

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLLARINDA
HAVA KİRLİLİĞİ DİRENİM İLİŞKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elif ERSÖZ**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Ulaştırma Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLLARINDA
HAVA KİRLİLİĞİ DİRENİM İLİŞKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elif ERSÖZ
(501061420)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK (İTÜ)

**Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. İsmail ŞAHİN (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Nevzat ERSELCAN (İTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Gerek lisans, gerekse yüksek lisans eğitimim boyunca, çalışmalarına yön veren, değerli fikirleriyle bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, anlayışını ve emeğini benden esirgemeyen Sayın Hocam Doç. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e ve her zaman bana destek olan arkadaşlarıma saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm hayatım boyunca benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, bana karşı gösterdikleri sevgi, sabır, anlayış ve sağlamış oldukları maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2009

Elif ERSÖZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
TÜRKÇE ÖZET.....	xv
İNGİLİZCE ÖZET.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. ULAŞTIRMA SİSTEMLERİNDE ENERJİ TÜKETİMİ VE ETKİLİ FAKTÖRLER.....	5
2.1 Demiryollarında Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler.....	7
2.2 Ulaştırma Sistemlerinde Enerji Tüketimi Açısından Demiryolunun Yeri.....	12
3. DEMİRYOLUNDA ÇEKİM TÜRLERİ.....	15
3.1 Buharlı Çekim.....	15
3.2 Dizel Çekim.....	17
3.2.1 İletim sistemleri.....	19
3.2.2 Dizel lokomotifin görevleri.....	20
3.2.3 Dizel çekimin avantajları ve dezavantajları.....	21
3.3 Elektrikli Çekim.....	21
3.3.1 Elektrikli çekim sistemleri.....	23
3.3.1.1 Doğru akımlı çekim (DC).....	23
3.3.1.2 Alternatif akımlı çekim (AC).....	24
3.3.1.3 Elektrikli çekim sisteminin dizele göre avantaj ve dezavantajları.....	26
3.3.1.4 Elektrikli çekim sisteminin fizibilite analizi.....	27
3.3.1.5 Enerji iletim hattı (havai katener sistemi).....	29
3.3.1.6 Trafolar.....	31
3.3.1.7 Senkron ve asenkron motorlar.....	32
4. DEMİRYOLU DİRENİMLERİ.....	35
4.1 Doğru ve Düzlük Direnimi (Lokomotiflerin Daimi Direnimi).....	35
4.1.1 Doğru ve düzlük direnimi için ampirik bağıntılar.....	38
4.2 Tünel Direnimleri.....	46
4.2.1 Tünelde basınç sorunları.....	46
4.2.2 Tünellerde hava (aerodinamik) direniminin artması.....	48

4.2.3	Yüksek hızlarda gerekli tünel kesitleri.....	49
4.3	Kurba Direnimi.....	49
4.4	Eğim Direnimi.....	51
4.5	Demeraj Direnimi.....	52
5.	DEMİRYOLUNDA ENERJİ TÜKETİMİNE BAĞLI HAVA KİRLİLİĞİ...	55
5.1	Kirletici Maddeler ve Özellikleri.....	56
5.1.1	Karbon monoksit.....	56
5.1.2	Azot oksitler.....	57
5.1.3	Partiküler madde.....	57
5.1.4	Kükürt oksitleri.....	58
5.1.5	Hidro karbonlar.....	58
5.2	İçten Yanmalı Motor Emisyonları.....	59
5.3	Dizel Motor Emisyonları.....	63
5.4	Emisyonları Azaltma Çalışmaları.....	63
6.	DEMİRYOLU EMİSYONLARININ HESABI.....	67
6.1	Emisyon Hesaplama Yöntemleri.....	68
6.1.1	Toplam dizel yakıt/enerji tüketimi biliniyorsa.....	68
6.1.2	Toplam dizel yakıt/enerji tüketimi bilinmiyorsa.....	69
6.2	Enerji Tüketimini Belirleme.....	71
6.2.1	Yöntem- 1.....	71
6.2.2	Yöntem- 2.....	72
6.2.3	Yöntem- 3.....	75
6.3	Enerji ve Emisyon Hesabı.....	77
6.3.1	Enerji tüketimini belirleme.....	77
6.3.1.1	Yöntem- 1 e göre.....	77
6.3.1.2	Yöntem- 2 ye göre.....	79
6.3.1.3	Yöntem- 3 e göre.....	79
6.3.2	Emisyonların hesaplanması.....	80
6.3.3	Eskişehir- Ankara yüksek hızlı demiryolu hattı için inceleme.....	84
6.3.3.1	Yöntem- 1 e göre.....	85
6.3.3.2	Yöntem- 3 e göre.....	86
7.	SONUÇLAR.....	105
	KAYNAKLAR.....	109
	EKLER.....	111
	ÖZGEÇMİŞ.....	117

KISALTMALAR

- ICE** : Intercity Express (Alman yüksek hızlı tren modeli)
GTO : Gate Turn-off Technology
SNCF : Fransız Devlet Demiryolları (Société Nationale des Chemins de Fer Français)
TGV : Train à Grande Vitesse (Fransız yüksek hızlı tren modeli)
UIC : International Union of Railways

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Benzin motorlarında kirleticilerin dağılımı	59
Çizelge 5.2 : Taşıtların kullanım modları ve kirletici emisyonuna etkileri	61
Çizelge 5.3 : Elektrikli motor emisyonu (g/kwh)	64
Çizelge 5.4 : Dizel motor emisyonu (g/kwh).....	64
Çizelge 6.1 : Hamburg- Münih arasında istasyon kotları	72
Çizelge 6.2 : İstasyonlar arasındaki özellikler ve enerji	73
Çizelge 6.3 : Farklı ülkelerde kullanılan bağlantılar	75
Çizelge 6.4 : Tren tipi ve katsayılar	76
Çizelge 6.5 : Hannover- Würzburg hattına ait bilgiler	77
Çizelge 6.6 : Almanya'ya ait $16\frac{2}{3}$ hz in elektrikli trenler için emisyonları	80
Çizelge 6.7 : Almanya'ya ait $16\frac{2}{3}$ hz elektriğin üretim aşamasındaki verimliği.....	81
Çizelge 6.8 : Almanya'ya ait özel emisyon faktörleri	83
Çizelge 6.9 : Emisyon miktarları	84
Çizelge 6.10 : Hatta işletilmesi planlanan trenler	84
Çizelge 6.11 : Farklı hızlar için yöntem- 3 e göre enerjiler	87
Çizelge 6.12 : Farklı hızlar için yöntem- 1 e göre enerjiler	87
Çizelge 6.13 : Farklı trenler için yöntem- 1' e göre enerjiler	87
Çizelge 6.14 : Tren tipine göre ton/koltuk değerleri.....	90
Çizelge 6.15 : Avrupa yük trenleri için boş ağırlığın dolu ağırlığa oranı	91
Çizelge 6.16 : Yolcu treni modellerine ait vagon ve yolcu sayıları.....	91
Çizelge 6.17 : Ülkemizdeki santral kompozisyonuna göre emisyonlar	94
Çizelge 6.18 : Ekspres -1 in yöntem- 1 ve farklı hızlara göre enerji tüketimi.....	95
Çizelge 6.19 : Farklı yolcu trenleri için emisyonlar	95
Çizelge 6.20 : Dizelli çekimde emisyon faktörleri	96
Çizelge 6.21 : Yük treni için yöntem-1 e ait enerji ve emisyonlar	96
Çizelge 6.22 : Çeşitli kirletici maddelerin co- eşdeğerleri	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Birincil enerji tüketiminde etkili faktörler.....	6
Şekil 2.2 : Değişik ulaştırma sistemlerine ait taşıtların seyir direnimleri ve güçleri...	7
Şekil 3.1 : Buharlı motorun çalışma prensibi	16
Şekil 3.2 : Dizel motorun şematik gösterimi	18
Şekil 3.3 : Bazı Avrupa ülkelerindeki çekim sistemleri	25
Şekil 3.4 : Değişik elektrikli çekim sistemlerinin temel kısım ve karakteristikleri...	26
Şekil 3.5 : Elektrik ve dizel motorların güç karşılaştırması.....	27
Şekil 3.6 : Dizel ve elektrikli çekim için bir km hattın enerji tüketimine bağlı olarak yıllık giderleri.....	28
Şekil 3.7 : Elektrikli çekimin fizibil olduğu trafik değeri.....	28
Şekil 4.1 : Hızın bir fonksiyonu olarak mekanik ve aerodinamik direnimler.....	37
Şekil 4.2 : Hıza bağlı hareket direnimi ve gerekli çekim gücü.....	37
Şekil 4.3 : Amerikan demiryollarına ait özgün direnimler.....	40
Şekil 4.4 : Alman demiryollarına ait özgün direnimler.....	41
Şekil 4.5 : Geniş ve dar ekartmanlı hatlara ait özgün direnimler.....	42
Şekil 4.6 : Tünele giren bir trende basınç ve emme dalgaları.....	46
Şekil 4.7 : Hız artışına bağlı olarak basınç değişimi ve oranı.....	47
Şekil 4.8 : Eğim direnimi.....	52
Şekil 5.1 : Benzinli motorlarda hava yakıt oranı ve kirleticilerin değişimi.....	61
Şekil 6.1 : Durak aralığı ve ortalama hıza göre enerji tüketimi.....	74
Şekil 6.2 : Süper-Ekspres yolcu treni için toplam enerji tüketimi.....	88
Şekil 6.3 : Ekspres-1 yolcu treni için toplam enerji tüketimi.....	88
Şekil 6.4 : Ekspres-2 yolcu treni için toplam enerji tüketimi.....	88
Şekil 6.5 : Hızlı yük treni için toplam enerji tüketimi.....	89
Şekil 6.6 : Yavaş yük treni için toplam enerji tüketimi.....	89
Şekil 6.7 : Süper-Ekspres yolcu treni için yolcu-km başına enerji tüketimi.....	92
Şekil 6.8 : Ekspres-1 yolcu treni için yolcu-km başına enerji tüketimi.....	92
Şekil 6.9 : Ekspres-2 yolcu treni için yolcu-km başına enerji tüketimi.....	93
Şekil 6.10 : Hızlı yük treni için ton-km başına enerji tüketimi.....	93
Şekil 6.11 : Yavaş yük treni için ton-km başına enerji tüketimi.....	94
Şekil 6.12 : Süper-Ekspres yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 1).....	97
Şekil 6.13 : Ekspres-1 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 1).....	97
Şekil 6.14 : Ekspres-2 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 1).....	98
Şekil 6.15 : Hızlı yük treni emisyon değerleri (yöntem- 1).....	98
Şekil 6.16 : Yavaş yük treni emisyon değerleri (yöntem- 1).....	99

Şekil 6.17 : Süper-ekspres yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 3).....	99
Şekil 6.18 : Ekspres-1 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 3).....	100
Şekil 6.19 : Ekspres-2 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 3).....	100
Şekil 6.20 : Hızlı yük treni emisyon değerleri (yöntem- 3).....	101
Şekil 6.21 : Yavaş yük treni emisyon değerleri (yöntem- 3).....	101
Şekil 6.22 : Yolcu trenleri için kirletici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 1)...	102
Şekil 6.23 : Yolcu trenleri için kirletici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 3)...	102
Şekil 6.24 : Yük trenleri için kirletici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 1).....	103
Şekil 6.25 : Yük trenleri için kirletici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 3).....	103
Şekil A.1 : Kısa mesafe yolcu trafiği.....	112
Şekil A.2 : Uzun mesafe yolcu trafiği.....	113
Şekil A.3 : Kısa mesafe yük trafiği.....	114
Şekil A.4 : Uzun mesafe yük trafiği.....	115

SEMBOL LİSTESİ

- α : Tren motorunun sağladığı ivme
 A : Hareketlilik sayısı
 B_{f1} : Enerji üretiminde spesifik emisyon faktörü (gr/kWh)
 C : Hava direnimi katsayısı
 C_1 : Akupile dingil sayısı
 CO : Karbon monoksit
 CO_2 : Karbon dioksit
 e : Harekete düşen birim emisyon faktörü
 e_d : Birim emisyon faktörü
 e_e : Elektriğin özel emisyon faktörü
 E : Toplam enerji
 E_1 : Yolcu taşımacılığında hava kirliliğine neden olan toplam emisyon
 E_2 : Yük taşımacılığında hava kirliliğine neden olan toplam emisyon
 E_{em} : Toplam emisyon
 E_T : Trenin harcadığı toplam elektrik enerjisi
 F : Harcanan toplam yakıt
 g : Yer çekimi ivmesi
 Δh : Güzergah başı ile sonu arasındaki kot farkı
 HC : Hidro karbon
 i : Eğim
 k_1 : Trenin ön ve arka şekline bağlı bir parametre
 k_1 : $p \times L$ yüzeyine bağlı bir parametre
 λ : İşletme aracına bağlı bir parametre
 L : Tren boyu
 L_{hat} : Hat uzunluğu
 L_0 : Tenderin ağırlığı ile kılavuz dingillere gelen lokomotif ağırlığı toplamı
 L_r : Lokomotifin aderans ağırlığı
 m : Dingil yükü
 M : Toplam tren ağırlığı
 M_L : Lokomotif ağırlığı
 M_{rot} : Hareketli kütle toplamı
 N : Dingil sayısı
 N_{ist} : Geçki üzerindeki ara istasyon sayısı
 N_p : Yükseltilecek pantograf sayısıdır
 NO_x : Azot oksit
 p : Aracın ray seviyesine kadar olan kısmi çevresi
 P : Tren ağırlığı
 P_{ps} : Trenin yükleme faktörü

Pb: Kurşun
PM: Partiküler madde
 Δp : Basınç değişimi
 $\frac{\Delta p}{\Delta t}$: Basınç değişim oranı
r: Özgün direnir
 r_c : Özgün kurba direnir
 r_p : Özgün eğim direnir
 r_m : Özgün demeraj direnir
 r_{top} : Toplam özgün direnir
R: Tren direnir
 R_L : Lokomotif direnci
 R_{L+T} : Lokomotif ve tren direnci
 R_p : Eğim direnir
S: Önkeseit alanı
 SO_x : Kükürt oksit
 SO_2 : Kükürt dioksit
 Σ_1 : Etkin tünel kesit alanı
 T_p : Trenin yükleme faktörü
 ΔV : Rüzgar hızı
V: Hız
 v_{maks} : Maksimum hız
 v_{ort} : Geçkideki ortalama hız
w: Rampa açısı
W: Trenin koltuk başına düşen (ton) ağırlığı
 W_{el} : Trenin (kJ/ton-km) cinsinden enerji tüketim değeri
x: İstasyonlar arası mesafe
Z: Lokomotifteki çekim kuvveti kaybı

DEMİRYOLLARINDA HAVA KİRLİLİĞİ DİRENİM İLİŞKİSİ

ÖZET

Bu çalışma kapsamında demiryolu ulaştırmasında enerji tüketimini etkileyen faktörler ve bu faktörlerin hava kirliliğine ne oranda sebep oldukları belirlenmeye çalışılmıştır. Son yıllarda kullanımı git gide artmakta olan demiryolu ve özellikle de yüksek hızlı demiryolunun diğer ulaştırma sistemleri arasındaki yeri, önemi ve enerji tüketimi ve oluşan emisyonlarda direnimin etkisi incelenmiştir.

İlk bölümde demiryolunda enerji tüketimini etkileyen faktörler ve diğer ulaştırma sistemleri arasında enerji tüketimi açısından demiryolunun yeri tespit edilmiştir. Demiryolu araçlarında kullanılan çekim türleri ve bu türlerin her birinin özellikleri, üstünlük ve eksiklikleri incelenmiştir. İlerleyen bölümlerde demiryolunda enerji tüketimini en çok etkileyen faktörlerin başında gelen demiryolu direnimlerine değinilmiş ve gerekli tanım ve bağlantılar verilmiştir. Demiryolunda enerji tüketimine bağlı hava kirliliği konusu incelenmiş, kirletici maddeler ve bu maddelerin özellikleri ana hatları ile açıklanmaya çalışılmıştır. Demiryolu ulaşımında hava kirliliğinin belirlenmesi için geliştirilmiş olan çeşitli emisyon hesap yöntemleri, her birinin olumlu ve olumsuz yönleri ile incelenmiş, örnek hesaplamalar yapılmıştır.

Son bölümde ise ülkemizde 2009 yılında hizmete girmiş olan Eskişehir- Ankara yüksek hız demiryolu hattında kullanılan yolcu ve kullanılması planlanıp sonradan vazgeçilmiş olan yük trenlerinin enerji tüketimleri ve buna paralel olarak emisyon miktarları araştırılmıştır. Bu kapsamda mevcut hat, istasyon ve araç bilgilerine bağlı kalınmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada farklı yöntemler kullanılmış, sonuçlar, çizelge ve diyagramlarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

RELATIONS BETWEEN RAILWAY RESISTANCE AND AIR POLLUTION IN RAILWAY TRANSPORTATION

SUMMARY

This study mainly focuses on the factors affecting energy consumption and their effects on air pollution. Railway transportation, especially high-speed railway has been a rising trend within the other uses of transport for the last decades. Within the scope of this study, the importance of railways compared to other transportation systems and the amount of energy it needs have been presented.

In the first chapter, the factors affecting energy consumption in railway transport and the place of railway transportation in other transportation systems in terms of energy consumption have been studied. The traction systems used in railway transportation and their advantages and disadvantages have been discussed. In the following chapters, railway resistance which is the most important factor affecting energy consumption has been studied, and various parameters and equations which are to be considered have been given. Air pollution caused by energy usage has been discussed and the types and specifications of air pollutant emissions produced by rail traffic have been presented. Calculation methods developed for estimating the energy consumption and emission factors have been carefully reviewed followed by examples.

The last chapter includes a study on an existing high-speed train line, between Eskişehir and Ankara which was opened to service in 2009. The energy consumption and emission factors have been calculated for all types of trains being used in the line by using the calculation methods mentioned in the previous chapters. The results have been presented with tables and diagrams.

1. GİRİŞ

Günümüzde yük ve yolcu taşımacılığında en çok kullanılan ulaştırma sistemleri; karayolu, demiryolu, havayolu, su ve denizyoludur. Bunların yanı sıra, son yıllarda, yük taşımacılığında boru hatları, yolcu taşımacılığında ise hava yastıklı ve manyetik yastıklı sistemlerle, sabit ve çoğunlukla yükseltilmiş bir yol üzerinde ya da yola asılarak hareket eden kabin sistemler kullanılmaya başlanmıştır [1].

Taşıtları tek boyutlu hareket edebilen ve “izli sistemler” olarak tanımlanan demiryolu, araçların ve rayların yuvarlanma yüzeylerinin sabit ve çok az genişlikte yapılabilmesi, sürtünmesi az ve dayanımı yüksek olan malzeme kullanımına olanak verdiğinden, az bir enerji ile fazla yük taşıyabilirler ya da yüksek hız yapabilirler. İki boyutlu hareket edebilen karayolu taşıtları ise, sabit ve çok özel bir yola gereksinim duymadıklarından, taşıdıkları yakıtı kullanarak istenilen yere ulaşabilirler. İki boyutlu ve az bir sürtünme ile hareket edebilen su ve denizyolu taşıtları büyük yük taşımacılığında, üç boyutlu hareket edebilen havayolu taşıtları ise hızlı yolcu ulaştırmasında diğer sistemlere göre üstünlük gösterirler [1].

Taşıtların hareketleri, hızlanma, sabit hızlı seyir, yavaşlama ve durma evrelerinden oluşmaktadır. İlk hareket ve hızlanma ile durma dışındaki ivmeli hareketler, yol ve işletme koşullarına bağlı olup, fazladan kinetik enerji harcamasını gerektirirler. Sabit hızlı seyir sırasındaki enerji gereksinimi de taşıt özelliklerine ve hava koşullarına bağlı olan seyir direnimleri ile yolun boyuna eğimine, eğrilğine, enine eğimine (dever) ve açık ya da kapalı havada oluşuna göre değişen yol direnimlerinin toplamına eşittir [2].

Dizel çekim II. Dünya Savaşı’ndan kısa bir zaman önce kullanılmaya başlanmış, fakat sistematik olarak geliştirilmesi savaşın sonunu bulmuştur. Dizel lokomotifler

içten yanmalı dizel motorlarla çalışır. Buharlı çekime göre daha fazla etkinliği, daha düşük işletme maliyeti (neredeyse %50), daha iyi performansı (güç, hız) vardır ve daha temiz işletme ve daha iyi yolcu konforu sağlamaktadır. Bununla birlikte kullanımı makinist için daha kolay ve daha az yorucudur [3].

Demiryollarında elektrikli çekimin ilk ortaya çıkışı 1879 yılına dayanmaktadır. 1890-1914 yılları arasında elektrikli tramvayların geliştirilmesi ile elektrik gücünün kullanımına ilk olarak şehiriçi hatlarda başlanmıştır [3].

1900 yılında elektrikli çekim, ilk defa Paris ve Londra metro hatlarında ve İsviçre'nin dağlık hatlarında kullanılmaya başlanmasıyla geleneksel hatlarla tanışmıştır. 1920 yılından beri özellikle 1950 den sonra elektrikli çekim yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Elektrikli çekimin işletme maliyeti dizele göre %35 daha düşüktür fakat elektrik üretim tesisleri gerektirdiği için ilk maliyeti daha yüksektir. Bundan dolayı elektrikli çekim yoğun hatlarda tercih edilmektedir [3].

Ulaştırma sistemlerinin kullandıkları çekim türleri ve enerji kaynakları, enerji tüketimi esnasında açığa çıkan zehirli gaz ve emisyonlar çevreye zarar vermektedir. Petrol ürünü yakıtlarla çalışan ulaştırma sistemlerinin kullanılması, o sistemlerin taşımacılıktaki payları ile orantılı olarak ulaştırmanın çevre kirliliğine olan etkilerini artıracaktır. Enerji kaynağını taşıt içinde yakan bu ulaştırma sistemlerinin çıkaracakları kirletici miktarı ise, birim taşıma işi başına tüketecekleri enerji ve yakıt ile birim yakıttan çıkacak kirletici miktarına bağlı olarak değişecektir [1].

