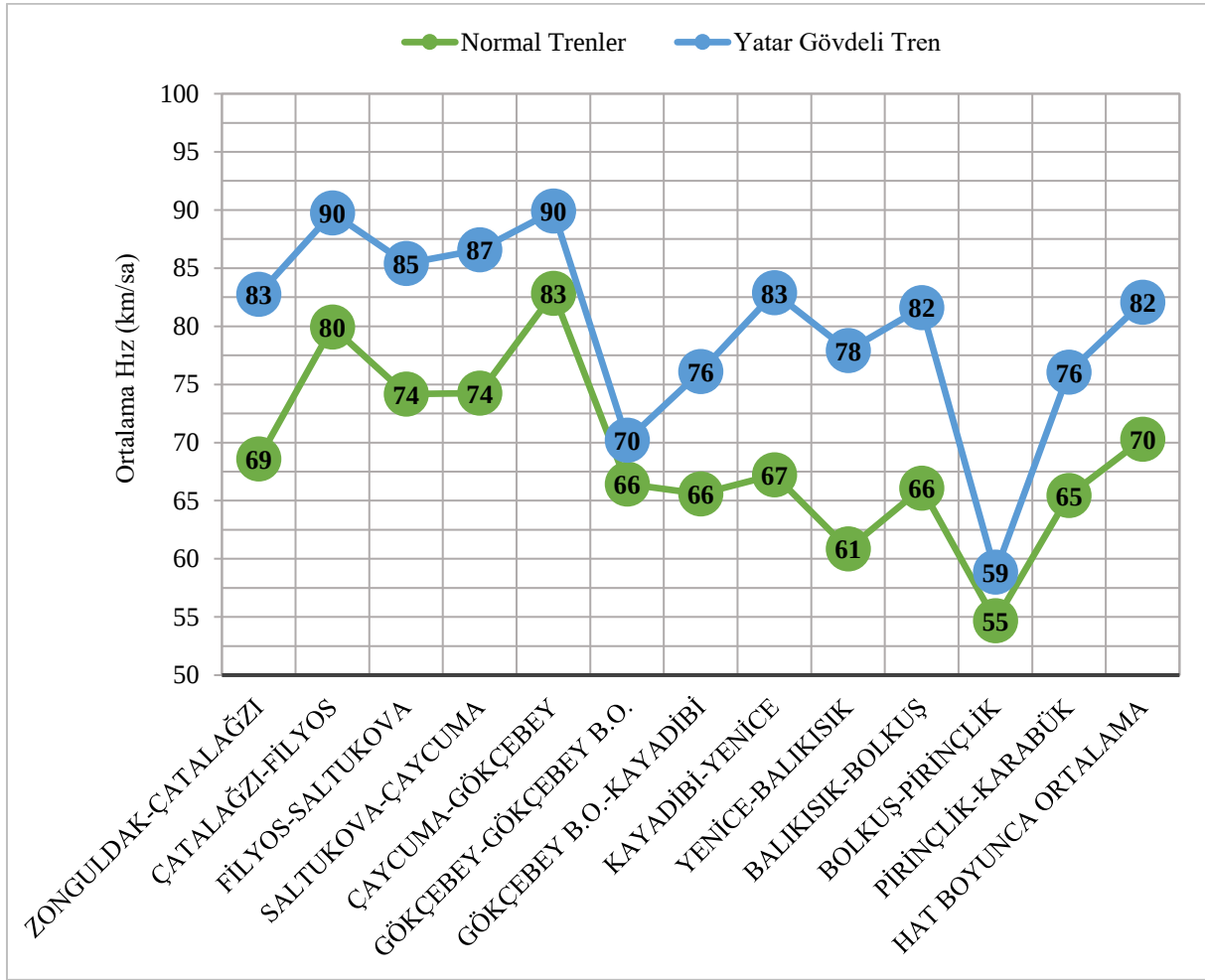
Yolculuk hızı açısından hattın her bir kesimi ayrı değerlendirildiğinde yatar gövdeli trenin kendisinden 104 ton daha fazla ağırlıkta ve aynı yolcu kapasitesi olan 2. normal trene göre 3,8 km/sa ile 17 km/sa aralığında değişen değerlerde (%5,7 ile %28 arasında değişen oranlarda) daha hızlı gidebileceği saptanmıştır. Hattın geneli birlikte düşünüldüğünde ise hızda 11,8 km/sa değerinde (%16,8 oranında) bir artış olduğu görülmüştür.