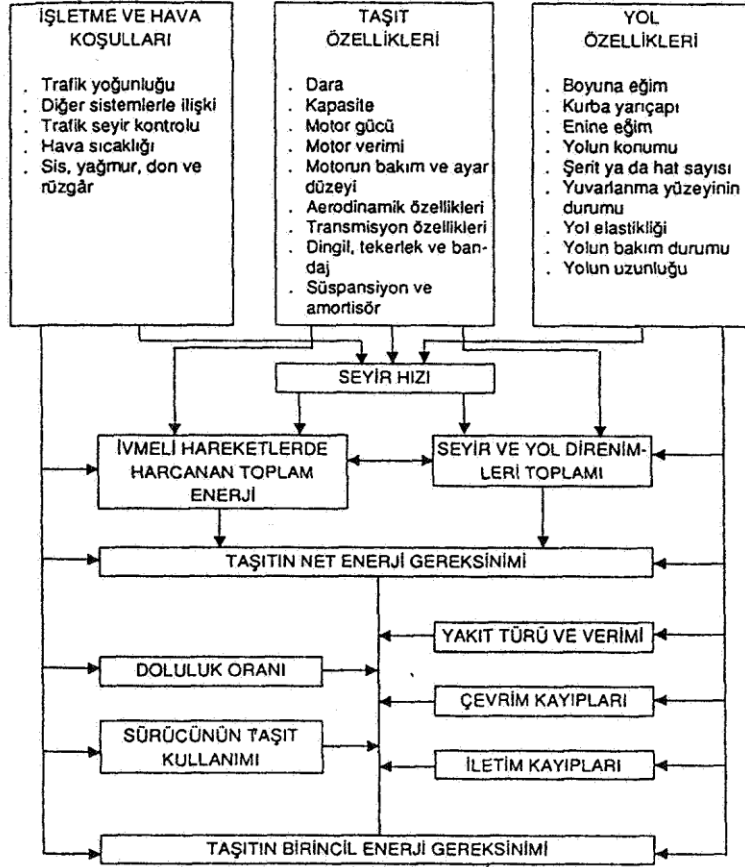
Enerji tüketimini etkileyen en önemli faktör taşıtın hareket sırasında karşılaştığı direnimlerdir. Taşıt hareketine birçok kesimde farklı direnimler etki eder, çalışmada bunlar ayrıntılı bir şekilde incelenmektedir. Elektrik emisyonunu ölçerken, kullanılan elektriğin özel emisyon faktörünün elektrik santralinde üretilen enerjiye mi, demiryolu hattına gelen enerjiye mi ait olduğu bilinmelidir.

Ayrıca hesaplamalarda kullanılacak emisyon değerlerinin birincil enerjiye mi yoksa ikincil enerjiye mi ait değerler olduğu kesinlikle göz önünde bulundurulmalıdır. Hava kirliliğine neden olan kirletici emisyonlar ise direnimin yanısıra taşıtın elektrikli veya dizelli oluşuna göre de farklılık gösterir. Çalışmada iki tür için ve çok farklı parametreler bazında oluşan enerji tüketimi ve emisyonlar incelenmektedir.

2. ULAŖTIRMA SİSTEMLERİNDE ENERJİ TÜKETİMİ VE ETKİLİ FAKTÖRLER

UlaŖtırma sistemlerinde enerji tüketimini etkileyen önemli faktörler işletme ve hava koşulları, taşıt özellikleri ve yol özellikleri olmak üzere başlıca üç grupta incelenir. Bu ana gruplarda yer alan faktörler ve bunların birbirleriyle etkileşimi Ŗekil 2.1 de verilmektedir [4].

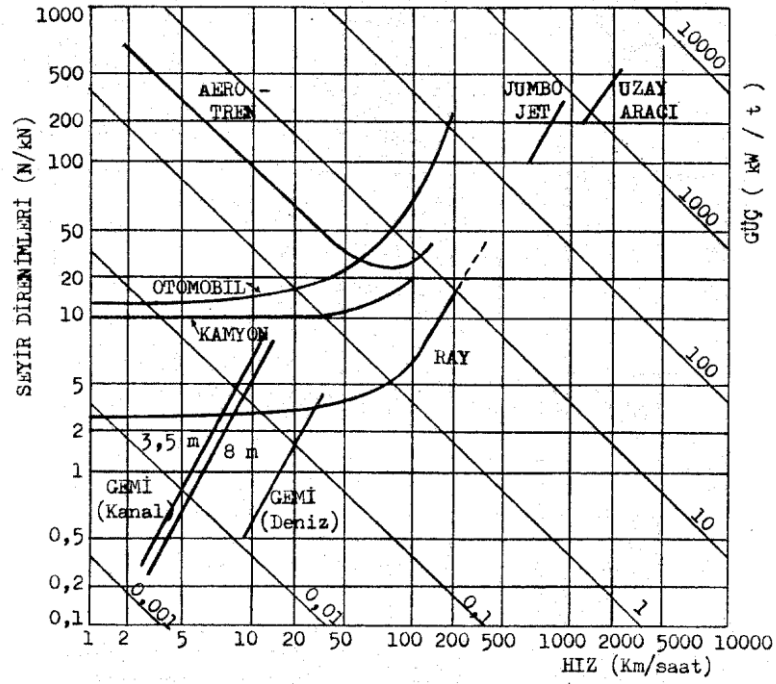
Bir taşıtta birim taşıma işi (yolcu-km, ton-km) başına harcanacak enerji taşıtın net enerji ihtiyacı ile sürücünün kullanım Ŗekline, taşıtın doluluk oranına, taşıt özelliklerine, işletme ve hava koşullarına bağlıdır. Birincil enerji ihtiyacı ise, kullanılan yakıt türü ve verimi ile çevrim ve iletim kayıplarına bağlı olarak değişmektedir. Net enerji gereksinimi, taşıtın, hareketine karŖı koyan seyir ve yol direnimini yenmek için harcaması gereken enerji ile ivmeli hareketlerde harcayacağı ve kaybedeceği kinetik enerjilerin toplamı kadardır. Çekim türlerinin kullandıkları enerji kaynakları, ya hiçbir işlem görmeksizin, direkt olarak taşıtta kullanılan, kömür, doğal gaz gibi birincil kaynaklar ya da birincil kaynakların rafineri, termik ve hidroelektrik santraller ve atom reaktörü gibi çevrim tesislerinde işlenmeleri ve kullanılmaları sonucunda elde edilen, benzin, motorin, likit gaz, elektrik vb. ikincil kaynaklardır [1].



Şekil 2.1 : Birincil enerji tüketiminde etkili faktörler [4]

Sistemlerin kullandıkları belli başlı çekim türleri, içten yanmalı motorlarla sağlanan benzinli ve dizelli çekim, sabit bir elektrik iletim hattını gerektiren elektrikli çekim ve günümüzde kullanımı azalmış olan buharlı çekimdir. Diğerleri ise, daha seyrek kullanılan ya da deneme aşamasındaki likit gaz, doğal gaz ve alkol kullanan çekim türleridir [2].

Şekil 2.2, bazı ulaştırma sistemlerine ait taşıtların, hızlarına bağlı olarak seyir direnimleri ve bu direnimleri yenmek için gerekli güçlerin değişimini göstermektedir.



Şekil 2.2 : Değişik ulaştırma sistemlerine ait taşıtların seyir direnimleri ve güçleri [1]

2.1 Demiryolunda Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler

Demiryolu sistemlerinde kullanılan enerji; aracı hareket ettirmek, yolcu konforu (ısıtma, havalandırma, ışıklandırma vb.) sağlamak, trenin işletim süreleri dışında, hareket etmeden önce ya da duraklarda dururken çalışır vaziyette durmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Enerji gereksinimi, bunun gibi taşıt özelliklerinin gerektirdiği durumların yanı sıra, hava koşullarından, doluluk oranı ve seyir direnimlerinden de etkilenmektedir [5].

Demiryolu aracının hareketini sağlamak için gereken enerji, çekim türüne göre değişmekte olup, motorların, fren sistemleri ve dış aydınlatmanın çalışmasını ve otomatik kapıların açılıp kapanmasını sağlayan diğer yardımcı elemanların çalışması için gerekli olan enerjilerin toplamıdır. Bu elemanların çalışması esnasında hem enerjinin araca iletiminde, hem de yardımcı elemanların çalışması esnasında sürtünmeden dolayı oluşan enerji kayıpları göz önünde bulundurulmalıdır. Buharlı ve dizel çekimde güç, çekici aracın kendi üzerindeki bir enerji kaynağından elde

edildiğinden tekerlek çevresi ile enerji kaynağı arasındaki toplam verim, çekici aracın kendi iç kayıplarına bağlıdır. Elektrikli çekimde ise enerji kaynağından araca dek oluşan kayıp (trafodan lokomotif elektrikliğin iletimi sırasında) ve araçta oluşan kayıpların toplamı verimi etkilemektedir [5].

İşletim sırasında yolcu ve tren görevlilerinin konforunu sağlamak için trenin ısıtılması, havalandırılması ve ışıklandırılması, araç yalpalı tren ise kurbalarda gerekli elemanların çalıştırılması, araçta kafeterya ya da restoran mevcut ise bu vagonların enerji ihtiyacını karşılamak vb. durumlar için de enerji tüketilmektedir. Demiryolu aracında restoranlı vagonun bulunması durumunda vagonun hem nakliye ve araca birleştirilmesi, hem de işletilmesi göz önünde bulundurulduğunda toplam enerji tüketiminin %5 -10 arasında arttığı ortaya çıkmıştır [5].

Demiryolu aracının işletim süreleri dışında, hareket etmeden önce ya da duraklarda dururken çalışır vaziyette durmasını sağlamak için gereken enerji toplam enerji tüketiminin % 2 sini oluşturmaktadır [5].

Hava koşulları da demiryolu araçlarında enerji tüketimini etkileyen faktörler arasındadır. Hava sıcaklığı düştükçe treni ısıtma ihtiyacı artmaktadır, bu da yolculuk konforu için gereksinim duyulan enerji tüketiminde bir artış gerektirmektedir. Hava sıcaklığının düşmesi trenin işletimi esnasında ihtiyaç duyduğu enerji miktarını da artırmaktadır. Trenlerin kapılarının istasyonlarda açılması sırasında, soğuk havalarda, trenin içinde daha fazla ısı kaybı görülmektedir. Bu da trenin daha fazla ısıtılmasını gerektirmektedir. Ayrıca hava yoğunluğu soğuk havalarda artmaktadır. Bu durum hava direnimini de aynı oranda artırmaktadır. Yapılan araştırmalara göre aynı hava basıncında, -7°C de havanın yoğunluğu 20°C ye göre %10 daha fazla olmaktadır. Bu da hava direniminde yaklaşık olarak %10luk bir artışa karşılık gelmektedir. Bu durum, hava direnimlerine bağlı olarak enerji tüketimleri %50 artan, yüksek hızlı trenler için oldukça fazla önem arz etmektedir [5].

Buna karşılık ilkbahar ve yaz aylarında sıcaklığın artması ile birlikte yolcu konforu için gereksinim duyulan enerji tüketimi minimum seviyeye inmektedir. Havaaların sıcak olması durumunda tren içi sıcaklığı düşürmek için klimalar çalıştırılmaktadır, fakat bu durumda gereken enerji, treni ısıtmak için gereken enerjiden daha az olmaktadır [5].

Doluluk oranı, aracın işletimi esnasında, dolu koltuk sayısının tüm koltuk sayısına oranı olup enerji tüketimini etkileyen değişkenler arasında sayılmaktadır. Doluluk oranının büyümesi ile birim enerji tüketiminde belirgin bir azalma meydana gelmektedir.

Doluluk oranı tren cinsine ve kapasitesine göre değişmekle birlikte, hattın ne kadar tercih edildiğine, günün saatine, yılın hangi günü olduğuna göre de farklılık göstermektedir. Nüfusun daha fazla olduğu bölgelerden geçen hatlarda doluluk oranı daha yüksek olmaktadır. Büyük şehirlerde yolcu sirkülasyonun en yoğun olarak yaşandığı saatler iş ve okul gidiş çıkış saatleri (genel olarak 07-09 ile 16-18 arası) dir. Bu pik saatlerde yolcu sayısı normal saatlerdekinin 5-6 katına çıkabilmektedir. Bu çeşit yoğunluğun yaşandığı trenler daha çok şehir içi ve bölgesel yolcu taşımacılığının yapıldığı trenlerdir. Bu çeşit bölgesel yolcu taşımacılığı ayrıca havaalanı çalışanlarını ve yolcuları taşıyan havaalanı trenleri ile de yapılmaktadır. Uçuşlar gün içinde sürekli yapıldığından dolayı, havaalanı trenleri için pik saatler belirlemek zordur [5].

Pik saatlerde daha yüksek yolcu kapasiteli trenlerin kullanılması gerekmektedir. Aynı trenlerin pik saatlerin dışında kullanıldığı zamanlarda trenler nispeten boş kalmaktadır. Ortalama doluluk oranı %20- 40 arasında değişmektedir [5].

Uzun mesafelerde kullanılan trenlerde durum daha farklı olmaktadır. Seyahat süreleri çok daha uzundur ve doluluk oranları günden güne ve saatten saate çok değişiklik göstermez. Ayrıca pik saatler dışında trenlerdeki doluluk oranını daha da artırmak için bu saatlerdeki seferlerin bilet ücretlerinde indirimler yapılmaktadır. Modern yüksek hızlı trenlerde doluluk oranları %50- 75 civarındadır ki bu oranlar,

havayollarıyla rekabet edebilecek mertebelerdedir. Daha düşük hızlı, geleneksel uzun mesafe trenlerinde doluluk oranları biraz daha düşük olmaktadır [5].

Demiryolu sistemlerinde enerji tüketimi, km başına tüketilmesi gereken enerji miktarı cinsinden tanımlanır. Bu birimler ton-km, tren-km, koltuk-km, yolcu-km şeklinde olabilir.

Demiryolu araçları için enerji tüketimini etkileyen en önemli faktörlerin başında seyir direnimleri gelir. Bu direnimlerin başlıcası doğru ve düzlük direnimidir (lokomotifin daimi direnimi olarak da adlandırılır). Doğru ve düzlük direnimi dahilinde hava direnimleri de katılmaktadır. Katarların seyir hızlarının artmasıyla enerji tüketimi de artmaktadır. Bu artışın bir kısmı, katarı daha yüksek hızlara ivme kazandırmak için gerekli kinetik enerjiden, daha büyük kısmı ise hızın karesi ile orantılı olarak artan hava direniminden meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak enerji tüketimi de hızın karesi ile orantılı olarak artmaktadır [2].

Hava direnimi, özellikle yüksek hızlı trenler için enerji tüketimini en çok etkileyen etmenlerden biri olmaktadır. Hava direnimi tren hızına, tren boyut ve şekline bağlı olarak değişmektedir. Hava direnimini mümkün olduğunca azaltmak için modern yüksek hızlı trenlerde üst, yan ve tren ekipmanların çoğunun yerleştirildiği alt yüzeyler daha pürüzsüz yapılmaktadır. Ayrıca ön ve arka burunları da daha uzun ve aerodinamik biçimli tasarlanmaktadır. Bu sayede toplam enerji tüketiminde %22 lik bir kazanç sağlanabilmektedir [5].

Enerji tüketimini etkileyen diğer faktörler arasında eğim, kurba, tünel direnimleri ve istasyon sayısı da sayılmaktadır. Hattın eğimi arttıkça oluşacak direnim de artar. Bu artış çıkış yönünde harekete karşı, iniş yönünde ise harekete yardımcı bir kuvvet oluşturur. Kurbalarda ortaya çıkan direnimler kurba yarıçapıyla ters orantılı olarak değişir. Yani kurba yarıçapı küçüldükçe direnim ve enerji tüketimi artar. Tünellerde ise taşıtlar bir hava kolonu içerisinde hareket ettiklerinden hava direnimi açık havadakinden daha fazladır ve bu sırada tüketilen enerji direnimle orantılı olarak artar. Tüketilen enerji, tünelin ve taşıtın uzunluğuna, taşıtın aerodinamik yapısına,

tünel ve taşıt kesitleri arasındaki orana ve tünel duvarlarının pürüzlülüğü gibi faktörlere bağlıdır. İstasyon sayısının artması da demeraj direnimini artıracığından enerji tüketimi artacaktır [2].

İşletim esnasında tren bünyesindeki tüm sistemler çalışırken enerji kayıpları olmaktadır. Modern trenlerde bu enerji kayıpları ve yardımcı elemanların (fren, havalandırma, ısıtma, aydınlatma vb. sistemleri) kullandığı enerji, alınan toplam enerjinin %20-25 ini oluşturmaktadır. Verimli işletimlerde bu oranlar daha da düşük olabilmektedir, fakat özellikle trenin işletim süreleri dışında, hareket etmeden önce ya da duraklarda beklerken bu oran daha da yüksek olmaktadır [5].

Trenin ivmelenme esnasında hızı artar. Bu durumda kullanılan enerji kinetik enerjiye dönüşür. Yüksek hız istenen, doluluk oranı yüksek olan trenlerde, tren ağırlığının artmasıyla birlikte ivmelenme için daha fazla enerji gerekir. Yani yolcu sayısı fazla olan yüksek hızlı trenler daha fazla enerji tüketir. Bu durum durak sayısı fazla olan hatlarda önemlidir, zira durak sayısı ne kadar fazla ise ivmelenme de o kadar fazla olacaktır [5] .

Tren ağırlığının artmasının enerji tüketimine etkisi hızla orana daha düşüktür. Belirli bir dingil yükü için katar ağırlığının artması ilk başta çekilen yük birimi başına enerji tüketimini azaltmaktadır. Ancak katarı yeni vagonların eklenmesiyle direnimler de arttığından, belirli bir değerden sonra katar ağırlığının artırılması enerji tüketiminde önemli bir değişiklik sağlamaz. Aracın kendi ağırlığı ise direnimi artıracığından, çekilen birim faydalı yük başına daha fazla enerji tüketilmesine neden olmaktadır [2].

Doluluk oranının enerji tüketimine etkisi İsveç Demiryolları tarafından yapılan bir araştırma ile açıklanmaya çalışılmıştır. İsveç demiryollarında kullanılan üç vagonlu Regina tipi trenlerin yüksek hızla giderken tüm koltuklar dolu iken (272 yolcu, toplam 22 ton ağırlık) tükettiği enerji, tüm koltuklar boş iken tükettiği enerjiden sadece %5 daha fazladır. Aynı çalışma X-2000 tipi yüksek hızlı tren için de yapılmıştır. Yüksek hızda, tüm koltuklar dolu iken (320 yolcu, toplam 26 ton ağırlık)

tükettiği enerji, tüm koltuklar boş iken tükettiği enerjiden %3 daha fazla çıkmıştır [5].

Bu çalışmaya göre doluluk oranının demiryolunda enerji tüketimine büyük etkileri yoktur. Doluluk oranının %20 ile %60 arasında olduğu bir hatta doluluk oranına bağlı enerji tüketimi toplam enerji tüketiminin yalnızca %1-2 sini oluşturmaktadır. Enerji tüketimi ile seyir direnimi arasındaki ilişki doluluk oranına göre enerji tüketiminde çok daha fazla önemlidir [5].

Frenler ise frenleme sırasında oluşan sürtünme nedeniyle fazladan enerji kaybına neden olurlar. Elektrikli frenlerde sürtünme sırasında ısıya dönüşerek kaybolan enerjinin bir bölümü yeniden kullanıldığı için önemli enerji tasarrufu sağlanır [5] .

2.2 Ulaştırma Sistemlerinde Enerji Tüketimi Açısından Demiryolunun Yeri

Birim işe düşen enerji belirlenirken trafiğin türü, doluluk oranı ve uzak mesafe veya yakın mesafe olması gibi kriterler incelenir. Birim yolcu ve yük trafiği için taşıtların doluluk oranlarına bağlı olarak yakın mesafe ve uzak mesafede gerekli spesifik (özgün) birincil enerji gereksinimlerinin gösterildiği diyagramlar ekte verilmiştir [4].

Ekteki diyagramlara göre en azdan en fazlaya doğru birim km ye düşen enerji tüketimi sıralamaları şöyledir:

- Yakın mesafe yolcu trafiği: otobüs - demiryolu - hafif metro - kombi - otomobil
- Uzak mesafe yolcu trafiği: otobüs - demiryolu - kombi - otomobil - jet uçağı
- Yakın mesafe yük trafiği: demiryolu - TIR - kamyon - kamyonet - pikap - kombine taşıtlar
- Uzak mesafe yük trafiği: kombine taşımacılığa ait araçlar (iç su yolu + karayolu + demiryolu)

yukarıdaki sıralamaya uygun olarak karayolu taşıtları - kombine taşıtlar.

Şekillerden anlaşılacağı gibi yolculuk boyunca kat edilen mesafe de enerji tüketimini etkilemektedir. Mesafenin kısa olması durumunda, araçların daha az yakıt kullanması ve daha az ivmelenme hareketinin görülecek olmasından dolayı enerji tüketimi de daha az olacaktır.

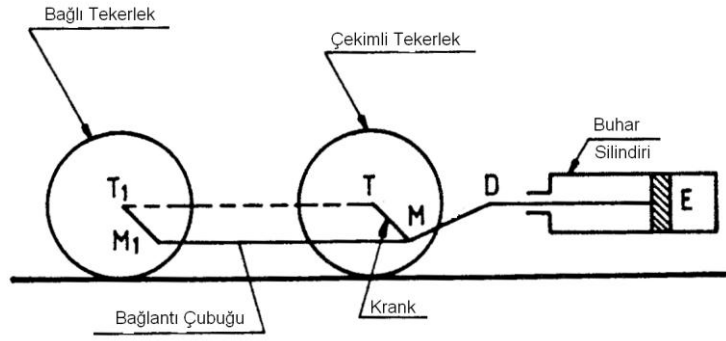
Yuvarlanma direnci ve yol yüzey özellikleri de enerji tüketimini etkileyen faktörlerden biridir. Yuvarlanma direnci, hareket halindeki bir taşıtın bütün tekerleklerine yol yüzeyinden karşı bir direnç etki etmesi ile ortaya çıkar. Yuvarlanma direncine etki eden faktörler arasında; yol yüzey özellikleri, (kullanılan yol yapım malzemesinin cinsi, kalitesi, yolun taşıma kapasitesi, viskoelastik davranışı) lastik malzemesi ve lastiğin hava basıncı, taşıtın hızı, taşıtın teknik özellikleri ve lastik titreşimleri sayılabilir [6]. Yol yüzey özellikleri ne kadar elverişsizse, aracın yuvarlanma direnci ve buna paralel olarak da enerji tüketimi artacaktır. İsveç de yapılan bir araştırmaya göre yol durumunun pürüzlülük özelliklerine bağlı olarak yakıt tüketiminin %11 artabileceği gözlenmiştir [7]. Yakıt tüketiminin artması enerji tüketimini doğrudan artırmaktadır. Demiryolunda yuvarlanma direnci tekerleğin ray üzerinde dönmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Fakat ray ile tekerlek arasındaki (çelik-çelik arası) sürtünmenin karayoluna göre oldukça az olmasından dolayı birim enerji tüketimi karayoluna göre oldukça azdır.

3. DEMİRYOLUNDA ÇEKİM TÜRLERİ

Çekici aracın güç üretimi buhar, dizel veya elektrik motorlarına dayanır. Demiryollarında kullanılan ilk enerji kaynağı buhardır. İlk buharlı araç 1804 yılında üretilmiş ve 1830 lu yıllarda demiryollarında kullanılmaya başlanmıştır. 120 yıldan fazla bir süre, buhar motorları demiryollarının başlıca güç kaynağı olmuştur [3].

3.1 Buharlı Çekim

Buharlı çekimin çalışma prensibi şekil 3.1 de açıklanmaya çalışılmıştır. T tekerleği TM krankı ile MD koluna bağlanır. MD kolu buhar silindirin DE piston koluna bağlıdır ve buhar gücü etkisi ile hareket eden DE pistonunun hareketini tekerleğin dönme hareketine dönüştürür. Kollara bağlı motor dingillerinin tekerlekleri “ana motris tekerlekler” olarak adlandırılır. Tek bir çekimli dingil gerekli çekim gücünü sağlayamaz bundan dolayı başka çekimli dingillere de ihtiyaç duyulur. Fakat diğer dingiller kola doğrudan bağlanamaz, ana çekimli tekerleklere bağlantı çubukları yardımı ile bağlanırlar. Bu bağlantı çubukları da TM , T_1M_1 vb. tekerlek kranklarına bağlıdır. Bu dingillere, bağlı dingiller adı verilir. Toplam bağlı dingil sayısı genelde beş ya da altıdan fazla değildir, ancak asla ikiden az olamaz [3].



Şekil 3.1 : Buharlı motorun çalışma prensibi [3]

Buharlı lokomotifler yakıt olarak kömür veya petrol kullanır. Kömür veya petrolle elde edilen ısı enerjisi, buhar basınç dinamik enerjisi olarak depolanır ve gerektiği zaman kinetik enerjiye dönüştürülür [3].

Buharlı lokomotifin ana kısımları:

- Araç, yuvarlanma ekipmanları, çerçeve, bağlantı ekipmanları, tamponlar, süspansiyon vb. , ayrıca içinde lokomotifin hareketini ve kontrolünü sağlayan tüm ekipman ve aletleri bulunduran sürücü kabini.
- Buhar üretim ekipmanı; kazan ve bağlantı tertibatı
- Motor; buhar silindiri, pistonlar, kayma valfleri, dağıtım aletleri
- Çeşitli yardımcı sistemler, mesela fren için hava kompresörleri, merkezi ısıtma, tekerlek ile ray arasındaki adhezyonu artırmak için kum kutuları, yağlama ve frenleme aletleri, güvenlik sistemleri vb.

Dezavantajları ve buharlı lokomotiflerin terk edilmesi: Günümüzde buharlı çekim Afrika ve Asya'da bazı ticari demiryolu hatlarında kullanılmaktadır. Ancak Avrupa ve Kuzey Amerika'da müzelerde sergilenmekte ya da turistik amaçlı kullanılmaktadır. Buharlı lokomotiflerin artık kullanılmamasının sebepleri arasında;

- Düşük yakıt etkinliği: Yakılan kömürün sağladığı enerjinin sadece %6 sı çekimde kullanılmaktadır.
- Zayıf teknik performansı: Buharlı lokomotifler 3000 beygir gücünü aşamaz ve maksimum işletme hızı 120- 140 km/sa' tır.
- Çok büyük miktarlarda su depolama ihtiyacı
- Yüksek bakım maliyeti
- Yakıt ikmali için gereken uzun süre. Bu sebepten dolayı buharlı bir lokomotif bir günde sadece 12- 14 saat çalışabilir.
- Yangın tehlikesi
- Çevreye zararı (atmosfer kirliliği, gürültü)

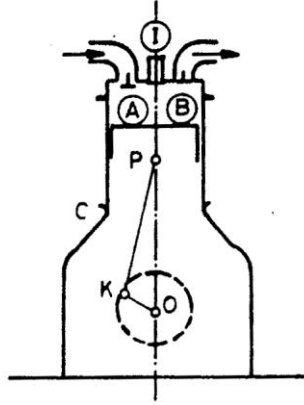
Gaz türbini lokomotifleri 1960 ve 1970'li yılların başında geliştirilmiştir. Bu lokomotifin ana elemanı aşırı ısınan ve sıkıştırılan gaz halindeki yanıcı ürünlerin genleşmesi ile çalışan gaz türbini motorudur. 1973 deki enerji krizinden sonra, yüksek enerji tüketiminden dolayı maliyeti yüksek olan gaz türbini kullanımı günden güne azaldı. Bugün de çok az hatta kullanılmaktadır [3].

3.2 Dizel Çekim

Dizel motorun çalışma prensibi; dizel motorun (şekil 3.2) ana elemanı, içinde hareket eden P pistonu olan C silindiridir. PK kolu ve OK krankı tarafından dönme hareketi ana şafta; OP ye iletilir. Silindir kapağında A,B ve I valfleri aşağıdaki işlemleri yerine getirir:

- Emme
- Sıkıştırma ve gaz halindeki yakıtın enjeksiyonu

- Gaz halindeki yanıcı ürünlerin yanması ve genleşmesi
- Egzoz



Şekil 3.2 : Dizel motorun şematik gösterimi [3]

Diğer üç valfin yanında dördüncü valf, motorun hareketi için basınçlı havayı içeri alır. Dört valf de yaylıdır, kollar ve eksantrik mili yardımıyla periyodik olarak açılır ve kapanır [3].

Bu çalışma sistemi tek zamanlı motorun çalışma sistemidir. Bu sistemde emme, enjeksiyon ve egzoz silindir kutusunda gerçekleşir.

Dizel motorlar aşağıdaki gibi dört aşamada çalışırlar:

- Emme hareketi: Bu sürede A valfi açık ve B valfi kapalı iken piston yukarıdan aşağıya doğru hareket etmeye başlar ve C silindiri taze hava ile dolar.
- Sıkıştırma hareketi: A, B valfleri kapalı iken piston aşağıdan yukarı doğru hareket eder. Bu durumda pistondaki hava basıncı 1 atm den 30-40 atm ye çıkar ve sıcaklığın 400-500°C ye çıkmasına neden olur. Piston yukarı çıkmadan kısa bir süre önce pistonu basınçlı yakıt enjekte edilir. Piston yukarı çıktığı zaman yakıt ateş alır ve sıcaklık 1800-3000°C ye çıkarken, C silindirindeki basınç 50-80 atm ye ulaşır.

- Genleşme aşaması: Valfler kapalı iken genleşen gaz pistonu, bu sefer aşağıya doğru hareket eder, uygun bir anda B valfi açılır.

- Egzoz aşaması: B valfinin açılması ile piston aşağıdan yukarıya doğru hareket etmeye başlar. Bu aşamanın ilk sürelerinde yanan gazın büyük bir kısmı pistondan dışarı atılır. Geri kalan gaz A valfi açık iken piston yukarı çıkarken piston tarafından itilir.

Bütün bu aşamalar tamamlanınca piston ilk konumuna geri döner ve bu işlem tekrar baştan başlayarak devam eder. Buna karşın, bu döngüyü iki zamanlı motorla iki aşamada yapmak da mümkündür. Silindir sayısına bağlı olarak dizel motorlar, sıralı olarak 4, 5 veya 8 silindirli veya V düzeyinde 8-12 silindirli olabilir [3].

Motor hızı yavaştan (750 devir/dak), hızlıya (1200-1500 devir/dak) kadar değişir. Yavaş motorlar daha ağırdırlar. Yüksek sıcaklıklara dayanmaları açısından, silindirler, aralarında su devrinin sağlanması için iki tabakalı yapılırlar [3].

3.2.1 İletim sistemleri

Dizel lokomotiflerde motordan tekerleklere gücün iletimi aşağıdaki yöntemlerle sağlanır:

- Hidrodinamik iletim ve hidrodinamik hız değiştirme ile (Voith tipi)
- Hidrodinamik iletim ve mekanik hız değiştirme ile (Mekydro tipi)
- Elektrikli iletimle; dizel motor elektrik jeneratörünü çalıştırır, jeneratör de çekimli tekerleklere mekanik olarak bağlı olan bir seri elektrik motoru çalıştırır. Elektrikli iletimde dişli kutu yoktur, çalışma prensibi elektrikli lokomotiflerde olduğu gibidir. Bu sistem dizel-elektrik adıyla bilinir. Dizel motor direkt olarak tekerleklere bağlı olmadığından dolayı iletim sistemi, dizel-elektrik sistemlerde daha basittir, daha az bağlantı elemanı ve daha az bakım gerektirir. Dizel-elektrik lokomotifler, temel olarak dingilleri hareket

ettiren doğru akım jeneratörleridir. Eğer yüksek çekim gücü gerekiyorsa, aynı trene birkaç tane dizel lokomotif bağlanır [3].

Dizel-elektrik lokomotifler son yıllarda Hybrid (melez) lokomotif olarak üretilmeye başlanmıştır. Bu sistemde lokomotif, gücünü yeniden şarj edilebilir bataryalardan alır [8]. Bataryalar boşaldıkça dizel motor bataryaları doldurur. Bu tip lokomotiflerde dizel motora sürekli olarak ihtiyaç duyulmadığından dolayı yakıt tüketimi daha az gerçekleşir. Ayrıca yapılan araştırmalarda, melez lokomotiflerin ürettiği emisyon miktarının, dizel çekimle çalışan lokomotiflerin ürettiğinin yarısı kadar olduğu tespit edilmiştir [9].

- Diğer yöntemlerle, örneğin hidrostatik iletim veya mekanik iletim ile.

3.2.2 Dizel lokomotifin görevleri

Bir dizel lokomotifin aşağıdaki talepleri karşılaması beklenir [3]:

- Tam yüklü veya tam yüklü duruma yakın trenin alıymanda, yukarı veya aşağı yönlerde orta ve yüksek hızlarda yüksek iletim etkinliği ile orta veya ağır yükleri çekebilme kapasitesi
- Yükleme yeterliliği (düşük hızlarda veya tam yükte rampa yukarı)
- Yüksek hızlarda kaymadan fren yapabilme, rampa aşağı giderken, hızı mekanik frenleme kullanmadan gereken limitlerde tutabilme
- Motorun uygun işletme aralığında çalışması
- Yüksek güvenilirlik ve düşük bakım maliyeti

3.2.3 Dizel çekimin avantajları ve dezavantajları

Avantajları;

- Daha düşük hat döşeme maliyeti.
- Otonomi

Elektrikli çekime göre dezavantajları;

- Daha düşük mekanik performans (güç, kuvvet, hız)
- Daha yüksek enerji tüketimi
- Daha fazla hava ve gürültü kirliliği
- Daha yüksek bakım maliyetleri

3.3 Elektrikli Çekim

Dizel çekimde gerekli enerji lokomotif içinde elde edilirken, elektrikli çekimde, enerji dışarıda bulunan bir güç kaynağından, trafodan lokomotifte iletilir.

Bir güç kaynağı alt sisteminde aşağıdaki elemanlar bulunmaktadır:

- Gerilim seviyesinin düşürüldüğü ve bazı sistemlerde AC gerilim frekansının DC ye dönüştürüldüğü trafo merkezleri,
- Enerjiyi trafo merkezlerinden lokomotifte ileten katener veya 3. ray sistemleri.

Trafo merkezlerine elektrik gücü aşağıdaki şekillerde sağlanabilir:

- Ulusal enterkonnekte güç şebekesinden; Avrupa'da 50 Hz ve Amerika'da 60 Hz' de

- Ayrı bir yüksek gerilim şebekesinden, ulusal enterkonnekte frekanstan daha düşük frekansta (genelde $16\frac{2}{3}$ Hz). Bu ayrı şebeke kamu şebekesine bağlanabilir ya da bağımsız olabilir, yani kendi güç üretim santraline sahip olabilir.

Bundan dolayı, bir elektrikli demiryolu hattı planlanırken (mevcut veya inşa halinde) yakınlarda enerji sağlanabilecek bir kamusal santralin varlığı ve oradan sağlanabilecek enerji miktarı tespit edilmelidir [3].

Trafolarla, enerji santralinden sağlanan enerjinin özellikleri değiştirilebilir (gerilimin düşürülmesi, doğru akımın alternatif akıma çevrilmesi) ve değiştirilen enerji iletim hatları ile araca ulaştırılabilir. AC sistemlerde trafolar arası mesafe 10-70 km arasında değişmektedir. Mesafeler, elektrikli çekim sistemine ve hattın trafik yüküne bağlıdır [3].

Bir kural olarak, trafodan araçlara iletim hattı tek fazlı olarak yapılmaktadır.

Elektrikli çekim motoru enerjisi şu yollarla elde edebilir:

- Katener sistemi: Demiryollarında ve bazı metro hatlarında kullanılır.
- İletken ray (üçüncü/dördüncü ray sistemi): Metrolarda ve bazı banliyö hatlarında kullanılır.

Yalnız bir iletim hattı veya iletkin ray varsa, geri dönüş akımı ray üzerinden geçer. Bunun için tek ya da her iki ray da kullanılabilir [3].

Çekim alt sistemleri; çekim alt sistemi tüm ekipman ve aletleri ile birlikte elektrik motorundan oluşur. Bu alt sistemde elektrik enerjisi, treni çalıştırmak için mekanik enerjiye dönüştürülür. Katener iletim hatlarında, elektrik enerjisi pantografla trene iletilir. Üçüncü veya dördüncü ray kullanılan sistemlerde araçlar pabuçlar vasıtası ile enerjiyi çekerler [3].

Güç kaynağı ve çekim alt sistemlerinin farklı talepleri vardır ve bunlar enerji iletimi önceliklerine ve enerji kullanımına bağlıdır. Bu sebeple farklı elektrikli çekim sistemleri geliştirilmiştir [3].

3.3.1 Elektrikli çekim sistemleri

3.3.1.1 Doğru akımlı çekim (DC)

Tren çekim sistemleri göz önünde bulundurulduğunda doğru akım alternatif akımdan daha üstündür. Buna karşılık doğru akım dönüştürülemez. Bundan dolayı ilk iletim sistemleri, çekim motorları ile aynı gerilimde çalıştırılmıştır. Kullanılan başlıca gerilim seviyeleri;

- 600 V
- 750 V, üçüncü ve dördüncü ray sistemlerinde
- 1500 V, diğer gerilimlere göre daha yaygındır.
- 3000 V

Yukarıdaki gerilimler kamusal güç şebekelerinde kullanılan gerilim seviyelerine (150000 V, 220000 V, 280000 V gibi) göre ve efektif güç iletimi için çok düşüktür. Bundan dolayı besleme DC sistemleri, büyük iletken kesitlerini (400-900 mm²) ve yakın mesafeli trafoları gerektirir. 1500 V için trafolar arası mesafe 15-20 km, 3000 V için 35-40 km dir [3].

Doğru akım sistemi, araç çekim donanımı olarak daha üstün olmasına rağmen daha fazla sayıda trafo merkezi gerektirmesi güç kaynağı olarak kullanılmasında zayıf bir yöndür. Doğru akım, başta Fransa, İspanya, İtalya, Rusya, Japonya ve İngiltere'nin bazı bölgeleri olmak üzere dünya genelinde elektrikli demiryolu hatlarının yarısında kullanılmaktadır [3].

3.3.1.2 Alternatif akımlı çekim (AC)

Güç kaynağı alt sistemleri açısından doğru akıma göre daha üstündür. Ama çekim alt sisteminde bazı sorunlarla karşılaşılır. Çekim motorları, kolektörlü seri bağlı AC motorlarıdır. Bu motorlar AC frekansı arttıkça bazı problemlerle karşılaştıklarından dolayı kamusal 50 Hz frekansından daha düşük AC frekansı kullanma ihtiyacı ortaya çıkmıştır [3].

15000 V, $16\frac{2}{3}$ Hz alternatif akım çekim sistemi: Bu sistemde trafo merkezleri iki yolla enerjiyi alırlar.

- Ulusal güç şebekelerinden (50 veya 60 Hz frekansında). Bu durumda trafolarla gerilim dönüşümü ve frekans değişimi uygulanır.
- Düşük frekanslı AC taşıyan ayrı bir şebekeden. Bu durumda trafoda sadece gerilim indirgenmesi olur.

15000 V, $16\frac{2}{3}$ Hz AC çekim, günümüzde Orta Avrupa' da (Almanya,Avusturya, İsviçre) (trafolar özel düşük frekanslı AC santrallerden beslenir) ve Kuzey Avrupa' da (İsveç, Norveç) (trafolar 50 Hz ulusal güç şebekesinden beslenir) kullanılmaktadır. Bu tip alternatif akım sistemi dünyadaki toplam demiryolu ağının %20 sinde kullanılmaktadır [3].

15000 V, $16\frac{2}{3}$ Hz de 50-60 km aralıklarla trafo merkezleri yerleştirilir ve iletken hat kesiti doğru akımdakine oranla daha küçüktür. Buna karşın dezavantajı, kullanılan çekim (cer) motorlarının çok hassas olmasıdır [3].

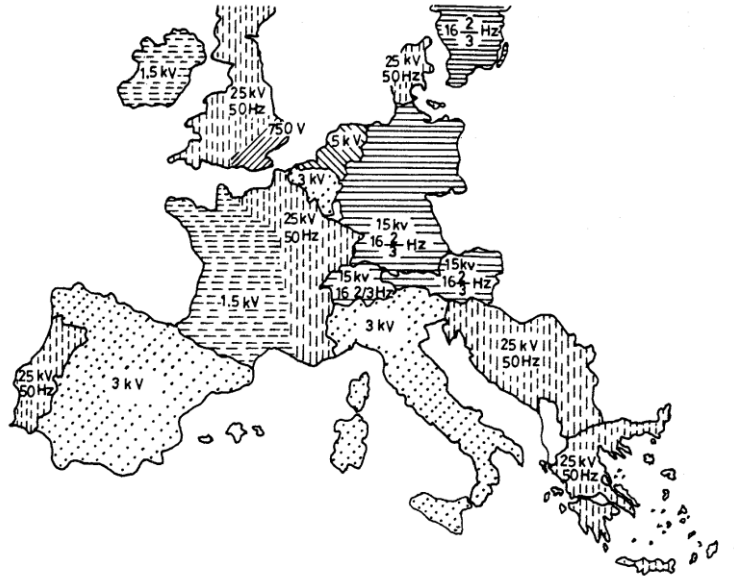
25000 V AC, 50 Hz çekim sistemi: Daha önce bahsedilen iki sistemin dezavantajlarından dolayı, iki sistemin avantajlarını birleştirecek ve dezavantajlarını ihmal edecek bir çekim sistemi bulunmaya çalışılmıştır. Bu, 1950 den sonra etkin ve hafif ignitronlu redresörle (daha sonra bunların yerini 1980 li yıllarda GTO

teknolojisi almıştır) başarılmıştır. Bu sistemde, trafo merkezleri kamusal enerji santrallerinden beslenir ve gerilim 25000 V, 50 Hz'e düşürülür ve iletim hattı ile lokomotifte iletilir. Lokomotifte gerilim yine düşürülür ve doğru akıma dönüştürülerek seri uyarımlı çekim motorları çalıştırılır.

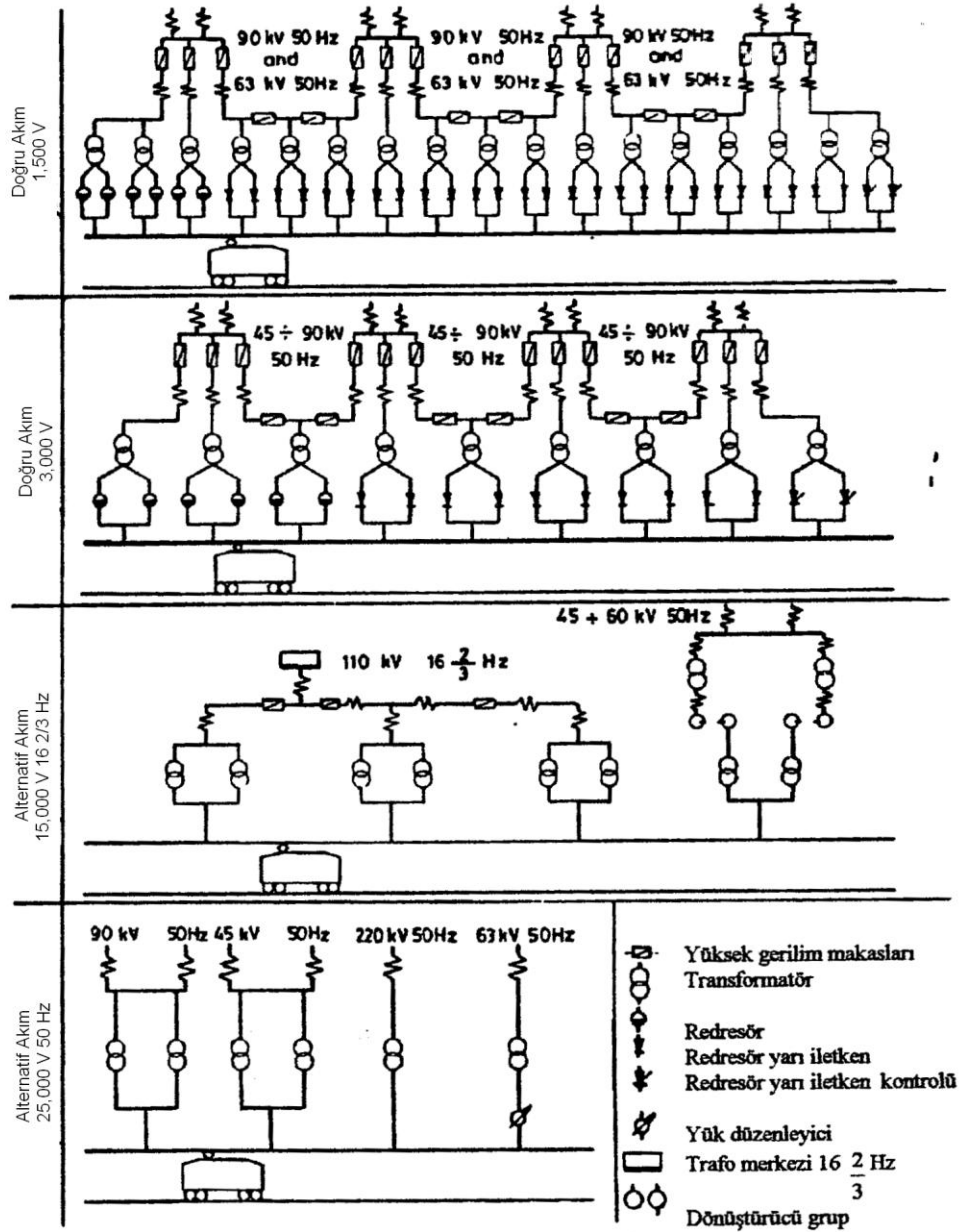
25000 V, 50 Hz sistemi dünyadaki toplam demiryolu hattının %30'nda ve çoğunlukla yeni hatlarda kullanılmaktadır. Trafolar arası 60-100 km'dir ve iletim hat kesiti doğru akımdakine göre 3-5 defa daha küçüktür. Ayrıca bu sistem trenlerin hareketi için üstün nitelikte olan doğru akım seri motorlarını kullanma imkanı verir [3].

25000 V, 50 Hz AC ve 1500 V DC kullanan çekim sistemlerinin yapım maliyetlerini karşılaştırdığımız zaman, ilkinin ikinciden %30 daha az maliyetli olduğu ortaya çıkmaktadır [3].

Şekil 3.3 bazı Avrupa ülkelerine ait çekim sistemlerini, şekil 3.4 ise elektrikli çekim sistemlerinin temel kısım ve karakteristiklerini vermektedir.



Şekil 3.3 : Bazı Avrupa ülkelerindeki çekim sistemleri [3]

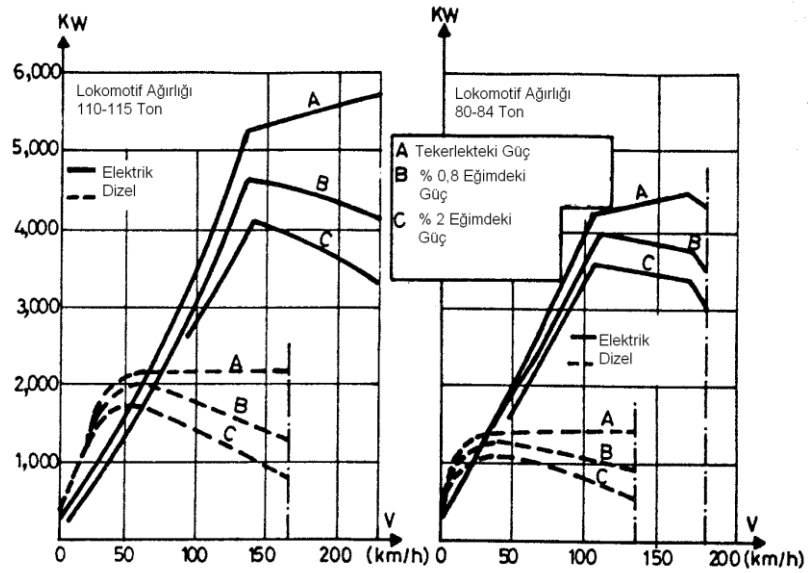


Şekil 3.4 : Değişik elektrikli çekim sistemlerinin temel kısım ve karakteristikleri [3]

3.3.1.3 Elektrikli çekim sisteminin dizele göre avantaj ve dezavantajları

- Elektrikli lokomotifin en büyük avantajı spesifik gücüdür (50-55 kW/ton). Dizel lokomotiflerin spesifik gücünün (20-25 kW/ton) iki katı kadardır (Şekil 3.5).