Direnç kuvvetleri altında taşıt hareketleri yolculuk süresi açısından değerlendirildiğinde ise hattın her bir kesimi ayrı değerlendirildiğinde yatar gövdeli trenin kendisinden 104 ton daha fazla ağırlıkta ve aynı yolcu kapasitesi olan 2. normal trene göre 13 ile 152 saniye aralığında değişen değerlerde (%5,4 ile %21,9 arasında değişen oranlarda) süre azalması saptanmıştır. Hattın geneli birlikte düşünüldüğünde süre azalması 891 saniye (14 dakika 51 saniye) değerinde (%14,4 oranında) gerçekleşmektedir.



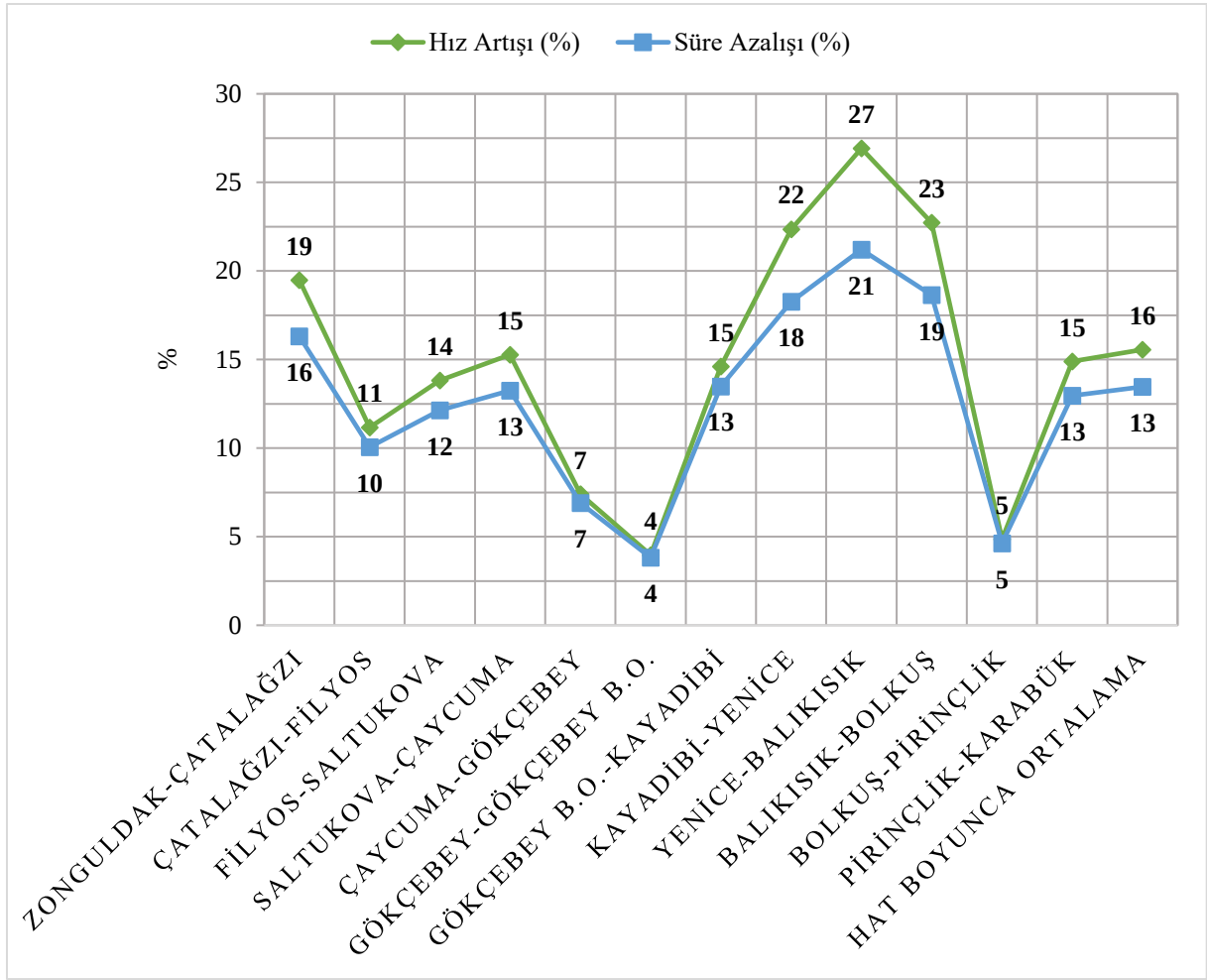
**Şekil 5.1** Yatar gövdeli tren için hesaplanan hızların, mevcut en büyük hızlara göre artış yüzdesi.

Şekil 5.2’de, istasyonlar arasında ve tüm hat genelinde çalışmada kullanılan normal trenler ve yatar gövdeli trenin ulaşabildikleri hızların ağırlıklı ortalamaları gösterilmiştir.

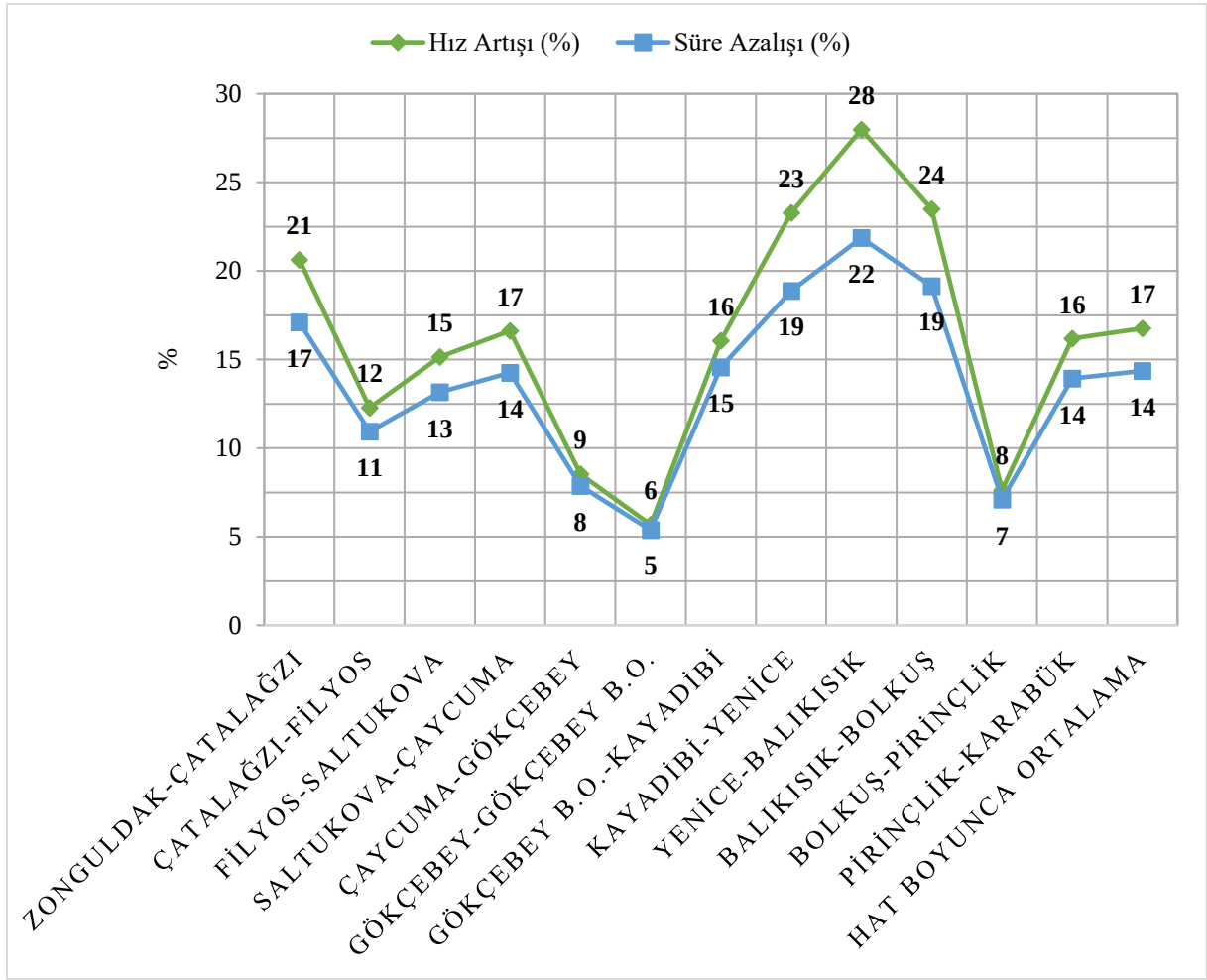


**Şekil 5.2** Normal trenler ve yatar gövdeli trenin ortalama hızlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.3’de, istasyonlar arasında ve tüm hat genelinde çalışmada kullanılan aynı ağırlıkta ve farklı yolcu kapasitesine sahip 1. normal tren ve yatar gövdeli trenin arasında, Şekil 5.4’de ise aynı yolcu kapasitesine ve farklı ağırlıklara sahip 2. normal tren ve yatar gövdeli trenin arasında ortaya çıkan hız artışı ve yolculuk süresindeki azalma miktarları gösterilmektedir.