- Elektrik motorları, geçici aşırı yüklemeleri (demerajda, büyük eğimlerde vb.) karşılayabilirken, dizel motorlar kabul edilen ömürleri ve bakım maliyetleri göz önüne alındığında bunu başaramazlar.
- Bunun dışında yüksek rakımlardan geçen hatlarda elektrikli motorlarda güç kaybı olmazken, dizel motorlarda motora giren hava azaldığından, güç kaybı olur.
- Uzun tünellerde hava girişi kısıtlı olduğu için elektrikli çekim kullanılması zorunlu hale gelir.
- Son olarak, elektrikli motorlar çok az hava kirliliğine neden olur ve bakımı dizele göre çok daha basit ve kolaydır. Fakat dizel lokomotifler yine de otomobillere göre havayı daha az kirletmektedir.



Şekil 3.5 : Elektrik ve dizel motorların güç karşılaştırması [3]

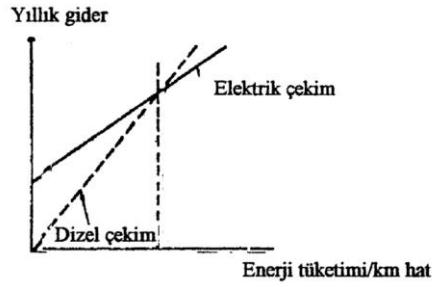
3.3.1.4 Elektrikli çekim sisteminin fizibilite analizi

Bunun için iki maliyet faktörü hesaba katılmaktadır:

- İletim hatları ve trafoları içeren yapım maliyeti trafiğe bağlı değildir.

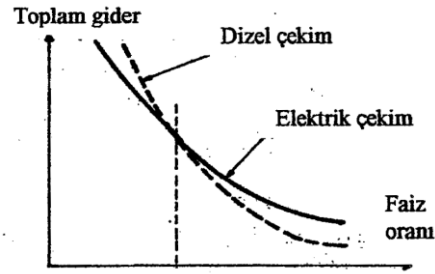
- İşletme ve bakım maliyeti, trafik yoğunluğu ile birlikte artar.

Analizde çoğunlukla kullanılan birim, trafiğe bağlı olarak toplam yıllık maliyettir. Trafik, bir km lik hatta harcanan yıllık enerji ile ifade edilir. Bu ifadelere karşılık gelen değerler, şekil 3.6 da gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi düşük trafikte elektrikli çekim maliyet yönünden fizibil değildir [3].



Şekil 3.6 : Dizel ve Elektrik Çekim için bir km hattın enerji tüketimine bağlı olarak yıllık giderleri [3]

Analiz, 20-25 yıllık bir süre için yapılır ve bu süredeki toplam maliyet (ilk yapım maliyeti ve yıllık işletme maliyeti) şimdiki değer yöntemi ile her çekim sistemi için sabit bir değere dönüştürülerek hesaplanır [3]. Elektrikli çekimin fizibil olduğu trafik değerlerini gösteren grafik şekil 3.7 de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Elektrikli çekimin fizibil olduğu trafik değeri [3]

Elektrikli çekimin fizibilite analizinde bir çok belirsizlik mevcuttur; sıvı yakıt fiyatının gelecek 20-25 yıl içinde ne olacağı, farklı maliyetlerin şimdiki değerlere dönüştürülmesinde kullanılan faiz oranının bilinmemesi, analiz süresinin uzunluğu gibi [3].

Her durumda bir fizibilite analizi yapmak mümkün olmaz ve çoğu zaman bir hattın elektrikli olup olmayacağı ile ilgili kararların hızlı bir şekilde verilmesi gerekir. Bazı demiryolu kurumları bunun için basit bir kriter belirlemiştir; çoğunlukla hattaki tren sayısı veya bir km lik hatta harcanan enerjidir [3].

Kriter her demiryolu şebekesinde farklıdır, çünkü her ülkenin işçilik, enerji ve finansal yatırım maliyetleri farklıdır. Buna karşılık, ilk bakışta kullanılabilecek tek kriter hatta kullanılan tren sayısıdır. Örneğin, 1973 yılına kadar (enerji maliyetleri düşüken) elektrikli çekimin fizibil sayılması için hattan bir günde en az bir yönde 30 trenin geçmesi gerekiyordu. 1973 ve 1979 enerji krizlerinden sonra bu kriter 15 tren/yön-gün civarına düşmüştür [3].

Trenin araç sayısı az ya da çok olabileceği için, toplam araç sayısını dikkate alan bir kriter de düşünülmüştür. Bu kriter bir km lik bir hattın enerji tüketimidir. Mesela Fransız Demiryolları için, bir elektrikli hattın fizibil olması için yıllık 70000 kW/km enerji tüketimi olmalıdır, fakat Alman Demiryolları için bu limit değer 150000 kW/km dir. Her kurum için bu kriter çok farklı olmaktadır. Belli bir hatta trafik yükü veya enerji tüketimi yukarıdaki limit değerleri aştığı zaman elektrikli hatta karar vermek için detaylı bir fizibilite çalışması yapılması gerekir [3].

3.3.1.5 Enerji iletim hattı (havai katener sistemi)

Bir iletim hattı aşağıdaki elemanları içerir:

- Besleme iletkenleri, temas iletkenleri (pantografa değen), askı halatı, portör telleri
- İletken taşıma yapıları, direkler veya portörler
- Yalıtkanlar, direk konsolu germe aletleri (genellikle 1200 m de bir), karşı ağırlıkları, farklı montaj parçaları, direkleri trafo hattına ve toprağa bağlayan teller, trafo bağlantısı için iletkenler.

Katener iletim hattı, hat ekseninden 2,2-3 m mesafede olan direklerle izolatörlerle bağlı konsollarla asılır. Günümüzde galvaniz çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum

borular kullanılır. 1500 V a kadar komple yalıtkan olan kompozit tüpler/çubuklar da kullanılabilir [3].

İletim hattı kesiti ve diğer karakteristiklerinin hesaplanması lokomotifte müsaade edilen gerilim düşüşüne dayanarak yapılır. Bu gerilim düşüşünün, nominal değerden %33 daha az ve %10 daha fazla sapmasına izin verilmez [3].

Gerilim düşüşünün teorik hesaplanması çekilen yükün sabit olduğu kabulüne göre yapılır ama aslında çalışan tren sayısı ve konumları değişmekte olduğu için bu gerçek durumu modellemez [3].

Bundan dolayı küçük ölçekli bir model kurularak iletim hattının hesaplanması gerekir:

- Trafolar sabit gerilimli kaynaklar ve trafolar için uygun dirençlerle modellenir.
- Besleme dönüş iletkenleri uygun dirençlerle modellenir.
- Trenler hattın değişik yerlerine bağlı değişken dirençlerle modellenir.
- Uygun ölçüm cihazları trafo çıkış gerilimini, her trafodaki toplam gerilimi ve çekim motorundaki gerilimi direk okuma imkanı verir (trafo mesafesi ve iletim hattı kesitinin fonksiyonu olarak).

Bu fiziksel model değişik iletim iletkenlerinin, trafo mesafelerini vb. test etme ve değerlendirme ve optimum çözümü seçme imkanı verir. UIC her durumda 25000 V, 50 Hz çekim sisteminde normal çekim gücünü sağlamak için iletim hattı geriliminin maksimum 19000 V ve kısa süreli 17000 V a düşüşünü kabul eder [3].

Başta tren hızı olmak üzere, iklim şartları (rüzgar hızı ve yönü) ve direk açıklığına bağlı olarak değişik katener hattı asma metodları kullanılır. Düşük hızlarda (120 km/sa hıza kadar) basit katener sistemi yeterlidir ama orta ve yüksek hızlarda Y halatlı katener tipi askı zorunludur [3].

Birkaç hat paralel yerleştirildiği zaman (istasyon, tünel giriş ve çıkışlarında, köprülerde vb.) hattı yeniden konfigüre etmek ve toplam elektrikli hattı azaltmak için bazı hatları elimine etmek tavsiye edilir. Yeni konfigürasyonda gelecekteki kesişmeler, makas ve çaprazlar dikkate alınır [3].

Elektrik enerjisi ya katenerle ya da 3. rayla (bir veya iki) lokomotifle iletilir. 3. ray başlıca metrolarda ve bazı banliyö hatlarında kullanılır. 3. ray sistemi çok yoğun hatlarda tercih edilir çünkü buralarda çok büyük kesitli katener sistemi gerekir. 3. ray 900 mm^2 kesitindeki bir katener iletken kesitine denk gelir. Bu avantaj tünellerde daha küçük gabarilere izin verir ve böylece maliyetten tasarruf edilir [3].

Hemzemin ve makaslarda üçüncü ray kesilir ve enerji sürekliliği özel yalıtkanlı kablolarla sağlanır. 3. rayda güvenlik çok önemlidir; personel çalışma ve geçiş alanları için yalıtkan plakalar ile örtülür. 3. ray katenerine göre kar ve dona daha fazla duyarlıdır. Bazı metrolarda (Londra metrosu) pozitif ve negatif olmak üzere iki tane enerji rayı kullanılır; bunlarla normal raydan geri dönüş akımlarının geçmesi önlenmiş olur [3].

3.3.1.6 Trafolar

AC trafo merkezlerinde sadece gerilim düşürülür ve bunun için DC trafo merkezlerinden daha basittirler. Bu trafolarla kısa devre riskine özellikle dikkat etmek gerekir. Bunu önlemek için koruyucu konfigürasyonlar ve riski sınırlayan cihazlar kullanılır [3].

1980 yıllarının ortalarına kadar çok yaygın olarak tristörler kullanılırdı. GTO teknolojisinin devreye girmesi ile komütasyon devrelerine gerek kalmamış ve bu sayede yük kayıplarının açıkça azalması sağlanmıştır [3].

Bugün trafo merkezleri ve bunlardan beslenen sistemler kumanda kontrollüdür ve merkezi bir kontrol istasyonundan hatları, trafoları ve trafodan beslenen kısımlarını gösteren bir monitörle izlenir. Uzaktan kumanda kontrolü farklı frekanslardaki sinyal kodları ile gerçekleştirilir [3].

3.3.1.7 Senkron ve asenkron motorlar

Elektrik motorları aşağıdaki üç ana kategoride sınıflandırılabilir.

- Doğru akım motorları : Endüktör sabittir (stator) ve DC taşır. Endüksiyon fırçaları ile DC ile beslenen rotor veya hareketli kısım ve stator arasında endüksiyon olur. Böylece rotorun sargıları alternatif akım taşır. Motor hızı motora verilen DC gerilimini değiştirerek veya manyetik alan değiştirilerek ayarlanır. Dönme yönü endükter bağlantıları ters yüz edilerek değiştirilir, (polarite tersine çevirmek).
- Senkron motorlar: Endüktör döner ve DC taşır. Endüksiyon, rotor ile üç fazlı AC taşıyan sabit kısım (stator) arasında olur. Dönme hızı üç aşamalı alternatif akımın frekansı değiştirilerek sağlanır. Dönme yönü AC fazlarının ters çevrilmesi ile değiştirilir.
- Asenkron motorlar: Endüktör sabittir ve üç fazlı AC taşır. Endüksiyon stator ile üç fazlı AC taşıyan dönen kısım arasında olur. Hız üç fazlı AC frekansı değiştirilerek ayarlanır. Dönüş yönü endüktör fazları ters çevrilerek değiştirilir.

Asenkron motorlar aşağıdaki avantajları sunar;

- Daha hafiftir, aynı güçteki senkron motorların yaklaşık yarısı kadardır
- Daha yüksek verim ve tork kuvveti
- Hatta gelen yükün azalması

Günümüzde çoğu elektrikli lokomotif doğru akım motoru kullanır. Örneğin, Fransa demiryolları Alstom'un ürettiği 90 ton ağırlığında ve 4400 kW gücünde ve 160 km/sa hızındaki BB serisi elektrikli lokomotifleri kullanır. İsveç Demiryolları, ABB tarafından üretilen R/C serisi lokomotifleri ve Alman Demiryolları, Krupp tarafından üretilen 3300 kW gücünde ve 160 km/sa hızındaki E181.2 seri lokomotifleri

kullanılır. Asenkron motorlara örnek Alman ICE trenleri ve yüksek hızlı Eurostar (Paris- Londra hattında) trenleridir [3].

Senkron ve asenkron motorlar güç bakımından denktir. Bunlar yüksek dönem hızlarından dolayı doğru akım motorlarından daha fazla efektiftir. Asenkron teknoloji karmaşık elektronik sistemlerine gerek olmasına rağmen hızlı bir şekilde genişlemektedir. 1990 yılında senkronize motorlu bir lokomotif 515 km/sa hıza ulaşmıştır. Bu iki farklı motor arasındaki seçim satın alma, bakım ve işletme maliyetlerine bağlıdır [3].

4. DEMİRYOLU DİRENİMLERİ

Demiryolu direnimleri başlıca 5 başlık altında incelenebilir, bunlar;

- Doğru ve düzlük direnimi (Lokomotiflerin daimi direnimi)
- Tünel direnimi
- Kurba direnimi
- Eğim direnimi
- Demeraj direnimidir.

4.1 Doğru ve Düzlük Direnimi (Lokomotiflerin Daimi Direnimi)

Tren hareketine karşı olan çeşitli direnimleri yenmek için gerekli kuvvet (R) (4.1) bağıntısı ile bulunur [3].

$$R = A + B \times V + C \times V^2 \quad (4.1)$$

- A terimi hızdan bağımsızdır. Aracın özelliklerine bağlı olarak değişen hareket ve yuvarlanma direnimlerini ve kurpta tekerlek budeni ile ray arasındaki sürtünme direnimlerini,
- $B \times V$ terimi hızla doğru orantılı değişir ve aks ve şaftın dönmesi, mekanik iletim, frenleme gibi mekanik direnimleri,
- $C \times V^2$ terimi ise hava (aerodinamik) direnimini ifade eder.

A, B ve C parametreleri aşağıdaki bağıntılarda verildiği gibi (4.2, 4.3) işletme aracının özelliklerine bağlı olarak açıklanır.

$$A = \lambda \times M \times \sqrt{\frac{10}{m}} \quad (4.2)$$

M= toplam tren yükü (ton)

m= dingil yükü (ton)

λ = işletme aracına bağlı bir parametre (SNCF araçları için 0,9 ile 1,5 arası)

B x V= 0,01 x M x V (iyi kaliteli bir hat ve boji bir araç için)

V=aracın hızı (km/sa)

$$C \times V^2 = k_1 \times S \times V^2 + k_2 \times p \times L \times V^2 \quad (4.3)$$

$k_1 \times S \times V^2$ terimi trenin ön yüzünde ortaya çıkan aerodinamik direnimi, $k_2 \times p \times L \times V^2$

terimi ise trenin yan yüzeyleri boyunca ortaya çıkan aerodinamik direnimleri belirtir.

k_1 : trenin ön ve arka şekline bağlı bir parametre. Örneğin klasik SNCF (Fransız demiryolları) araçları için $k_1 = 20 \times 10^{-4}$, TGV trenleri için $k_1 = 9 \times 10^{-4}$

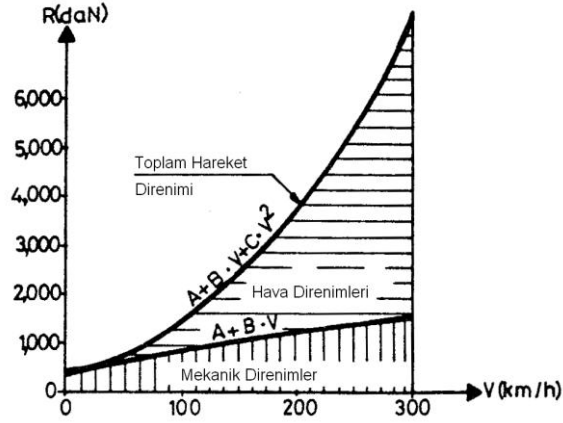
S: önkesit alanı (m^2) ve genellikle $10 m^2$ civarındadır.

k_2 : $p \times L$ yüzeyine bağlı, pürüzlülüğü ifade eden bir parametredir. Örneğin klasik SNCF araçları için $k_2 = 30 \times 10^{-6}$, TGV araçları için $k_2 = 20 \times 10^{-6}$

p: aracın ray seviyesine kadar olan kısmi çevresi, genelde 10 m civarındadır.

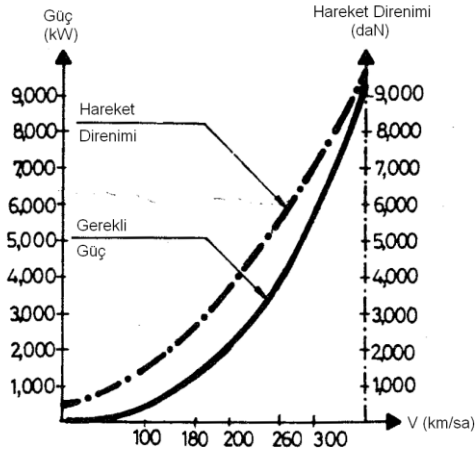
L: tren boyu (m)

Şekil 4.1, hızın bir fonksiyonu olarak mekanik ve aerodinamik direnimlerin artışı göstermektedir. Görüldüğü gibi çok yüksek hızlarda aerodinamik direnimler önemli olmaktadır ve bu yüzden bu direnimi azaltmak için araçlara uygun özel aerodinamik şekiller verilir [3].



Şekil 4.1 : Hızın bir fonksiyonu olarak mekanik ve aerodinamik direnimler [3]

Şekil 4.2 direnimi yenmek için gerekli güç ve hızın bir fonksiyonu olarak hareket direnimini gösterir. Grafikten de anlaşılacağı gibi, hızı 200 km/sa' den 300 km/sa' e çıkarmak için motor gücü %200 artırılmalıdır [3].



Şekil 4.2 : (Fransız TGV 001 için, sıfır eğimde) Hıza bağlı hareket direnimi ve gerekli çekim gücü [3]

4.1.1 Doğru ve düzlük direnimi için ampirik bağıntılar

Doğru ve düzlük direnimini hesaplamak için kullanılan $R=A+BxV+CxV^2$ bağıntısındaki A, B ve C parametreleri işletme aracının özelliklerine bağlıdır. Bazı araç üretici firmaları ve demiryolu kurumları bu parametreleri hesaplamak için ampirik bağıntılar geliştirmişlerdir. Birçok kurum tarafından kullanılan bu bağıntılar aşağıda verilmiştir [3].

Fransız demiryollarının kullandığı bağıntılar:

Dizel ve elektrik lokomotifleri için doğru ve düzlük direnimi **(4.4)** ampirik bağıntısı ile bulunur.

$$R(\text{daN})=0,65 M_L +13N+0,01 L \times V +0,03 V^2 \quad (4.4)$$

M_L : Lokomotif ağırlığı (ton), N: Dingil sayısı, V: Hız (km/sa)

Çekilen işletme araçları için; çekilen araçların birbirine benzer olmamasından dolayı çok fazla formül geliştirilmiştir. Çekilen işletme araçları için genelde “özgün direnir” adı verilen birim araç ağırlığına düşen direnir cinsinden hesaplamalar yapılır [3].

- Bojili yolcu araçları için:

$$r(\text{kg/t})= 1,5 + \frac{V^2 (\text{km / sa})}{4500} \quad (4.5)$$

- Standart UIC tipi araçlar için:

$$r(\text{kg/t})= 1,25 + \frac{V^2 (\text{km / sa})}{6300} \quad (4.6)$$

- Dingilli (bojisiz) yolcu araçları ve ekspres yük trenleri için:

$$r(\text{kg/t}) = 1,5 + \frac{V^2 (\text{km/sa})}{2000 - 2400} \quad (4.7)$$

- 10 t dingil yüklü yük trenleri için:

$$r(\text{kg/t}) = 1,5 + \frac{V^2 (\text{km/sa})}{1600} \quad (4.8)$$

- 18 t dingil yüklü yük trenleri için:

$$r(\text{kg/t}) = 1,2 + \frac{V^2 (\text{km/sa})}{4000} \quad (4.9)$$

Elektrikli yolcu araçları genelde yüksek hızlı trenlerde ve banliyö hatlarında kullanılır. Elektrikli banliyö trenleri için toplam direnimi, R şu şekilde ifade edilir **(4.10):**

$$R(\text{kg}) = (1,3\sqrt{\frac{10}{m}} + 0,01V)M + C \times V^2 \quad (4.10)$$

$$C = 0,0035S + 0,0041\frac{pL}{100} + 0,002N_p \quad (4.11)$$

M: elektrikli yolcu treninin toplam ağırlığı (ton)

m: dingil yükü (ton), V: hız (km/sa), S: önkeseit alanı (m^2) (genellikle 10 m^2 civarındadır.)

p: aracın ray seviyesine kadar olan kısmi çevresi, genelde 10 m civarında,

L: tren boyu (m)

N_p : yükseltilecek pantograf sayısıdır.

Yüksek hızlı TGV treninin (420 ton ağırlığında) toplam direnimi **(4.12)** bağıntısı ile bulunur:

$$R(N) = 2500 + 33V(\text{km/sa}) + 0,543V^2 \quad (4.12)$$

Amerikan demiryolu bağıntıları:

Amerikan demiryolları özgün direnim hesabında tekrardan düzenlenmiş Davis formülünü kullanır, **(4.13)**;

$$r(\text{lb/t}_s) = 0,6 + \frac{20}{m} + 0,01V(\text{mil/sa}) + \frac{k}{m \times N} V^2 \quad (4.13)$$

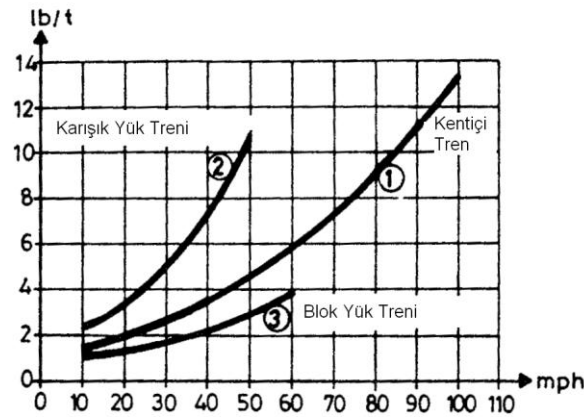
$$1 \text{ lb} = 0,454 \text{ kg}, 1 \text{ t}_s = 2000 \text{ lb} = 907,2 \text{ kg}$$

m: dingil yükü, N: dingil sayısı, (mil/sa= 1,61 km/sa)

$$k = C \times S \quad (4.14)$$

C: hava direnimi katsayısı (tablolardan elde edilir), S: araç kesit alanı (birimi ft^2)

Şekil 4.3 Amerikan Demiryollarına ait özgün direnimleri göstermektedir.



Şekil 4.3 : Amerikan Demiryollarına ait özgün direnimler [3]

Şekil 4.3 de bahsi geçen kent içi tren; $V=80$ mil/sa, $m=25$ lb/dingil, toplam ağırlığı 1600 t olan 16 araçlı tren, karışık yük treni; $V=60$ mil/sa, $m=15$ lb/dingil, toplam ağırlığı 3000 t ve ortalama araç ağırlığı 45 t_s blok (komple) yük treni; $V=60$ mil/sa, $m=60$ lb/dingil, her biri 240 t_s olan 21 araçlı trendir.

Alman demiryolu formülleri:

Alman demiryolları yük trenleri için Strahl formülünü kullanır (4.15):

$$r(Nt/t) = 25 + k \left(\frac{V(\text{km/sa}) + \Delta V}{10} \right) \quad (4.15)$$

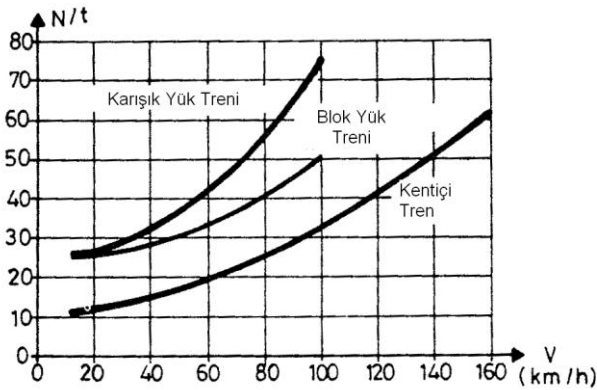
Kent içi trenler için ise Sauthoff formülü kullanılır (4.16):

$$r(Nt/t) = \left[1 + 0,0025V + 0,48 \times 1,45 \frac{16 + 2,7}{800} \times \left(\frac{V + 15}{10} \right)^2 \right] \times g \quad (4.16)$$

k : karışık yük trenleri için 0,5 ve blok trenleri için 0,25 dir.

V : tren hızı, ΔV : trenin önündeki rüzgar hızı (genellikle 15 km/sa alınır).

Şekil 4.4 Alman Demiryollarına göre farklı araçlara ait, şekil 4.5 geniş ve dar ekartmanlı hatlara ait özgün direnimleri göstermektedir.



Şekil 4.4 : Alman demiryollarına ait özgün direnimler [3]

Geniş ve dar ekartmanlı hatlar için bağıntılar:

Geniş ekartman ($e=1,676$ m) hatlar için aşağıdaki bağıntılar önerilir:

Yolcu trenleri:

$$r(Nt / t) = (0,6855 + 0,2112V(\text{km} / \text{sa}) + 0,000082V^2) \times g \quad (4.17)$$

Yük trenleri için:

$$r(Nt / t) = (0,87 + 0,0103V(\text{km} / \text{sa}) + 0,000056V^2) \times g \quad (4.18)$$

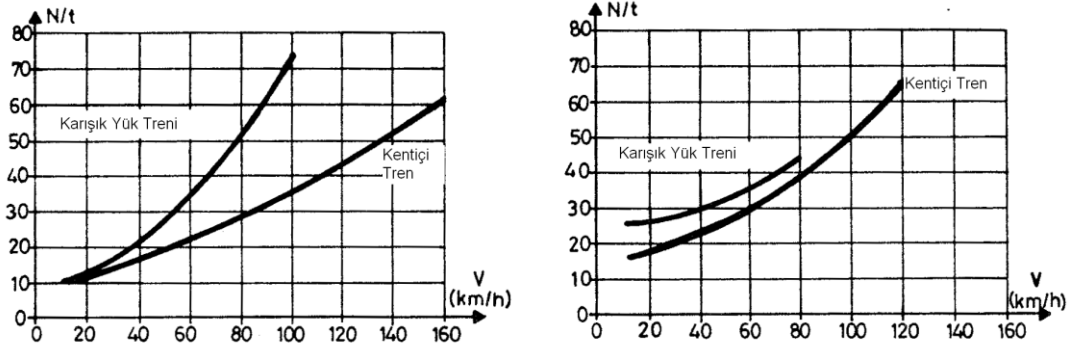
Dar ekartman ($e=1$ m) hatlar için:

Yolcu trenleri:

$$r(Nt / t) = (0,156 + 0,0075V(\text{km} / \text{sa}) + 0,0003V^2) \times g \quad (4.19)$$

Yük trenleri için:

$$r(Nt / t) = (2,6 + 0,0003V^2) \times g \quad (4.20)$$



Şekil 4.5 : Geniş ve dar ekartmanlı hatlara ait özgül direnimler [3]

Buharlı lokomotifler için:

$$R_{L+T}(\text{kg}) = 2,5L_o + C_1 \times L_r + C_2 \times S \frac{(V + \Delta V)^2}{100} + 0,04 \times Z \quad (4.21)$$

L_o : Tenderin ağırlığı ile kılavuz dingillere gelen lokomotif ağırlığı toplamı (ton)

L_r : Lokomotifin aderans ağırlığı (ton)

S : Lokomotifin önkeseit alanı (m^2)

C_1 : Akuple (birbirine ve buhar makinesine bağlı) dingil sayısı ve silindir adedine bağlı olup:

2 silindirli 2 akuple dingillerde : 5,8

3 silindirli 2 akuple dingillerde : 5,9

4 silindirli 2 akuple dingillerde : 6,0

2 silindirli 3 akuple dingillerde : 7,3

3 silindirli 3 akuple dingillerde : 7,4

4 silindirli 3 akuple dingillerde : 7,5

2 silindirli 4 akuple dingillerde : 8,4

3 silindirli 4 akuple dingillerde : 8,5

4 silindirli 4 akuple dingillerde : 8,6

2 silindirli 5 akuple dingillerde : 9,3

3 silindirli 5 akuple dingillerde : 9,4

4 silindirli 5 akuple dingillerde : 9,5

2 silindirli 6 akuple dingillerde : 10,0

3 silindirli 6 akuple dingillerde : 10,15

4 silindirli 6 akuple dingillerde : 10,30

C_2 : Klasik lokomotiflerde 0,6 olup, kısmen aerodinamik olanlarda 0,33, tam aerodinamik olanlarda ise 0,25-0,30 değerindedir.

ΔV : rüzgar hızı (km/sa)

$\Delta V = 0$ (rüzgarsız havada)

$\Delta V = 12$ (orta şiddetli rüzgarda)

$\Delta V = 20$ (şiddetli rüzgarda)

$\Delta V = 30$ (çok şiddetli rüzgarda)

V : katar hızı (km/sa)

Z : lokomotifteki çekim kuvveti kaybı

Patlamalı motorlu lokomotifler için:

$$R_L = C_0 \times L_0 + C_1 \times C_2 \times L_r + C_3 \times S \frac{(V + \Delta V)^2}{100} \quad (4.22)$$

w_L : lokomotifin direnci (kg)

V : katar hızı (km/sa)

ΔV : rüzgar hızı (km/sa)

L_0 : kılavuz tekerlere binen yük (ton)

L_r : lokomotifin aderans ağırlığı (ton)

S: lokomotifin önkesit alanı (m^2)

C_0 : 1,5-2,5

C_1 : 1 (iyi bakımlı üst yapıllı yollarda)

C_2 : 2,5-3,0 (motorlu lokomotiflerde)

C_2 :2,5 (kayma yataklı eski mototrenlerde)

C_2 :2,2 (bilyalı yataklı yeni mototrenlerde)

C_2 : 1,6 (muhtelif kısımlara ayrılan hızlı mototrenler)

C_3 : 0,225 (iki dingilli aerodinamik mototrenler)

C_3 : 0,25 (dört dingilli aerodinamik mototrenler)

C_3 : 0,375 (iki dingilli aerodinamik olmayan mototrenler)

C_3 : 0,425 (dört dingilli aerodinamik olmayan mototrenler)

C_3 : 0,225 (iki kompozisyonlu hızlı mototrenler)

C_3 : 0,30 (üç kompozisyonlu hızlı mototrenler)

C_3 : 0,36 (dört kompozisyonlu hızlı mototrenler)

C_3 : 0,50-0,70 (motorlu lokomotifler) [10]

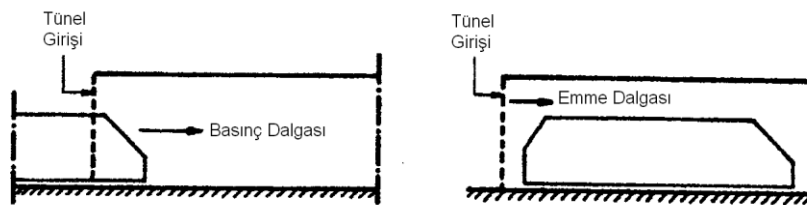
4.2 Tünel Direnimleri

Tünelde iki aracın karşılaşması durumunda ortaya çıkan ani basınç artışı sonucunda yolcu konforu etkilenebilir ve aracın hava (aerodinamik) direnimi artabilir. Bu tür sorunları engellemek amacıyla tünellerde uygun havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulur [3].

4.2.1 Tünelde basınç sorunları

Tünele bir tren girerken aracın ön kısmı havayı sıkıştırır ve yüksek basınç dalgalarına sebep olur (şekil 4.6). Tren ilerledikçe dalganın genliği de artar ve aracın arka kısmı tünele girdiği zaman maksimum değere ulaşır. Bu sırada trenin arka kısmında vakum etkisi ile alçak basınç dalgaları oluşur. Trenin ön kısmındaki yüksek basınç dalgaları ses hızında ilerlerken tünel çeperinden yansiyarak alçak basınç dalga formuna dönüşür. Aynı şekilde trenin arka kısmındaki alçak basınç dalgaları da yansiyarak yüksek basınç dalgalarına dönüşür. Bu basınç dalgaları birleşerek zaman içinde azalan basınç değişimlerine neden olur [3].

Buna karşın yolcu konforu basınç değişiminden dolayı etkilenmez, basınç değişim oranından dolayı etkilenir. Havanın ani değişiminde basınç 1300 mm H₂O kadar değişebilir ve yüksekliğin 1000 m kadar artması durumunda basınç 1100 mm H₂O kadar düşer ve yolcu konforunda önemli bir bozulmaya neden olmaz. Buna karşılık tünel içinde bir trenin hareketinde basınç daha az değişir fakat daha fazla rahatsızlık yaratır. Çünkü basınç değişim oranı daha fazladır. İnsan bedeni ani olmaması şartı ile yüksek basınç değişimlerini kabul edebilir [3].

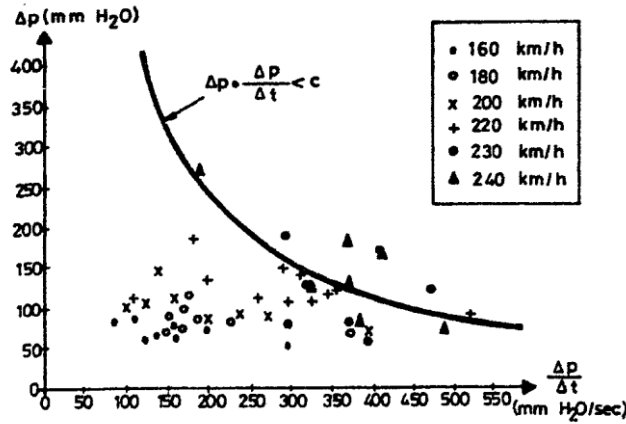


Şekil 4.6 : Tünele giren bir trende basınç ve emme dalgaları [3]

Bundan dolayı yolcu konforunu etkileyen etkenler arasında basınç değişimi Δp yanında basınç değişim oranı $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ da gösterilmektedir. Yapılan araştırmalarda (4.23) bağıntısına göre;

$$\Delta p \times \frac{\Delta p}{\Delta t} < c \quad (4.23)$$

koşulu sağlandığı sürece yolcu konforunda önemli derecede bir etkilenme olmayacaktır. Buradaki c katsayısı her demiryolu kurumunda farklı bir değerde alınmaktadır. Şekil 4.7 demiryolu tünellerindeki deney sonuçlarını göstermektedir. Bu deneyler yapılırken araç tipinin basınç değerlerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir [3].



Şekil 4.7 : Hız artışına bağlı olarak basınç değişimi ve oranı [3]

Grafikten anlaşılacağı gibi 200 km/sa' e kadar olan hızlarda yolcu konforu fazla etkilenmez. Fakat daha yüksek hızlarda yolcu konforu etkilenmeye başlamaktadır. Bundan dolayı günümüzde tünellerde yüksek hız uygulamasına izin verilmemektedir [3].

4.2.2 Tünellerde hava (aerodinamik) direniminin artması

Tünellerde hava (aerodinamik) direnimi daha fazla olmaktadır. İsveç ve Fransız Demiryollarının TEE (Transit Avrupa Ekspresi) treni ile yaptığı deneyler kapsamında hava direnimini azaltmak için tünel yan duvarlarında açıklıklar bırakılmış ve tren hareket direnimleri hesaplanmıştır (4.24) –(4.27) [3].

Açıklığın olmadığı tünel:

$$R(\text{kg}) = 1,107 + 8,25V + 0,490 \times V^2 \quad (4.24)$$

Her 250 m de bir açıklığın bırakıldığı tünel:

$$R(\text{kg}) = 1,107 + 8,25V + 0,224 \times V^2 \quad (4.25)$$

Her 500 m de bir açıklığın bırakıldığı tünel:

$$R(\text{kg}) = 1,107 + 8,25V + 0,246 \times V^2 \quad (4.26)$$

Açık havada hareket direnimi:

$$R(\text{kg}) = 1,107 + 8,25V + 0,158 \times V^2 \quad (4.27)$$

Hava (aerodinamik) direnimini azaltmak için $\frac{S}{\Sigma_{\ell}}$ oranını düşürmek gerekmektedir.

S trenin ön kesit alanı, Σ_{ℓ} etkin tünel kesit alanıdır.

- Tek hatlı tünelde, $\frac{S}{\Sigma_{\ell}} = 0,3-0,5$
- Çift hatlı tünelde, $\frac{S}{\Sigma_{\ell}} \cong 0,15$ olur.

$\frac{S}{\Sigma_{\ell}}$ oranının düşürülmesi, tünel kesitinin büyütülmesine bağlıdır. Bu da ek maliyet demektir. Tünellerde hava direnimini azaltmak için trenin ön ve arka kısımlarındaki basınç farkının azaltılması gerekmektedir.

İki ayrı hattan oluşan Kanal Tüneli'nde (Manş Tüneli) her 375 m de bir bağlantı koridorları açılarak basınç farkı azaltılmıştır. Bu sayede tünel içinde 140 km/sa hızla seyreden bir trenin hava direnimini yenmesi için uygulaması gereken güç 13,5 MW dan 5,8 MW a düşmüştür [3].

4.2.3 Yüksek hızlarda gerekli tünel kesitleri

Yan yana geçen iki trenin karşılaşmaları sonucunda basınç dalgaları oluşur. Bu karşılaşma esnasında hızlı tren daha güçlü basınç dalgaları oluştururken, yavaş tren daha fazla basınca maruz kalmaktadır [3].

İtalyan Demiryollarının deneyleri sonucunda iki trenin tünel içinde karşılaşması çok kısa bir süreliğine olduğundan (saniyenin onda biri mertebesinde) yolcu konforunun (oluşan yüksek sese maruz kalınması) karşılaşma esnasında bozulmadığı ortaya çıkmıştır. İnsan kulağı yarım saniyeden fazla süren seslerden rahatsız olmaktadır [3]. Araçların hasar görmesi (basınç ve sestten dolayı cam kırılması) durumuyla ise 220 km/sa hıza kadar karşılaşılmamaktadır [3].

Yukarıda bahsedilen tüm nedenlerden dolayı, tren hızı arttıkça gerekli olan tünel kesiti de artmaktadır. Yüksek hızlı ($V > 250$ km/sa) hatlarda, tünel kesit alanlarının ($80-100 \text{ m}^2$) yanı sıra, hat eksenleri arasındaki mesafe (4,5-4,7 m) ve aracın performans ve mekanik dayanımı (özellikle camdan üretilmiş kısımları) da dikkate alınmaktadır [3].

4.3 Kurba Direnimi

Kurbalarda görülen direnimin sebepleri ;

- Tekerlekler, deverin az veya çok olması sebebiyle kurbalarda iç veya dış raylara yaslanırlar. Bu durumda tekelerlek budeni ile ray arasında oluşan sürtünmeden dolayı ekstra bir direnime ortaya çıkar.
- Kurbalardan geçişte dingilin iç ve dış ray üzerinde bulunan tekerlekleri yuvarlanma esnasında yuvarlanma yarı çaplarına tam uyan mesafeler

alamazlar. Bunun sebebi boji veya iki dingilli aracın eksenlerinin paralel olarak dizayn edilmesidir. Bu sebepten dolayı kaymalar oluşur ve birtakım dirençler ortaya çıkar.

- Kurbalarda dış raylara verilen dever sebebiyle (dever rampası), iç ve dış ray arasında bir eğim oluşur ve bu da direnç artmasına sebep olur.
- Trenin kurbada seyri esnasında, lokomotifin çekme kuvveti ile vagonların eksenleri arasında bir α açısı oluşur. Bundan dolayı tam ekstenel bir çekim kuvveti uygulanamaz ve çekim kuvvetinde bir kayıp meydana gelir [10].

Kurba direnimi bağıntı (4.28) ve (4.29) 'a göre belirlenebilir.

$$r_c \text{ (kg/t)} = k/R \quad (4.28)$$

k: 500- 1200 arasında bir değer, ortalama 700

R: yatay düzlemdeki kurp yarıçapı (m)

$$\text{Kurba direnimi ayrıca hattın açıklığına göre, } r_c = \frac{K_1}{R - K_2} \quad (4.29)$$

formülüyle de hesaplanmaktadır. Burada K_1 ve K_2 hattın açıklığına bağlı sabitlerdir, Bağıntılar (4.29) – (4.32) 'de verilmektedir.

- Normal açıklıklı ($e=1435$ mm) hatlar için:

$$r_c = \frac{650}{R - 55} \quad (4.30)$$

$$K_1 = 650, K_2 = 55$$

- Dar ($e=1000$ mm) hatlar için:

$$r_c = \frac{400}{R - 20} \quad (4.31)$$

$$K_1 = 400, K_2 = 20$$

- Dar (e=750 mm) hatlar için:

$$r_c = \frac{350}{R - 10} \quad (4.32)$$

$$K_1 = 350, K_2 = 10$$

- Dar (e=600 mm) hatlar için:

$$r_c = \frac{200}{R - 5} \quad (4.33)$$

$K_1 = 200, K_2 = 5$ kullanılmaktadır. Kurba direnimi birimi genellikle kg/t olarak ifade edilmektedir [10].

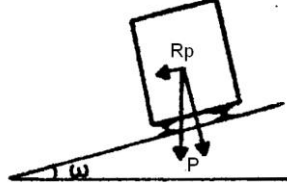
4.4 Eğim Direnimi

Demiryolu aracının düz yolda seyri esnasında yerin merkezine karşı uyguladığı bir kuvvet yoktur. Fakat, rampada (yukarı ya da aşağıya hareket ederken) tren ağırlığının bileşke kuvvetlere ayrılmasından dolayı hat düzlemine paralel bir kuvveti etki etmeye başlar. Bu kuvvet yukarı yönde araç hareketine ek bir direnım olarak etki ederken, aşağı yönde trenin hızını artırıcı bir özelliğe sahip olur [3].

Demiryolu hatlarının boyuna eğimleri az ve çoğunlukla %2 mertebesinde olduğundan rampa açısı w oldukça düşük bir değere sahiptir (Şekil 4.8). Eğim direnimi bağıntı (4.34) e göre hesaplanır:

$$R_p = P \times \sin w = P \times \tan w = P \times i \quad (4.34)$$

P: tren ağırlığı, w: rampa açısı, i: eğim



Şekil 4.8 : Eğim direnimi [3]

4.5 Demeraj Direnimi

Trenin ivmelenmesinden kaynaklanan direnim kuvvetleri klasik dinamik formülleri ile hesaplanabilir ve araca ve hattın geometrik özelliklerine bağlıdır [7]. Özgün demeraj direnimi r_m , bağıntı (4.35) de verilmektedir.

$$r_m \text{ (kg/t)} : (\alpha / g) \times q \quad (4.35)$$

α , tren motorunun sağladığı ivme

q : aracın sabit ve hareketli kütlelerine (şaft, elektrik motoru, transmisyonlar) bağlı bir katsayı olup bağıntı (4.36) 'da verilmektedir. Burada, M_{rot} , hareketli kütle toplamını ve M ise toplam tren kütlesini ifade ederse;

$$q = 1 + (M_{rot} / M) \quad (4.36)$$

olur. Ölçümler sonucunda 1 m/sn^2 lik ivmenin 1 kg/t luk bir ek direnim kuvvetine neden olduğu görülmüştür. Bu direnim yaklaşık % 0,1 bir eğim direnimine eşittir [3].

Toplam özgün direnimlerin hesaplanması: Doğru ve düzlük özgün direnimi r , R yarıçaplı kurbadaki özgün kurba direnimi r_c , S eğimli yoldaki özgün eğim direnimi r_p , özgün tünel direnimi r_T , özgün demeraj direnimi r_m ile gösterilirse, toplam özgün direnim (r_{Top}) Bağıntı (4.37) deki gibi olur;

$$r_{Top} = r + r_c \pm r_p + r_T + r_m \quad (4.37)$$

Elde edilen değerler araç ağırlığı ile çarpılırsa toplam direnimler elde edilir. Eğim direnimi çıkışta pozitif, inişte negatif olarak alınır. ekim hesapları en elverişsiz duruma göre yapıldığından iki nokta arasındaki, en küçük yarıçap ve en bk eğime göre hesap yapılır. r_c ile r_g özgün direnimleri kurba yarıçapı ile eğimin bilinmesiyle hesaplanabilir. Fakat r özgün direniminin vagon veya lokomotif tipine bağlı olması sebebiyle genel bir formül verilemez, $(r = a + b \times v + c \times v^2)$ [10].

5. DEMİRYOLUNDA ENERJİ TÜKETİMİNE BAĞLI HAVA KİRLİLİĞİ

Ulaştırma sistemlerinin kullandıkları çekim türleri ve enerji kaynakları, enerji tüketimi esnasında açığa çıkan zehirli gaz ve emisyonlar sonucunda çevreye zarar vermektedir. Özellikle kent içi ulaştırmasında petrol ürünü yakıtlarla çalışan ulaştırma sistemlerinin kullanılması, o sistemlerin taşımacılıktaki payları ile orantılı olarak ulaştırmanın çevre kirliliğine olan etkilerini artıracaktır. Hareket enerjisini sağlamak için gerekli enerji kaynağını taşıt içinde yakan bu ulaştırma sistemlerinin çıkaracakları kirletici miktarı ise, birim taşıma işi başına tüketecekleri enerji ve yakıt ile birim yakıttan çıkacak kirletici miktarına bağlı olarak değişecektir [1].