**Şekil 5.3** 1. normal tren ve yatar gövdeli trenler arasında ortaya çıkan hız artışı ve yolculuk süresinin yüzde cinsinden karşılaştırılması.



**Şekil 5.4** 2. normal tren ve yatar gövdeli trenler arasında ortaya çıkan hız artışı ve yolculuk süresinin yüzde cinsinden karşılaştırılması.

Yapılan çalışmada, yatar gövdeli trenlerin geleneksel hatlarda daha yüksek hızlara çıkabildiği ve bu sebeple yolculuk süresini azalttığı görülmüştür. Bulunan yolculuk sürelerine işletmeden kaynaklanan gecikmelerin de eklenmesi gerekeceği açıktır.

Yatay geometrinin izin verdiği en büyük hızlar bulunurken geçiş eğrilerinin kısa olması durumunda hızlar daha düşük çıkabilmektedir. Bu nedenle bir hatta yatar gövdeli tren kullanılması düşünülyorsa geçiş eğrisi boylarının uzatılması beklenen yararı arttıracaktır.

Yatar gövdeli trenlerin normal trenlere göre yolculuk hızları yüksek olduğundan fren uzunlukları da uzun çıkmaktadır. Bu yüzden, yatar gövdeli trenlerin kullanılması düşünülen hatlar için sinyalizasyon siteminde ve hareket çizelgelerinde (orerlerde) düzenlemeler yapılmalıdır.

Yatar gövdeli trenlerin eğilmeden dolayı yük gabarileri farklı olmaktadır. Özellikle tünel ve kafes kirişli köprü gibi sanat yapılarında UIC gabarilerine sahip sorun teşkil etmeyen ölçülerde taşıtlar üretilse de hatta bulunan sanat yapılarında olası gabari farklılıklarına dikkat edilmelidir.

Yatar gövdeli trenler yalnızca yolcu treni olarak hizmet vermektedir. Çeken ve çekilen taşıtlardan oluşan lokomotifli bir dizi veya dizel ve elektrikli tren setlerinden oluşan bir dizi kullanılabilir. Çalışmada eğilme sitemlerinin (pasif ve aktif) sonuçlar üzerinde bir fark yaratabileceği beklenmediğinden üzerinde durulmamıştır.

Yatar gövdeli trenlerin, normal trenlere göre daha pahalı olduğu ve daha sık üstyapı bakımı gerektirdiği bilinmektedir. Fakat, yeni bir hat inşası ile karşılaştırıldığında, yatar gövde tren işletmesi ile hat üzerinde hız artırmanın maliyeti çok daha az olmaktadır.

Yatar gövdeli trenlerin aynı geometrik özelliklere sahip bir hat üzerinde, normal trenlere göre daha hızlı olduğu görülmüştür. Ülkemizdeki demiryolu ağında, yatar gövdeli trenler ile daha hızlı bir yolculuk olanağı sunulacağı, böylece yeni hat inşasına seçenek oluşturacağı düşünülmektedir. Hız artışının demiryolu yolcu taşımacılığını diğer ulaşım türleri karşısında daha rekabetçi bir konuma getirebileceği değerlendirilmektedir.

Benzer bir çalışma farklı geleneksel hatlar için de yapılabilir. Ayrıca hızın sanat yapıları ve toprak işleri üzerinde maliyeti artıran etkisi bilindiğinden, yapımı düşünülen YHT hatlarında da proje hızını düşük tutarak bu maliyetten kaçınmak, buna karşın yatar gövdeli tren uygulaması ile işletme hızını yüksek tutmak mümkün olabilir.

## KAYNAKLAR

- BAKKA** (Ed.) (2017) *Kömüre Giden Demiryolu “Kelebeğin Rüyasına Yolculuk”*. 1. Baskı, ISBN:978-605-83349-4-6, T.C. Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı, Ankara (e-kitap), 207 s.
- CEN** (Ed.) (2017) *BS EN 13803:2017 Railway applications Track alignment design parameters - Track gauges 1 435 mm and wider*. 1st edition, ISBN:978 0 580 82260 5, The British Standards Institution, Brussels, 97 pp/s.
- Evren G, DüNDAR S** (2016) *Demiryolu*. 1. Baskı, ISBN:978-975-511-193-3, Birsen Yayınevi, İstanbul, 261 s.
- Lindahl M** (Ed.) (2001) *Track Geometry for High-Speed Railways: A Literature Study*. 1st edition, Royal Institute of Technology, Stockholm, 148 pp/s.
- Netzel A** (2002) Talgo XXI – zuverlässige Neigetechnik im hochwertigen Reisezugverkehr. *Glaser's Annalen*, 126 (9): 404-414.
- Persson R** (Ed.) (2007) *Tilting trains–Description and analysis of the present situation A literature study*. 1st edition, The Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping, 84 pp/s.
- Profillidis V A** (1995) *Railway Engineering*. 1st edition, ISBN:0 291 39828 6, Ashgate Publishing Company, Cambridge, 287 pp/s.
- Profillidis V A** (2014) *Railway Management and Engineering*. 4th edition, ISBN:9781472407788, Ashgate Publishing Company, Burlington (e-book), 688 pp/s.
- Pyrgidis C N** (2016) *Railway Transportation Systems Design, Construction and Operation*. 1st edition, ISBN: 978-1-4822-6216-2, CRC Press, Boca Raton (e-book), 461 pp/s.
- Rochat F** (2007) Simplified tilt. *Master Thesis*, KTH Royal Institute of Technology, Industrial Engineering and Management, Machine Design, Stockholm, 110 pp/s.
- TCDD** (2017) *Irmak-Karabük-Zonguldak Demiryolu Hattı Projeleri*. TCDD, Ankara.
- TCDD** (2020) *Şebeke Bildirim Dokümanları Yapı ve Yük Gabarileri*. TCDD, Ankara.
- TCDD** (2019) *2015-2019 İstatistik Yıllığı*. TCDD, Ankara.
- Tülomsaş** (2007) *DE Lokomotif ve Cer Motorları Kataloğu*. Türkiye Lokomotif ve Motor Sanayi Anonim Şirketi, Eskişehir.
- URL-1** <[https://tr.wikipedia.org/wiki/Irmak-Zonguldak\\_demiryolu#/media/Dosya:Irmak-Karabük-Zonguldak.png](https://tr.wikipedia.org/wiki/Irmak-Zonguldak_demiryolu#/media/Dosya:Irmak-Karabük-Zonguldak.png)>, Ziyaret tarihi: 08.03.2021.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- URL-2** <[https://tr.wikipedia.org/wiki/Demiryolu\\_hat\\_açıklığı#/media/Dosya:Rail\\_gauge\\_world.png](https://tr.wikipedia.org/wiki/Demiryolu_hat_açıklığı#/media/Dosya:Rail_gauge_world.png)>, Ziyaret tarihi: 01.03.2021.
- URL-3** <[https://en.wikipedia.org/wiki/File:DC283\\_hokuto\\_001.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:DC283_hokuto_001.jpg)>, Ziyaret tarihi: 21.12.2020.
- URL-4** <[https://c1.staticflickr.com/3/2457/4005055213\\_3a86e2ee4e\\_b.jpg](https://c1.staticflickr.com/3/2457/4005055213_3a86e2ee4e_b.jpg)>, Ziyaret tarihi: 21.12.2020.
- URL-5** <[http://www.trainsofturkey.com/pmwiki.php/History/TCDD#Irmak\\_Zonguldak](http://www.trainsofturkey.com/pmwiki.php/History/TCDD#Irmak_Zonguldak)>, Ziyaret tarihi: 21.12.2020.
- URL-6** <<https://www.tcdd.gov.tr/uploads/demiryoluharitasi.jpg>>, Ziyaret tarihi: 17.10.2020.



## ÖZGEÇMİŞ

Doğancan DİLEK, ilk ve orta öğrenimini Zonguldak Ahmet Erdoğan İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini Zonguldak Erdemir Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2011 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2016 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak, aynı yıl Superlit Boru Sanayi A.Ş.'ye inşaat mühendisi olarak girdi ve DSİ idaresi altındaki çeşitli boru hattı yapım projelerinde çalıştı. 2017 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aynı yıl KOBİ Mühendislik ve Müşavirlik Ltd. Şti.'de proje mühendisi olarak girdi. Burada karayolu ve demiryolu güzergah projeleri, drenaj projeleri, trafik projeleri ve karayolu kavşak projelerinin; Microstation, In-Roads ve Autocad Civil 3D programları ile tasarımında çalıştı. 2018 yılında Neopro Mühendislik Ltd. Şti.'de demiryolu ve karayolu güzergahlarının projelendirilmesinde, drenaj ve altyapı projelerinde görev aldı. 2020 yılında Sigal Mühendislik Ltd. Şti.'de yurtiçi ve yurtdışı ulaştırma ve altyapı projelerinin yapımında yer aldı. Halen aynı şirkette çalışma hayatına devam etmektedir.