Ulaşım sistemlerinin (kara, hava, demiryolu ve deniz) neden olduğu kirlenme sadece miktar açısından değil, kirletici türler olarak da önem taşımaktadır. Ulaşım kaynaklı hava kirlenmesinde 5 temel kirletici parametre rol almaktadır. Bunlar; karbon monoksit (CO), azot oksitleri (NO_x), partiküler maddeler (PM), kükürt oksitleri (SO_x), ve hidro karbon (HC) lardır. Bunlara ek olarak, kurşunlu benzin kullanımı durumunda, kurşun da kirletici maddeler arasında sayılmaktadır. Benzer durum asbestli balata kullanılması durumunda ortaya çıkan asbest için de söylenebilir [11].

Taşıtların neden olduğu kirlenme çok sayıda faktöre bağlıdır. Bunlar arasında taşıtın motor cinsi, kullanım şekli, araç yaşı, bakım durumu, ortalama hızı, yakıt kullanımı, yakıt cinsi, trafik durumu sayılabilir. Bu faktörlere bağlı olarak bir aracın kirletici emisyonları değişkenlik gösterir. Bu değişkenlik genelde çok geniş bir aralıkta ortaya çıkar ve emisyonlar arasında merteye farkları görülür. Bu nedenle taşıt kirlenmesinin belirlenmesi global olarak hesaplanamaz, eğer ortalama bir hesap yapılırsa büyük yanılgılara neden olabilir [11]. En önemli hava kirliliğini karayolu ulaştırması meydana getirmektedir. İstatistiklere göre yılda en çok yol yapan araçlar otomobiller,

en çok yolcu taşıyan araçlar ise otobüslerdir. Bu yüzden otomobillerde yolcu-km'ye düşen yakıt tüketimi ve meydana gelen hava kirliliği diğer karayolu araçlarından daha fazladır. Taşıtların yakıt tüketiminin azaltılması için üzerinde çalışılan teknolojik alanlar; taşıt boyutunun ve kütlesinin azaltılması, motor performansının iyileştirilmesi, tekerlek performansının iyileştirilmesi, aerodinamik form, transmisyon-motor uyumudur [12].

Taşıtların hareketi sırasında meydana gelen kirleticilerin yanı sıra yakıtın yanabilmesi için tüketilen oksijen miktarı da dikkate alınmalıdır. Çünkü bir litre yakıtın yanması esnasında 10 kişinin birer günlük oksijen gereksinimine denk oksijen tüketilmektedir [12].

Demiryolu, elektrikli işletim sırasında hemen hemen hiç kirletici emisyon oluşmaz, yalnızca santralde elektrik elde edilmesi sırasında oluşan kirlilik söz konusudur. Santral türünün ve yerinin seçimindeki esneklik ise büyük rahatlık sağlamaktadır [12].

5.1 Kirletici Maddeler ve Özellikleri

5.1.1 Karbon monoksit

Renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olan karbon monoksitin en önemli kaynakları ulaşım ve yakma işlemleridir. Karbon monoksit havada bitki ve diğer malzemeler üzerinde bariz bir etkiye yol açmayacak konsantrasyonlarda bulunur. Trafığın yoğun ve yavaş hareketli olduğu yerleşim bölgeleri civarında CO konsantrasyonu yükselir. Yüksek konsantrasyonlarda hemoglobinle birleşebilme özelliği nedeniyle insan sağlığı üzerinde tehlikeli sonuçlara sebep olabilirler [11].

5.1.2 Azot oksitler

Azot oksitler, altı farklı gazın karışımından oluşur ve NO_x olarak ifade edilirler. Hava kirliliğinde azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) büyük önem taşırlar ve sadece bu iki azot oksit türü atmosfere büyük miktarlarda verilir [11].

NO orta derecede toksik bir etkiye sahip olmakla birlikte aynı CO gibi kandaki hemoglobinle birleşebilir ve kanın oksijen taşıma kapasitesini azaltır. NO_2 ise akciğerlerdeki alveollerde irritasyona yol açabilir [11].

Azot oksitlerin doğal kaynağı bakteri faaliyetleridir. İnsanların katkısı yakıt yakılması ve ulaşım başta olmak üzere endüstriyel faaliyetlerdir [11].

5.1.3 Partiküler madde

Tek molekül boyutundan ($0,0002\mu$) büyük 500μ dan küçük katı ve sıvı daneciklerdir. Partiküler maddelerin boyutları, partiküler maddelerin etkileri, arıtılmaları, atmosferik olaylarda oynadığı rol vb. pek çok açıdan önem taşır. Hava kirlenmesinde önemli yer tutan partiküler madde boyutları $0,01-100\mu$ arasında değişmektedir. Bazı partiküler madde türlerinin boyutları aşağıda verilmiştir:

Toz: $1-1000\mu$, duman: $0,4-1\mu$, sis: $0,06-10\mu$

Partiküler maddelerin kimyasal yapı ve özellikleri değişiklik gösterir. Organik ve inorganik yapıda bulunabilirler. Hava kirlenmesinde önem taşıyan inorganik bileşenler sülfat, nitrat, kurşun, demir, mangan, çinko ve vanadyum; organik bileşenler ise çeşitli hidrokarbonlar, organik asit ve alkollerdir. Partiküler maddelerin bir kısmı da biyolojik partiküller olarak adlandırılan mikroorganizmalardır. Bunlara örnek olarak, protozoa, bakteriler, virüsler, mantarlar, sporlar, algler ve polenler verilebilir [11].

Partiküler maddelerin insan sağlığına, çoğu solunum sistemi yoluyla olmak üzere çeşitli zararlı etkileri vardır. $0,01-1\mu$ arasında partiküler maddeler solunum

sisteminde birikebilir. 1-2 μ arası partiküller hava kesecikleri ve broşlarda tutulabilir. Etkilerin ortaya çıkmasında maruz kalma süresinin önemi vardır. Partiküler maddelerin etkisi esas olarak solunum sistemini tıkamaları, solunum sisteminin kendi kendini temizlemesine engel olmaları şeklinde ve kanserojen yapıları nedeniyle. Bazı partiküler maddeler zehirli maddeleri taşıırken, bazılarının kendisi zehirli maddeyi oluşturur. Bu tür maddelere en güzel örnek olarak kurşun verilebilir. Kurşun atmosfere element halde verilir. Kan üretimini engeller, sinir sistemini ve idrar yollarını tahrip eder. Partiküler maddelerin özellikle biyolojik kökenli olanları alerjiye de sebep olabilir [11].

5.1.4 Kükürt oksitleri

Kükürt oksitleri altı farklı kükürt oksidinden oluşur ve SO_x olarak ifade edilirler. Bunlar arasında kükürt dioksit ve kükürt trioksitler önem taşır.

Kükürt dioksit, renksiz, yanıcı ve patlayıcı olmayan hafif kokulu bir gazdır. Suda çözünebilir ve havadan iki kat daha ağırdır. Havada 2-4 gün süreyle kalabilir, bu da kirlenme değerlendirmesinde önem taşır. Kükürtdioksit solunum sistemini mukozayı tahriş ederek etkiler ve bronşit ve astım gibi kronik rahatsızlıkların oluşumuna yol açar. Kükürt dioksit partiküler maddelerde birlikte olduğunda solunum sisteminde daha uzun süreler kaldığı için çok daha tehlikelidir [11].

5.1.5 Hidro karbonlar

Karbon ve hidrojenden meydana gelen organik bileşiklerdir. Benzin ve diğer petrol ürünlerinde yer alan bileşiklerin de çoğu hidro karbonlardır [11].

Hidro karbonların önemli kaynakları arasında biyolojik aktiviteler (bataklık gazları), geotermal alanlar, kömür yatakları, doğal gaz ve petrol çıkarma alanları ve orman yangınları sayılabilir. İnsan faaliyetine dayalı en önemli kaynak ulaşım olup bunu endüstriyel faaliyetler izler. Endüstriyel faaliyetler arasında solvent kullanımı ve rafineri ve petrokimya endüstrileri önem taşır [11].

Hidro karbonların 500 ppm e kadar insan sağığı üzerinde olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Bir hidro karbon çeşitli olan aldehitler ise göz yaşartıcı etkileri yanında üst solunum yolları ve ciltte tahrişe yol açabilmektedirler [11].

5.2 İçten Yanmalı Motor Emisyonları

İçten yanmalı motorlarda kirletici madde emisyonlarının kaynakları ve bu kaynaklardaki en önemli kirletici parametreler;

- Evaporatif emisyonlar: karter havalandırma ve benzin deposu (HC, PM)
- Egzoz emisyonları (CO, HC, NO_x, SO_x, PM, Pb)
- Diğ r (PM)

olarak üzere verilebilir [11]. Kirletici parametrelerin toplam emisyonlarının kaynaklar arasındaki yaklaşık dağılımı izelge 5.1 de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Benzin motorlarında kirleticilerin dağılımı [11]

Kaynaklar	Kirleticiler ve Dağılımları (%)			
	HC	CO	NO _x	PM
Ekzoz	62	100	100	90
Karter Havalandırması	20	-	-	10
Benzin Deposu	9	-	-	-
Karbüratör	9	-	-	-

İçten yanmalı motorlarda egzoz kirleticilerinin tipi ve miktarı çok sayıda faktöre bağıldır [11]. Bunlar motor özellikleri ve diğ r faktörler olmak üzere iki grupta incelenir.

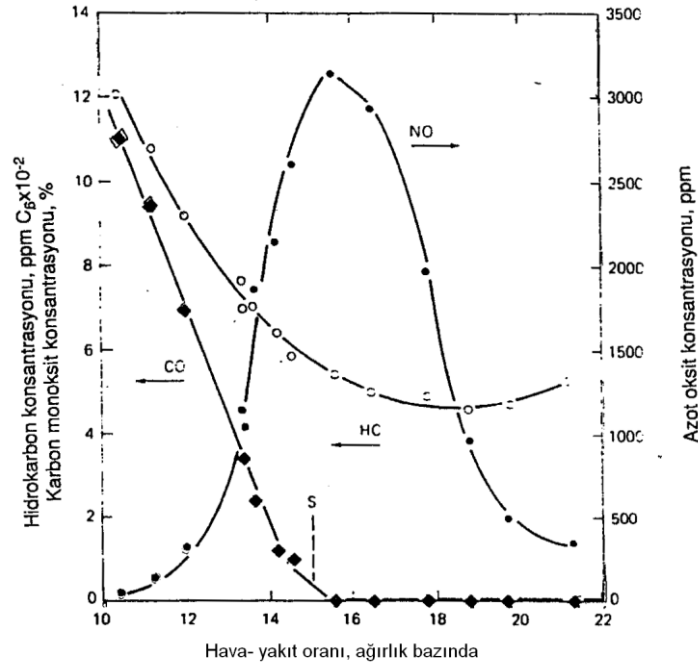
Motora ait özellikler:

1. Hava-yakıt oranı
2. Ateşleme zamanlaması
3. Basınç oranının ayarı
4. Yanma odası dizaynı
5. Motor hızı
6. Yakıt tipi (cinsi, oktan sayısı, uçucu madde oranı, katkı maddeleri)

Kirletici kaynaklar üzerinde etkili olan diğer faktörler ise,

1. Araç özellikleri: Motor yapısı, yaşı, kilometre miktarı, hızı, bakım durumu, sıcak/soğuk çalışma yüzdesi, ağırlığı
2. Tekerlek özellikleri
3. Meteorolojik özellikler: Hava sıcaklığı, basıncı, rutubet
4. Yol durumu: Cinsi, eğimi, yüzey kalitesi, kurbaların sayısı

Taşıt araçlarında kullanım modlarının farklı hava yakıt oranlarına tekabül ettikleri bilinmektedir [11]. Hava yakıt oranına bağlı olarak kirleticilerin değişimi Şekil 5.1 de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Benzinli motorlarda hava yakıt oranı ve kirleticilerin değişimi [11]

Hava-yakıt oranı taşıt hızının bir fonksiyonudur. Dolayısı ile ekzos emisyonları taşıt kullanım moduna bağlı olarak değişmektedir [11]. Değişim çizelge 5.2 de verilmiştir

Çizelge 5.2 : Taşıtların Kullanım Modları ve Kirletici Emisyonuna Etkileri [11]

Kullanım Modu	Kirletici Emisyonları		
	Karbonmonoksit	Hidrokarbonlar	Azot Oksitler
Rölanti	Yüksek	Yüksek	Çok Düşük
Hızlanma	Düşük	Düşük	Yüksek
Yavaşlama	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Düşük
Sabit Hız			
Yavaş	Düşük	Düşük	Düşük
Hızlı	Çok Düşük	Çok Düşük	Orta

Motor rölantide çalışırken, silindirde arta kalan yanma ürünlerini telafi etmek için zengin karışımlara ihtiyaç duyar. Bu nedenle rölantide CO emisyonu yükselir.

Yavaşlama evresinde silindirlerde yanmadan kalan yakıt yüksek hidrokarbon emisyonuna yol açmaktadır. Hava-yakıt oranı zenginleştikçe, CO emisyonu yükselmektedir ve rölanti ve yavaşlama modlarında maksimum değere ulaşmaktadır [11].

Karter havalandırması emisyonları, basınçlandırma ve güç çevrimleri esnasında silindir cidarları ile sekmanların arasından kaçan yanma gazları ve karterdeki yağ buharlarından oluşmaktadır. Bu tür emisyonlar motora giren hava miktarına bağlı olarak artmaktadır ki genellikle ağır yükleme durumlarında gerçekleşmektedir [11].

Evaporatif emisyonlar yakıt tankı ve karbüratörden oluşur. Yakıt tankı kayıpları, yakıt doldurulurken üst fazdaki buharlarla taşıtın kullanılması esnasında hava sıcaklığına bağlı olarak buharlaşan yakıtın depo kapağının aralıklarından dışarı atılmasından kaynaklanır. Evaporasyon kayıpları yakıt bileşimi ve sıcaklığa bağlıdır. Diğer taraftan yakıt tankının uzun süreli yüksek sıcaklığa maruz kalması da evaporatif kayıpları artırmaktadır [11].

Partiküler maddeler; karbon, metalik kül ve hidrokarbonların karışımından ibaret olup eksoz gazları ile atılırlar. Metalik partiküller benzin içindeki kurşun bileşiklerinden, yağlama yağı içindeki metalik katkılardan ve motor aşınmalarından kaynaklanır. Karbonlu ve hidrokarbon aerosolleri yakıtın tam yanmamasından, karter havalandırması kaçaklarının yanma hücresi içine girmesinden oluşmaktadır [11].

Eksoz gazlarındaki bir kısım PM ler, yanma esnasında oluşur ve eksoz sisteminde partiküler yapıya dönüşürler. Eksoz sisteminde biriken PM in bir kısmı gaz akımı ile dışarı atılırlar. Bu nedenle bir otomobilde oluşan PM emisyonları çok sayıda değişkene bağlıdır ve zamanla değişim gösterebilirler. Bu değişkenler, arabanın işletme modu, yaşı ve katettiği km miktarı ve yakıt tipi olarak verilebilir [11].

NO oluşumu yüksek sıcaklıklarda arttığı için NO önce silindir ortasındaki gaz karışımı içinde oluşur. Soğuk silindir cidarlarında, yani düşük hızlarda, kısmen düşük oluşuma sahiptir [11].

5.3 Dizel Motor Emisyonları

Dizel motorlarda hava ve yakıt silindir öncesinde karışmazlar. Hava, giriş subabından silindir içine alınır ve yüksek sıcaklıklara kadar sıkıştırılır ve içine yüksek basınçlı yakıt enjekte edilir. Pistonun üst pozisyonuna yakın konumunda sıkıştırma nedeniyle oluşan yüksek basınç ve sıcaklık sebebiyle karışım kendiliğinden ateşlenir. Ateşleme zamanı yakıt enjeksiyonuna bağlı olarak düzenlenir ve güç temini her bir çevrimde enjekte edilen yakıt miktarı ile kontrol edilir. Hava yakıt karışımı, kıvılcım ateşlemeli motorlara göre çok daha fakir özelliktedir. Dizel motorlarda, kirleticiler NO_x , PM (is), HC, CO ve SO_x olarak verilebilir [11].

Dizel motorlarda emisyonları azaltmaya yönelik düzenlemeler büyük ölçüde benzinli motordakilere benzemektedir. İs partikülleri için konverterler üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir [11].

5.4 Emisyonları Azaltma Çalışmaları

Trenin statik direnimi tren ağırlığı ile ilgili olup, azaltılması için çalışmalar sürmektedir. Seyir halindeki trenlerde yuvarlanma direnimi tekerleğin ray üzerinde dönmesi ve dingil ile yatak arasındaki sürtünme ile ilişkili olup, her ikisi de ağırlıkla, tren hızı ve dingil sayısı ile orantılıdır. Hız azaltılması uygun olmayıp, son yıllarda dingil sayısı azaltılmasına ilişkin çalışmalar vardır. Aerodinamik direnim, tren hızı, dizaynı ve boyutları ile ilgili olup, modern trenler en az direnim oluşturacak şekilde düzenlenmektedir. Bu direnimlerden birini bile azaltmak enerji tüketimini ve emisyonları azaltmaktadır. Tren ağırlığını azaltmak için tren yapımında daha az ve düşük yoğunluklu malzemeler kullanılmaya çalışılmaktadır [12].

Son gelişmeler, tren gövdesinde yüksek dayanımlı çelik kullanarak tren ağırlığının %15 azaltılabileceğini göstermiştir. Özellikle alüminyum kullanılması ile lokomotifin çekebileceği katar uzunluğu yani kapasite de artacaktır. Ayrıca hatların

elektriklendirilmesinin yaygınlaştırılması emisyonların azaltılmasında etkili olmaktadır [12]. Elektrikli ve dizelli trenlerde kWh'a düşen gram cinsinden emisyonlar ve gelecekte beklenen emisyon miktarları Çizelge 5.3 ve 5.4 de verilmektedir [13].

Çizelge 5.3 : Elektrikli Motor Emisyonu (g/kWh) [13]

	1998	2020
SO ₂	2,7	0,8
NO _x	1,2	0,35
HC	1,1	0,55
CO	0,08	0,04
PM	0,14	0,07

Çizelge 5.4 : Dizel Motor Emisyonu (g/kWh) [13]

	1998	2020
SO ₂	1,0	0,03
NO _x	12	3,5
HC	1,0	0,50
CO	4,0	0,50
PM	0,25	0,08

Üç tip içten yanmalı motor, motorlu araçlarda kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygını dört zamanlı, orta basınçlı, kıvılcım ateşlemeli ve öncelikle taksi ve hafif yük araçlarında kullanılan benzinli (Otto motor) tipidir. İkinci en yaygın tip, dört veya iki zamanlı, basınçlı ateşlemeli, içten yanmalı motorlardır ki dizel motorlar olarak tanınırlar. Bu tür motorlar büyük kamyonlarda, otobüslerde, lokomotif ve gemilerde kullanılırlar. Sonuncusu ise uçaklardaki gaz türbinleridir [11].

Normal benzinli (otto) motorlardan yakıt-hava karışımı karbüratörde hazırlanırken enjeksiyon tiplerinde yakıt silindir içine hava ile orantılı olacak şekilde püskürtülür.

Sonuç itibariyle karışım hava-yakıt oranı ile karakterize edilir. Birim yakıt ağırlığı başına havanın ağırlığı olarak tanımlanır. Bu oranın alt ve üst limitleri 9-20 olarak sınırlanmış olup bunun dışındaki oranlar genellikle yanıcı değildir. Maksimum güç, minimum yakıt tüketimine göre düşük hava-yakıt oranlı konumlarda elde edilir. Düşük hava yakıt oranlı karışımlara zengin, yüksek oranlılara ise zayıf karışımlar adı verilir [11].

Hızlanma esnasında güç talebi nedeniyle, normal seyir haline göre daha zengin karışımlara gerek duyulur. Dolayısı ile hava-yakıt oranı kirleticilerin tipleri ve miktarlarının belirlenmesinde etkilidir [11].

6. DEMİRYOLU EMİSYONLARININ HESABI

Demiryolu ulaşımının neden olduğu emisyon miktarı, hareketlilik sayısı ve hareketliliğe düşen birim emisyon faktörüne göre belirlenir **(6.1)**:

$$E=A \times e \quad (6.1)$$

E: Toplam emisyon, A: Hareketlilik sayısı, e: Harekete düşen birim emisyon faktörü.

Demiryolu trafiği ve yoğunluğu bölgeden bölgeye farklılık gösterir. Örneğin, her Avrupa ülkesi kendi ulusal demiryolu sistemine, özel veya devlet sermayeli demiryolu hatlarına sahiptir ve bu sistemlerin her birinde farklı uygulamalar görülebilir. Yolcu trafiği düşük hızlı, sayıca fazla durağa sahip banliyö tren hatlarında ve daha yüksek hız uygulamalı, sayıca daha az durağa sahip, şehirlerarası hatlarda farklılık gösterir. Trenler ayrıca yük taşımak için kullanıldıklarından bu farklılıklar yük trafiği için de geçerli olmaktadır. Yurt içi yük trafiği ile uluslararası yük trafiği birbirlerinden farklılık göstermektedir. Raylı sistemlerde amaç koltuk başına veya ton başına düşen ölü ağırlıkları azaltarak, enerji tüketimini ve buna bağlı olarak emisyonları azaltmaktır. Yolcu trenlerine ait trafik verileri tren istasyonlarındaki sefer tarifelerinden temin edilebilmekle beraber, hareket zamanları daha az kesinlik içeren yük trenleri için bu verilere erişmek, dolayısıyla emisyon miktarlarını belirlemek daha zor olmaktadır [13].

Bir başka problem de, Avrupa'daki demiryolu hatlarının büyük bir çoğunluğunda elektrikle çalışan lokomotifler kullanılmasıdır. Bu durumda oluşacak emisyon miktarını ölçmek için her ülkenin elektrik dağıtım özelliklerinin ve üretim kaynaklarının ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Ayrıca elektriğin nükleer santrallerde

üretilmesi, ana enerji kaynağının bir defadan fazla kullanılması, emisyon miktarlarının belirlenmesini zorlaştırmaktadır [13].

Bu durumda demiryollarında karşılaşılan emisyon miktarlarının tek bir ülke için ölçümünde bile çok fazla veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ölçümler daha fazla ülke için yapılmaya çalışıldığında, hem bu sebepten, hem de her ülkenin dilinin ve kullandıkları ölçüm birimlerinin farklı olmasından dolayı, çok daha zorlaşmaktadır. Bundan dolayı, ölçümlerin daha rahat yapılabilmesi için araştırma yapılacak tüm ülkelerin emisyon ve yakıt tüketimi verilerinin ortak bir dilde ve sistemde verilmesi gerekmektedir [13].

Demiryolundan kaynaklanan emisyonlar konusu yeni olduğundan bu konuda yapılan hesaplamalar oldukça sınırlıdır. Daha önce kullanılan hesaplamalardan daha iyi bir hesaplama modeli için emisyon faktörü belirlenir. Bu modeli geliştirmek için, hatta uygulanan hız ve durak sayısı bilgileri de dikkate alınacak şekilde çalışmalar yapılmaktadır [13,14].

6.1 Emisyon Hesaplama Yöntemleri

Eldeki verilere göre farklı hesap yöntemleri uygulanabilmektedir.

6.1.1 Toplam dizel yakıt/enerji tüketimi biliniyorsa

Dizel lokomotifler için toplam emisyon miktarı, toplam yakıt tüketimi ile birim emisyon faktörünün çarpılması ile bulunur **(6.2)**:

$$E_{em} = F \times e_d \quad (6.2)$$

E_{em} : Toplam emisyon

F : Harcanan toplam yakıt

e_d : Birim emisyon faktörü (birimi g/kg alınabilir).

Elektrikli lokomotifler için emisyonlar, elektrik enerjisi üretimi sırasında meydana gelen emisyonlardır [13]. Trenlerin elektrik tüketiminin bilindiği durumlarda, santrallere ait elektriğin özel emisyon faktöründen toplam emisyon değeri hesaplanabilir (6.3):

$$E = E_t \times e_e \quad (6.3)$$

E: Toplam emisyon

E_t : Trenin harcadığı toplam elektrik enerjisi

e_e : Elektriğin özel emisyon faktörü

Elektrik emisyonunu ölçerken, kullanılan elektriğin özel emisyon faktörünün elektrik santralinde üretilen enerjiye mi, demiryolu hattına gelen enerjiye mi ait olduğu bilinmelidir. Veriler elektrik santraline aitse, demiryolu hattına enerjinin bir kayıpla geleceği dikkate alınmalı, azaltma faktörü uygulanmalıdır. Ayrıca hesaplamalarda kullanılacak emisyon değerlerinin birincil enerjiye mi yoksa ikincil enerjiye mi ait değerler olduğu kesinlikle göz önünde bulundurulmalıdır [13].

Birincil enerji aşamasında harcanan yakıt enerjisi, %100 verimle elektrik enerjisine dönüştürülemeyeceği için santrallerin verimlilik oranı bilinmelidir. Emisyon faktörleri bu verimlilik oranına bölünerek hesaplamalar yapılmalıdır. Bahsedilen uygulamalar her çeşit hat için geçerlidir [13].

6.1.2 Toplam dizel yakıt/enerji tüketimi bilinmiyorsa

Emisyon hesaplamaları belirli bir bölge ya da belirli bir tren modeli için yapılacaksa, toplam yakıt ve enerji tüketimi bilinmemeyebilir. Aynı durum gelecek için tahminler yürütürken de geçerlidir. Bu durumda farklı bir hesaplama yöntemi uygulanır [13].

Genellikle trenlerin hareketi yolcu taşımacılığı için yolcu-km ve yük taşımacılığı için ton-km birimi ile ifade edilir ve bu değerler demiryollarının istatistiki raporlarından

veya faaliyet raporlarından elde edilebilir. Hesaplama prosedüründeki ilk adım kullanılacak tren modelinin ton-km başına tükettiği enerji miktarının (kJ) hesaplanmasıdır. Bu enerji, trenin cinsinden ve hangi tür yakıt kullandığından bağımsız, trenin sadece hareket etmesini sağlayan enerjidir. Oluşan emisyonlardaki farklılıklar dizel ve elektrik için emisyon faktörlerinin farklı olmasından kaynaklanır [14].

Bu durumda, hesaplamalar yolcu ya da yük taşımacılığı için Bağntı (6.4) ve (6.5) ile ayrı ayrı yapılır.

Yolcu taşımacılığı için:

$$E_1 = W_{e_1} \times (P - km / P_{ps}) \times W \times B_{f_1} \times 0,0036 \quad (6.4)$$

E_1 : Hava kirliliğine neden olan toplam emisyon

W_{e_1} : Trenin (kJ/ton-km) cinsinden enerji tüketim değeri

P-km: İlgili trenin (yolcu-km) değeri

B_{f_1} : Enerji üretiminde spesifik emisyon faktörü (gr/kWh)

P_{ps} : Trenin yükleme faktörü (yolcu sayısı/oturma yeri)

W: Trenin koltuk başına düşen (ton) ağırlığı

Yük taşımacılığı için:

$$E_2 = W_{e_2} \times (T - km / T_{pt}) \times B_{f_2} \times 0,0036 \quad (6.5)$$

E_2 : Hava kirliliğine neden olan toplam emisyon

W_{e_2} : Trenin (kJ/ton-km) cinsinden enerji tüketim değeri

T-km: İlgili trenin (ton-km) değeri

B_{f_2} : Enerji üretiminde spesifik emisyon faktörü (gr/kWh)

T_p : Trenin yükleme faktörü yük tonajı/toplam tren tonajı

Hareketlilik trafik verilerinden alınır. Ülke düzeyinde yolcu ve yük trafiği için elektrifikasyon oranı, ağ uzunluğu, demiryolu hat tipi gibi parametreler mevcuttur. Hesaplamalarda tren ağırlığının, enerji tüketimi ve emisyon oluşumu açısından en önemli parametre olmasından dolayı, doğru alınması son derece önemlidir [13].

6.2 Enerji Tüketimini Belirleme

Demiryolunda kullanılması gerekli enerji belirlenirken 3 farklı tip yol izlenebilmekte olup, bunlar aşağıda sırası ile verilmektedir [13].

6.2.1 Yöntem- 1

Yolculuk sırasında oluşan toplam direnimin hat uzunluğu ile çarpılmasıyla trenin toplam enerji tüketimine ulaşılabilir, bağıntı (6.6):

$$E = R \times M \times L_{\text{hat}} \quad (6.6)$$

E: Toplam enerji (kg.km), R: Toplam direnim (kg/ton), M: Taşıt tonajı (ton),

L_{hat} : Hattın uzunluğu (km)

Toplam direnim, (4.1) bağıntısındaki gibi alınır. Yüksek hızlı demiryollarında yüksek eğimler ve düşük kurp yarıçapları kullanılmadığından dolayı bu direnim değerleri ihmal edilmektedir. Ayrıca tünel ve demeraj direnimleri de doğru ve düzlük direnimi yanında çok düşük mertebelerde kaldığından dolayı direnim hesabında sadece doğru ve düzlük direnimi kullanılmaktadır.

6.2.2 Yöntem- 2

Enerji tüketiminin hesaplanmasında ortalama hız da önemli bir yol oynar. Demiryolu trafiği için hız, istasyon aralıkları ve durma aralıkları büyüdükçe artmaktadır. Trenlerin enerji tüketimini belirlemek için (kJ/ton-km) ortalama hıza ve istasyon aralıklarına bağlı ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Bunlarla çok yaklaşık olarak enerji tüketimi tahmin edilebilir [13,14].

6.2.2.1 Alman Demiryolları'na ait ICE 1 tipi tren için yapılan çalışmalar:

ICE için:Ampirik bağıntının elde edileceği çalışmalar Hamburg Münih arasındaki yüksek hızlı tren hattı esas alınarak yapılmıştır. Hesaplamalarda toplam enerji tüketimine potansiyel enerji de dahildir. Fakat yine de güzergah boyunca uğranılan durakların kotları verilmiştir [13].

Çizelge 6.1 : Hamburg Münih Arasında İstasyon Kotları [13]

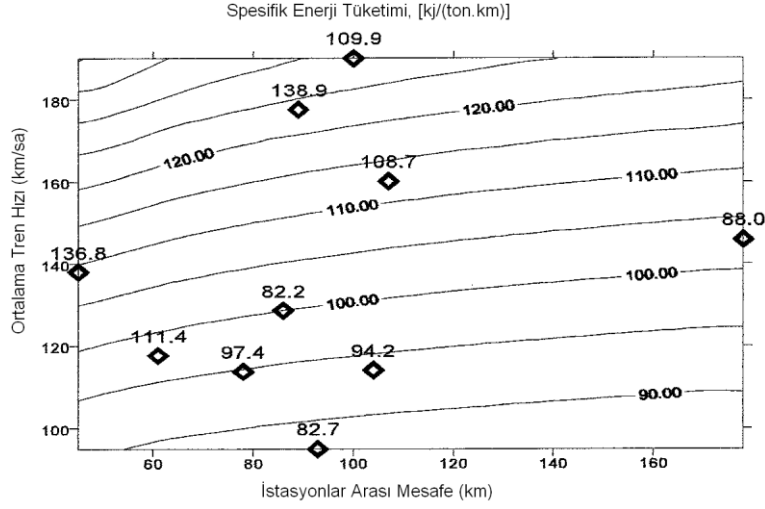
Şehir	Şehir Merkezi Kotları
Hamburg	6 m
Hannover	55 m
Göttingen	150 m
Kassel Wilhelmhöhe	189 m
Fulda	257 m
Frankfurt am Main	98 m
Mannheim	97 m
Stuttgart	245 m
Ulm	478 m
Augsburg	494 m
München	518 m
Würzburg	182 m

Hamburg Münih hattı boyunca ölçümler 852.2 ton ağırlığındaki ICE 1 tipi tren için 1991 yılında gerçekleştirilmiş olup, çizelge 6.2 de istasyonlar arasındaki bilgiler verilmiştir.

Çizelge 6.2 : İstasyonlar arasındaki özellikler ve enerji [13]

	Mesafe	Süre	Ortalama Hız	Enerji	Km Başına Enerji	Değişim Miktarı
	km	saat	km/sa	kWh	kWh/km	kWh/km
Hamburg-Hannover	178	1,22	146,3	3709	20,84	0,64
Hannover-Göttingen	100	0,525	190,5	2602	26,02	2,56
Göttingen-Kassel-Wilhelmshöhe	45	0,325	138,5	1457	32,38	2,57
Kassel Wilhelmshöhe-Fulda	89	0,5	178,0	2926	32,88	1,97
Fulda-Frankfurt/Main	104	0,908	114,5	2318	22,29	-3,34
Frankfurt/Main-Mannheim	78	0,683	114,1	1798	23,05	0,0
Mannheim-Stuttgart	107	0,667	160,5	2753	25,73	5,83
Stuttgart-Ulm	93	0,975	95,4	1821	19,58	6,45
Ulm-Augsburg	86	0,667	129,0	1674	19,46	0,26
Augsburg-München	61	0,517	118,1	1608	26,36	0,76
Toplam	941			22666	24,09	

Şekil 6.1 de duraklar arası mesafeler ve ortalama hızlar esas alınarak hesaplanan özgül enerji tüketiminin kJ/ton-km cinsinden değerleri verilmiştir.



Şekil 6.1 : Durak aralığı ve ortalama hıza göre enerji tüketimleri [13]

Değerlere geçki boyunca potansiyel enerji değişimleri de dahildir. Grafikteki değerlere uyularak ICE 1 tipi yüksek hızlı trenin enerji tüketim bağıntısı (6.7) aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\frac{\text{kJ}}{\text{ton} \times \text{km}} = 0,0070 \frac{V_{\text{ort}}^2}{\ln(x)} + 74 \quad 80 \leq x \leq 200 \text{ km} \quad (6.7)$$

V_{ort} : Geçkideki ortalama hız (km/sa)

x : istasyonlar arası mesafe (km)

Trenlerin ivmelenmesi durumunda yüksek miktarda enerji harcanmaktadır. Bundan dolayı istasyonlar arası mesafe kısaldıkça trene daha fazla enerji gerekecektir [12]. Benzer çalışma farklı Avrupa ülkelerinde de yapılmıştır. Elde edilen amprik bağıntılar çizelge 6.3 de verilmektedir:

Çizelge 6.3 : Farklı ülkelerde kullanılan bağıntılar [13]

TGV Trenleri (Fransa)	$\frac{kJ}{\text{ton} \times \text{km}} = 0,0097 \frac{V_{\text{ort}}^2}{\ln(x)} + 70,$ $150 \leq x \leq 300 \text{ km}$
HST Yolcu Trenleri (İngiltere) IC3 Trenleri (Danimarka)	$\frac{kJ}{\text{ton} \times \text{km}} = 0,012 \frac{V_{\text{ort}}^2}{\ln(x)} + 70, \quad 40 \leq x \leq 100 \text{ km}$
Geniş Yük Trenleri (boş ağırlığı 600 ton)	$\frac{kJ}{\text{ton} \times \text{km}} = 0,019 \frac{V_{\text{ort}}^2}{\ln(x)} + 63, \quad 80 \leq x \leq 200 \text{ km}$
RC Trenleri (İsveç)	$\frac{kJ}{\text{ton} \times \text{km}} = 0,015 \frac{V_{\text{ort}}^2}{\ln(x)} + 81, \quad 30 \leq x \leq 800 \text{ km}$

6.2.3 Yöntem- 3

Enerji tüketimini hesaplamak için kullanılabilecek başka bir yöntem de tren direnimlerini ve hatta ait ortalama hız ve istasyon sayılarını esas almaktadır. Enerji tüketiminin belirlenmesinde yük ile birlikte istasyonlar arası kot farkları da dikkate alınmaktadır. Trafikteki emisyonlarını tahmin edebilmek için tüketilen enerji miktarı hatta kullanılan ortalama ve maksimum hıza göre belirlenir [13].

Direnimler de yine çeşitli tren modelleri için belirlenen katsayılara göre belirlenebilir (Çizelge 6.4). Tüm bu verilerin dahil edildiği bağıntı (6.8) ve (6.9) daki gibidir.

$$E = \frac{1}{L_{\text{hat}}} \int_0^L (a + B_0 + B_1 \times v + B_2 \times v^2) dl + g \times \frac{\Delta h}{L_{\text{hat}}} \quad (6.8)$$

$$E \cong \frac{(N_{\text{ist}} + 1)}{L} \times \frac{v_{\text{maks}}^2}{2} + B_0 + B_1 \times v_{\text{ort}} + B_2 \times v_{\text{ort}}^2 + g \times \frac{\Delta h}{L_{\text{hat}}} \quad (6.9)$$

a: İvme (m/sn^2)

B_0, B_1, B_2 : Direnim hesabı için amprik katsayılar

L_{hat} : Hat uzunluğu (km), N_{ist} : Geçki üzerindeki ara istasyon sayısı

v_{maks} : Maksimum hız (m/sn), v_{ort} : Ortalama hız (m/sn)

Δh : Güzergah başı ile sonu arasındaki kot farkı (m)

Çizelge 6.4 : Tren Tipi ve Katsayılar [13]

Tren Tipi	B_0	B_1	B_2
İngiliz APT	16,6	$36,6 \times 10^{-2}$	$26,0 \times 10^{-3}$
Eski İngiliz	15,5	$29,2 \times 10^{-2}$	$57,4 \times 10^{-3}$
Yük Treni	24,7	0	$84,5 \times 10^{-3}$
IC3 (Danimarka) tekli set	19,7	0	$42,5 \times 10^{-3}$
IC3 (Danimarka) çoklu set	19,7	0	$24,0 \times 10^{-3}$
Alman IC-BR103 Lok.	16	0	$22,5 \times 10^{-3}$

Bu bağıntı genelde maksimum hızın yaklaşık olarak geçki genelinde uygulandığı durumlarda geçerlidir. Eğer buradaki değişkenlerde belirgin değişiklikler meydana geliyorsa güzergahın her değişik bölümü için bu bağıntı ayrı ayrı uygulanmalıdır. Buna örnek olarak yüksek hızlı bir trenin güzergahın belli bir bölümünde hızını oldukça düşürmesi gerektiği bir durum düşünülebilir. Bu metod için enerji tüketimi taşınan yük miktarına dayanır. Birçok tren için yükleme karakteristikleri benzerdir. Örnek olarak yük trenleri için yük-km baz alınarak enerji tüketimi verilir [13,14].

Birçok yolcu treni ise yük trenlerinin yaklaşık 3 katı bir enerji tüketimine sahiptirler. Bu metod özellikle sık istasyonlu hatlarda çalışan trenlerin enerji tüketimini hesaplamada güvenilir sonuçlar vermektedir. Burada en büyük sıkıntı ivmelenme sayısının belirlenmesidir. Çünkü bu değer yalnızca istasyon sayısına bağlı değildir. Bu bağıntıdaki ilk ifade ivmelenmenin enerji tüketimini olduğundan az vermektedir [14].

6.3 Enerji ve Emisyon Hesabı

Emisyon miktarlarının hesabı için örnek olarak Almanya'daki ICE (Intercity Express) yüksek hızlı trenlerinin çalıştığı Hannover- Würzburg arasındaki hat kullanılacaktır. Tren modeli ICE-1 olup, tren seti bir lokomotif ve 13 vagon oluşmaktadır. Alman Demiryolları'na ait, tren ağırlığını hesaplamakta kullanılan genel formül; $\text{ton} = 54 \times (\text{vagon sayısı}) + 150,2$ şeklindedir. Buna göre tren ağırlığı: $54 \times 13 + 150,2 = 852,2$ ton olmaktadır. Hatta ait diğer bilgiler çizelge 6.5 de verilmiştir [13].

Çizelge 6.5 : Hannover- Würzburg hattına ait bilgiler [13]

Hat Uzunluğu (km)	Ara Durak Sayısı	Ort. Duraklar Arası Mesafe (km)	Ort. Hız (km/sa)	Maks. Hız (km/sa)
361	4	90,25	191,0	280

6.3.1 Enerji tüketimini belirleme

6.3.1.1 Yöntem- 1'e göre

Bölüm 4 de verilen demiryolu direnim hesabında kullanılan $R = A + B \times V + C \times V^2$

(4.1) bağıntısına göre trenin direnimleri hesaplanır:

ICE-1 için: 1 çekici + 13 vagon, Tren uzunluğu: 350 m

V: 191 km/sa, Araç ağırlığı: 852,2 ton, Dingil yükü, m:18 ton

$$R = A + B \times V + C \times V^2 \text{ (daN)} \quad (1 \text{ daN}=1 \text{ kg})$$

$$A = \lambda \times M \times \sqrt{\frac{10}{m}}, \quad 0,9 < \lambda < 1,5, \quad (\lambda = 1,5 \text{ alınacaktır})$$

$$B.V = 0,01 \times M \times V$$

$$C \times V^2 = k_1 \times S \times V^2 + k_2 \times P \times L \times V^2, \quad S \cong 10 \text{ m}^2, \quad P \cong 10 \text{ m}, \quad k_1 = 9 \times 10^{-4},$$

$$k_2 = 20 \times 10^{-6}$$

$$A = 1,5 \times 852,2 \times \sqrt{\frac{10}{18}} = 952,789 \text{ kg} = 9,528 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow 952,789 / 852,2 = 1,118 \text{ kg / ton}$$

$$B.V = 0,01 \times 852,2 \times 191 = 1627,70 \text{ kg} = 16,27 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow 1627,70 / 852,2 = 1,91 \text{ kg / ton}$$

$$\begin{aligned} C \times V^2 &= 9 \times 10^{-4} \times 10 \times 191^2 + 20 \times 10^{-6} \times 10 \times 350 \times 191^2 \\ &= 328,329 + 2553,670 \\ &= 2881,999 \text{ kg} = 28,820 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 2881,999 / 852,2 = 3,382 \text{ kg / ton}$$

$$R = 1,118 + 1,910 + 3,382 = 6,410 \text{ kg/ton}$$

$$E = R \times M \times L_{\text{hat}}$$

E: Toplam enerji (kg.km), R: Toplam direnim (kg/ton), M: Taşıt tonajı (ton)

L_{hat} : Hattın uzunluğu (km), $E = 6,410 \times 852,2 \times 361 = 1971999,322 \text{ kg-km}$

$$1 \text{ kWh} = 367 \text{ kg} \times \text{km}, 1 \text{ kJ} = 0,00028 \text{ kWh}$$

Buradan hatta tüketilen kWh cinsinden toplam enerji miktarı;

$$E = 5373,295 \text{ kWh} = 62,378 \text{ kJ/ton-km} \text{ olmaktadır.}$$

6.3.1.2 Yöntem- 2' ye göre

ICE trenleri için yapılan çalışmalara göre enerji tüketimi (6.10) bağıntısı ile de bulunabilir.

$$\frac{\text{kJ}}{\text{ton} \times \text{km}} = 0,0070 \frac{V_{\text{ort}}^2}{\ln(x)} + 74 \quad (6.10)$$

V_{ort} : Geçkideki ortalama hız (km/sa)

x : istasyonlar arası mesafe (km)

Bu durumda, veriler kullanılarak elde edilen enerji;

$$\begin{aligned} \frac{\text{kJ}}{\text{ton} \times \text{km}} &= 0,0070 \frac{191^2}{\ln(90,25)} + 74 \\ &= 130,716 \text{ kJ/ton} \times \text{km} \text{ olmaktadır.} \end{aligned}$$

6.3.1.3 Yöntem- 3'e göre

$$E \cong \frac{(N_{\text{ist}} + 1)}{L_{\text{hat}}} \times \frac{v_{\text{maks}}^2}{2} + B_0 + B_1 \times v_{\text{ort}} + B_2 \times v_{\text{ort}}^2 + g \times \frac{\Delta h}{L_{\text{hat}}}$$

$$L_{\text{hat}}: 361 \text{ km}, N_{\text{ist}}: 4, v_{\text{maks}}: 77,78 \text{ m/sn}, v_{\text{ort}}: 53,06 \text{ m/sn}, \Delta h: 182-55= 127 \text{ m}$$

Tablodan Alman IC-BR103 Lokomotifi için verilen B_0, B_1, B_2 değerleri de kullanılarak toplam enerji;

$$E \cong \frac{(4+1)}{361} \times \frac{77,78^2}{2} + 16 + 0 \times 53,06 + 22,5 \times 10^{-3} \times 53,06^2 + 9,81 \times \frac{127}{361}$$

$$\cong 124,693 \text{ kJ/ton-km} = 10741,102 \text{ kWh}$$

6.3.2 Emisyonların hesaplanması

Emisyonların hesabı için Çizelge 6.6 ve 6.7 ‘den yararlanılmıştır.

Çizelge 6.6 : Almanya’ya ait $16\frac{2}{3}$ Hz in elektrikli trenler için emisyonları [13]

Yakıt/Enerji Türü	Kullanım Yüzdesi	CO ₂	CO	HC	NO _x	SO ₂
1992	%	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Hidroenerji	13,0	0	0,000	0,000	0,000	0,000
Nükleer Enerji	31,8	0	0,000	0,000	0,000	0,000
Kömür	38,0	991	0,201	0,031	1,178	1,759
Fuel- Oil	3,3	752	0,096	0,067	1,553	3,969
Doğal Gaz	4,3	547	0,010	0,049	1,386	0,000
Hava Gazı	9,6	951	0,895	0,050	0,702	0,010
Diğer	0,0	-	-	-	-	-
Toplam	100,0					

Çizelge 6.7 : Almanya’ya ait $16\frac{2}{3}$ Hz elektriğin üretim aşamasındaki verimliği [13]

Yakıt/Enerji Türü	İkincil Enerji	Birincil Enerji	Verimlilik η_{el} .	Kullanım Yüzdesi
1992	GWh	GWh	%	%
Hidroenerji	917,8	2311,1	39,7	13,0
Nükleer Enerji	2245,5	5925,4	37,9	31,8
Kömür	2684,3	7735,2	34,7	38,0
Fuel- Oil	234,1	621,7	37,7	3,3
Doğal Gaz	305,3	833,4	36,6	4,3
Hava Gazı	678,1	1873,5	36,2	9,6
Diğer	0,0	0,0	-	0,0
Toplam	7065,2	19300	36,6	100,0

Buna göre toplam emisyon miktarına elektrik üretiminde kullanılan her çeşit enerji ve yakıt türünün kullanım yüzdelerine göre ulaşılabilir. Santrallerde elektrik enerjisi; elektrik üretimi için kullanılacak enerji ve yakıt türlerinin sahip olduğu enerjinin (birincil enerji), enerji dönüşüm yöntemleriyle ikincil enerjiye (elektrik enerjisi) dönüştürülmesi sonucunda elde edilir. Elde edilen elektrik enerjisi, demiryolu hatlarına elektrik iletimi esnasında oluşan kayıplardan dolayı üretildiği miktarda ulaşamaz. Örneğin Almanya’da iletim ağında oluşan kayıplar üretilen toplam elektrik enerjisinin %7 si kadardır [13].

Ayrıca elektrik enerjisi katenerden trenin pantografına ulaşırken de kayıplar olacaktır. Bu durumda elektrikli trenlerin net enerji tüketimine birincil enerji yerine ikincil enerji ve bu kayıplar göz önünde bulundurularak ulaşılır. Trenin hareketi sonucu oluşacak emisyon miktarlarını hesaplarken de net enerji dikkate alınmalı, birincil enerji için verilmiş emisyon faktörleri, ikincil enerji değerlerine dönüştürmek için santral verimlilik yüzdeleri ile, iletim kayıplarını düşmek için de enerjinin net iletim yüzdeleri ile çarpılmalıdır [13].

Bu tez kapsamında incelenmek istenen elektrikli demiryolu araçlarının sebep olduğu tüm zararlı madde emisyonu olduğundan, emisyon faktörleri birincil enerji cinsinden hesaplanacak, kayıplar göz önünde bulundurulmayacaktır. Bu durumda emisyon hesabı yapılırken emisyon faktörleri santral kullanım yüzdeleri ile çarpılacak ve toplamaları alınacaktır. Bu hesaplama her zararlı madde çeşidi için yapılacaktır.

Bu durumda kömürden dolayı oluşan emisyon faktörleri:

$$\text{CO}_2 : \quad E_{\text{kömür}} = 991 \text{ gr / kWh} \times \frac{38}{100} = 376,58 \text{ gr / kWh}$$

$$\text{CO} : \quad E_{\text{kömür}} = 0,201 \text{ gr / kWh} \times \frac{38}{100} = 0,076 \text{ gr / kWh}$$

$$\text{HC} : \quad E_{\text{kömür}} = 0,031 \text{ gr / kWh} \times \frac{38}{100} = 0,012 \text{ gr / kWh}$$

$$\text{NO}_x : \quad E_{\text{kömür}} = 1,178 \text{ gr / kWh} \times \frac{38}{100} = 0,448 \text{ gr / kWh}$$

$$\text{SO}_2 : \quad E_{\text{kömür}} = 1,759 \text{ gr / kWh} \times \frac{38}{100} = 0,668 \text{ gr / kWh}$$

Almanya’da elektrik üretiminde kullanılan her çeşit enerji ve yakıt türünün sebep olduğu emisyonlara ait özel emisyon faktörleri toplamı aşağıdaki Çizelge 6.8 ‘de verilmiştir.

Çizelge 6.8 : Almanya'ya Ait Özel Emisyon Faktörleri

Zararlı Madde	Hidroenerji	Nükleer Enerji	Kömür	Fuel-Oil	Doğal Gaz	Hava Gazı	Toplam
CO ₂ (gr/kWh)	0	0	376,58	24,816	23,521	91,296	516,213
CO (gr/kWh)	0	0	0,076	0,003	0,0004	0,086	0,165
HC (gr/kWh)	0	0	0,012	0,002	0,002	0,005	0,021
NO _x (gr/kWh)	0	0	0,448	0,051	0,060	0,067	0,626
SO ₂ (gr/kWh)	0	0	0,668	0,131	0	0,001	0,800

Buna göre toplam emisyon harcanan toplam elektrik enerjisinin özel emisyon faktörleri ile çarpılmasıyla bulunabilir, **(6.11)**. Hesaplanan toplam elektrik enerjisi 10741,102 kWh olduğuna göre her maddenin yaydığı emisyon miktarı çizelge 6.9 daki gibi hesaplanır.

$$E_{em} = E_t \times e_e \quad (6.11)$$

E_{em} : Toplam emisyon, E_t :Trenin harcadığı toplam elektrik, e_e :Elektriğin özel emisyon faktörü

Çizelge 6.9 : Emisyon Miktarları

Zararlı Madde	Toplam Emisyon Miktarı (kg)
CO ₂	10741,102 kWh x 0,516 = 5542,409 kg
CO	10741,102 kWh x 1,65 x 10 ⁻⁴ = 1,772 kg
HC	10741,102 kWh x 2,1 x 10 ⁻⁵ = 0,226 kg
NO _x	10741,102 kWh x 6,26 x 10 ⁻⁴ = 6,724 kg
SO ₂	10741,102 kWh x 8 x 10 ⁻⁴ = 8,593 kg

6.3.3 Eskişehir-Ankara yüksek hızlı demiryolu hattı için inceleme

Eskişehir Ankara arasını bağlayan yüksek hızlı tren hattı 205 km uzunluğunda olup, hat boyunca 3 adet istasyon bulunmaktadır. Yolcu trenleri elektrikli, yük trenleri ise dizel çekimlidir [15]. Çizelge 6.10 hatta işletilmesi planlanan trenlere ait maksimum hız, uzunluk, katar adedi ve ağırlık bilgilerini vermektedir.

Çizelge 6.10 : Hatta İşletilmesi Planlanan Trenler [15]

Tren Tipi	Maks. Hız (km/sa)	Uzunluk (m)	Katar Adedi	Ağırlık (ton)
Süper-Ekspres	200	200	4	300
Ekspres-1	200	300	8	500
Ekspres-2	200	400	1	750
Yük Treni (Hızlı)	100	700	5	1100
Yük Treni (Yavaş)	80	700	1	1500

Bahsi geçen yük trenlerinin, ilk etapta hatta kullanılması düşünülmüş, fakat sonradan mevcut Eskişehir- Ankara hattında işletilmelerine karar verilmiştir. Bu çalışma kapsamında yük trenleri, dizelli çekim sonucu oluşan emisyon miktarını görmek ve elektrikli çekim ile kıyaslama yapabilmek için incelenecektir.

6.3.3.1 Yöntem- 1' e göre:

Bölüm 4 de verilen demiryolu direnim hesabında kullanılan $R = A + B \times V + C \times V^2$

(4.1) bağıntısına göre tren direnimleri hesaplanır:

Ekspres-1 için:

Tren uzunluğu: 300 m

V: 100 km/sa

Araç ağırlığı: 500 ton

Dingil yükü, m: 18 ton

$R = A + B \times V + C \times V^2$ (daN) (1 daN=1 kg)

$$A = \lambda \times M \times \sqrt{\frac{10}{m}}, \quad 0,9 < \lambda < 1,5, \quad (\lambda = 1,5 \text{ alınacaktır})$$

$$A = 1,5 \times 500 \times \sqrt{\frac{10}{18}} = 559,017 \text{ kg} = 5,590 \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad 559,017 / 500 = 1,118 \text{ kg / ton}$$

$$B \times V = 0,01 \times M \times V$$

$$B \times V = 0,01 \times 500 \times 100 = 500 \text{ kg} = 5,00 \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad 500 / 500 = 1 \text{ kg / ton}$$

$$C \times V^2 = k_1 \times S \times V^2 + k_2 \times P \times L \times V^2, \quad S \cong 10 \text{ m}^2, \quad P \cong 10 \text{ m}, \quad k_1 = 9 \times 10^{-4},$$

$$k_2 = 20 \times 10^{-6}$$

$$\begin{aligned}
C \times V^2 &= 9 \times 10^{-4} \times 10 \times 100^2 + 20 \times 10^{-6} \times 10 \times 300 \times 100^2 \\
&= 90 + 600 \quad \Rightarrow 690 / 500 = 1,380 \text{ kg / ton} \\
&= 690 \text{ kg} = 6,90 \text{ kN}
\end{aligned}$$

$$R = 1,118 + 1 + 1,380 = 3,498 \text{ kg/ton}$$

$$E = R \times M \times L_{\text{hat}}$$

E: Toplam enerji (kg.km), R: Toplam direnim (kg/ton), M: Taşıt tonajı (ton),

L_{hat} : Hattın uzunluğu (km)

$$E = 3,498 \times 500 \times 205 = 358545 \text{ kg} \times \text{km}$$

$$1 \text{ kWh} = 367 \text{ kg} \times \text{km}, 1 \text{ kJ} = 0,00028 \text{ kWh}$$

Buradan hatta tüketilen kWh cinsinden toplam enerji miktarı;

$$E = 976,962 \text{ kWh} = 34,040 \text{ kJ/ton-km olarak bulunur.}$$

6.3.3.2 Yöntem- 3' e göre

$$E \cong \frac{(N_{\text{ist}} + 1)}{L_{\text{hat}}} \times \frac{v_{\text{maks}}^2}{2} + B_0 + B_1 \times v_{\text{ort}} + B_2 \times v_{\text{ort}}^2 + g \times \frac{\Delta h}{L_{\text{hat}}}$$

L_{hat} : 205 km, $\Delta h_{\text{Eskişehir}}$: 793m , Δh_{Ankara} : 856m , N_{ist} : 1, v_{maks} : 55,56 m/sn, v_{ort} : 27,78 m/sndir.

Çizelge 6.4 den Alman IC-BR103 lokomotifi için verilen B_0, B_1, B_2 değerleri de kullanılarak toplam enerji;

$$E \cong \frac{(1+1)}{205} \times \frac{55,56^2}{2} + 16 + 0 \times 27,78 + 22,5 \times 10^{-3} \times 27,78^2 + 9,81 \times \frac{856 - 793}{205}$$

$$\cong 51,437 \text{ kJ/ton-km} = 1476,242 \text{ kWh bulunur.}$$

Çizelge 6.11 Ekspres-1 treninin V=100, 125, 150, 175, 200 km/sa için yöntem- 3 e göre enerji tüketimlerini göstermektedir.

Çizelge 6.11 : Farklı hızlar için yöntem- 3 e göre enerjiler

Ekspres-1	V=100 km/sa	V=125 km/sa	V=150 km/sa	V=175 km/sa	V=200 km/sa
E (kWh)	1476,242	1756,325	2099,175	2503,759	2971,282
E (kJ/ton-km)	51,437	61,196	73,142	87,239	103,529

Çizelge 6.12 Ekspres-1 treninin V=100, 125, 150, 175, 200 km/sa için yöntem- 1 e göre enerji tüketimlerini göstermektedir.

Çizelge 6.12 : Farklı hızlar için yöntem- 1 e göre enerjiler

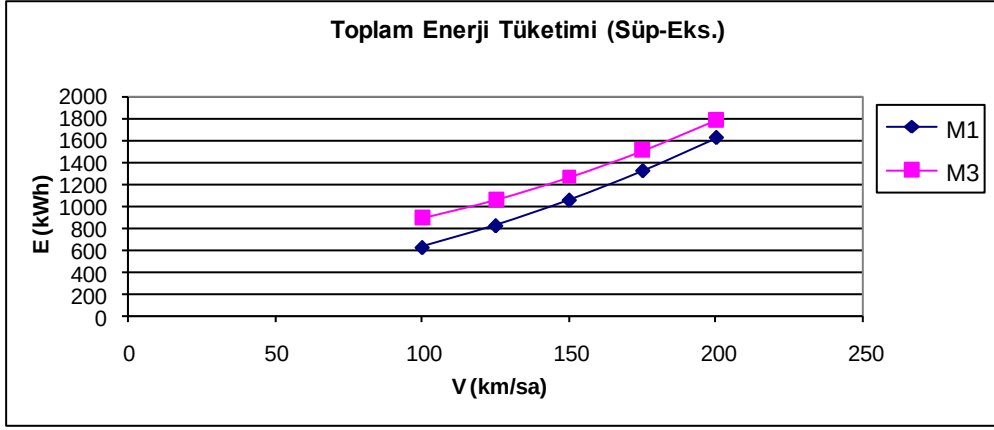
Ekspres-1	V=100 km/sa	V=125 km/sa	V=150 km/sa	V=175 km/sa	V=200 km/sa
E (kWh)	976,962	1263,515	1598,386	1981,294	2412,520
E (kJ/ton-km)	34,040	44,025	55,693	69,035	84,060

Çizelge 6.13 Süper-Ekspres, Ekspres-1, Ekspres-2 ve hızlı yük trenlerinin V=100 km/sa için yöntem 1 e göre enerji tüketimlerini göstermektedir.

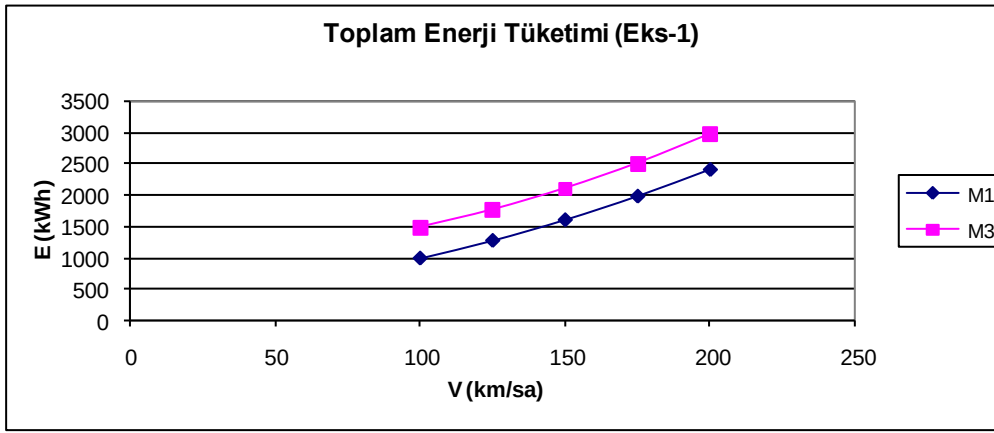
Çizelge 6.13 : Farklı trenler için yöntem- 1' e göre enerjiler

	Süper-Ekspres	Ekspres-1	Ekspres-2	Yük Treni (Hızlı)
E (kWh)	628,574	976,962	1384,588	2133,955
E (kJ/ton x km)	36,503	34,040	32,162	33,797

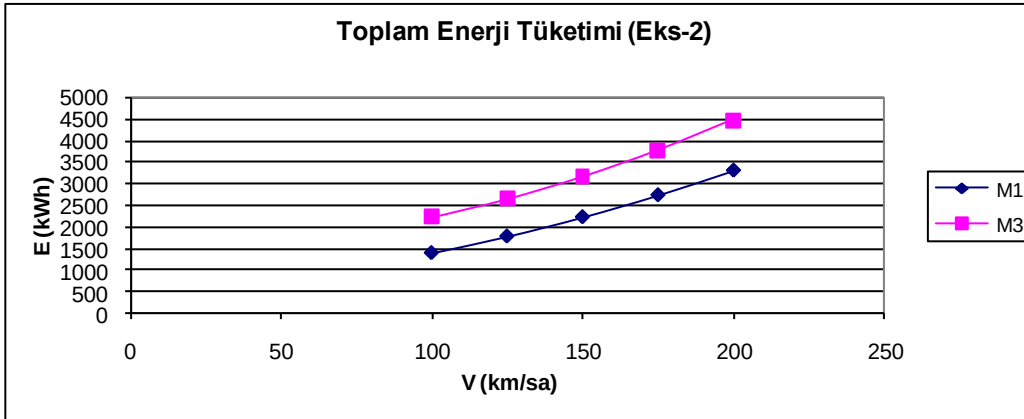
Şekil 6.2 – 6.6 tüm tren tiplerine ait toplam enerji tüketimlerini her iki yöntem için ayrı ayrı olmak üzere vermektedir.



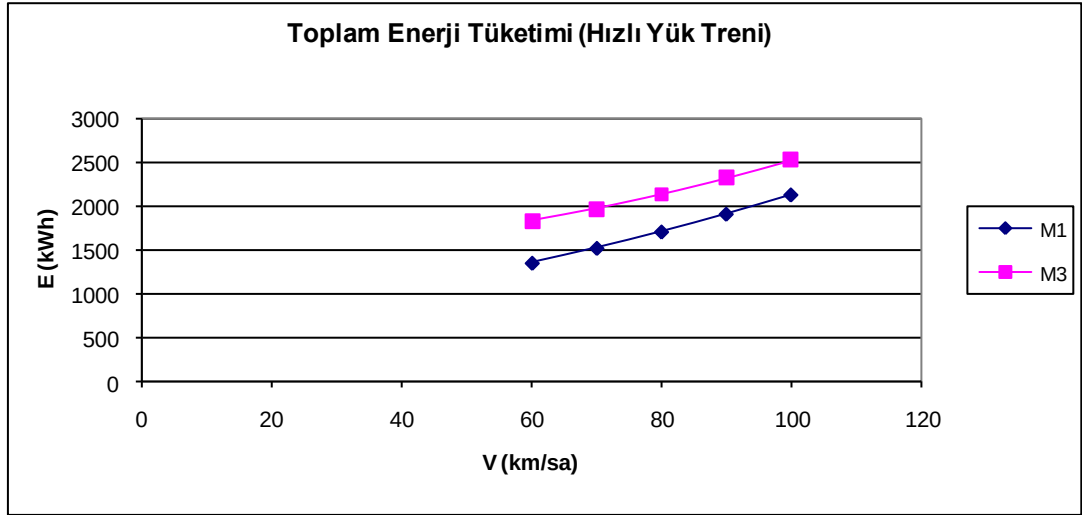
Şekil 6.2 : Süper Ekspres yolcu treni için toplam enerji tüketimi



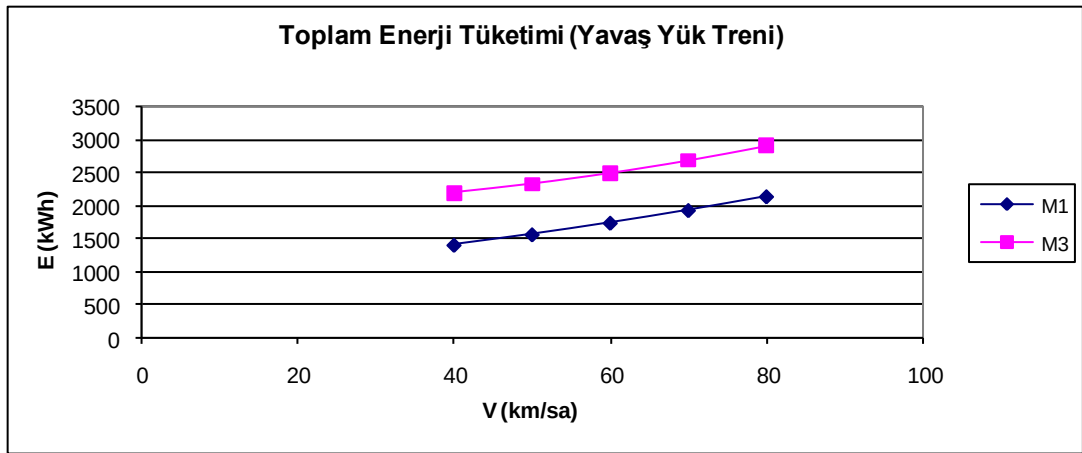
Şekil 6.3 : Ekspres-1 yolcu treni için toplam enerji tüketimi



Şekil 6.4 : Ekspres-2 yolcu treni için toplam enerji tüketimi



Şekil 6.5 : Hızlı yük treni için toplam enerji tüketimi



Şekil 6.6 : Yavaş yük treni için toplam enerji tüketimi

Enerji tüketimleri yolcu ve yük trenlerinin doluluk oranları dikkate alınarak, yolcu-km ya da ton-km başına düşen birim enerji tüketimi cinsinden de hesaplanabilmektedir.

Yolcu treni ağırlıkları: Yolcu trenlerinin ağırlıkları tren tipine göre farklılıklar göstermektedir [13,14]. Çizelgede 6.14 de çeşitli tren tiplerine ait günümüz ve gelecekte ulaşılması öngörülen ton/koltuk değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.14 : Tren Tipine Göre Ton/Koltuk Değerleri [14]

Tren Tipi	1998	2020
Yüksek Hızlı Trenler	1,0	0,4
Intercity Trenler	0,7	0,4
Geleneksel Trenler	0,4	0,3
Banliyö Trenleri	0,4	0,3
Yük Trenleri (Yükleme Oranı)	0,27	0,2

Yük treni ağırlıkları: Yük trafiği için bir giriş parametresi olarak genellikle ton-km olarak yük miktarı verilir. Taşınan yüke ek olarak yükü taşıyan araçların da dikkate alınması gerekir. Yük trenlerinin taşıma kapasitesi, büyük oranda müsaade edilen dingil yüküne bağlıdır [13,14].

Modern trenler için uluslararası trafikte maksimum dingil yükü 22,5 ton olarak verilmektedir. Bazı ülkelerde ve eski trenlerde ise 20 ton olarak uygulanmaktadır. Yük trenlerinin tam dolu olarak çalıştığı varsayımıyla araç ağırlıklarının azaltılmasıyla taşınan yük miktarı artırılabilir ve yük trafiği daha etkin hale gelir. Finlandiya ve İspanya demiryolu araçlarından toplanan verilere dayanarak yük treni ağırlıkları için bazı yaklaşık katsayılar elde edilmiştir [13]. Çizelge 6.15, dingil yüklerine göre yük trenlerinin boş ağırlıklarının tam dolu toplam ağırlıklarına oranlarını vermektedir.

Çizelge 6.15 : Avrupa Yük Trenleri İçin Boş Ağırlığın Dolu Ağırlığa Oranı [13]

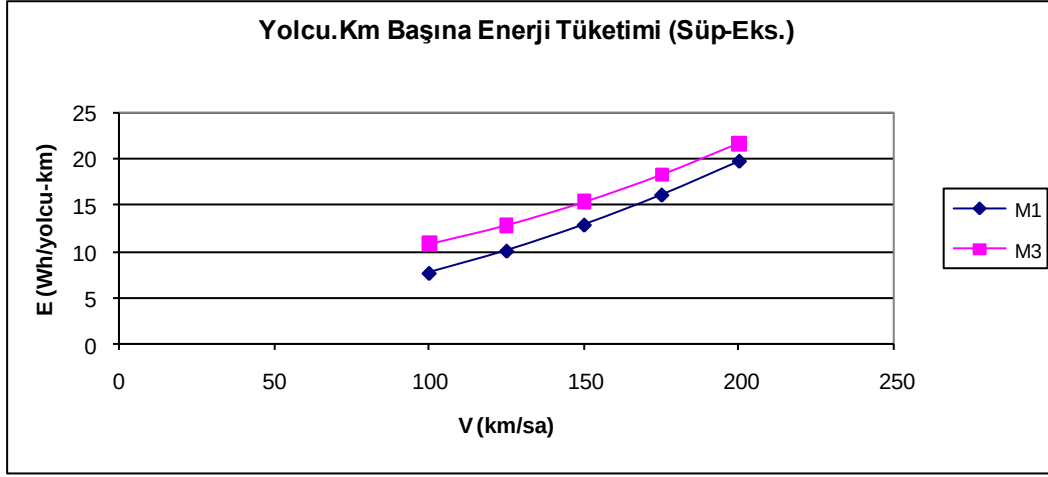
Dingil Değeri (maks. ton/dingil)	$W_r = \frac{\text{Boş Ağırlık}}{\text{Toplam Ağırlık}}$
20,0	0,33
22,5	0,27

Verilere göre trenlerin yükleme oranı dolu toplam ağırlığından boş ağırlığının çıkarılmasıyla bulunur. Maksimum dingil değerinin 22,5 ton alındığı durumlar için yükleme oranı 0,73 olur.

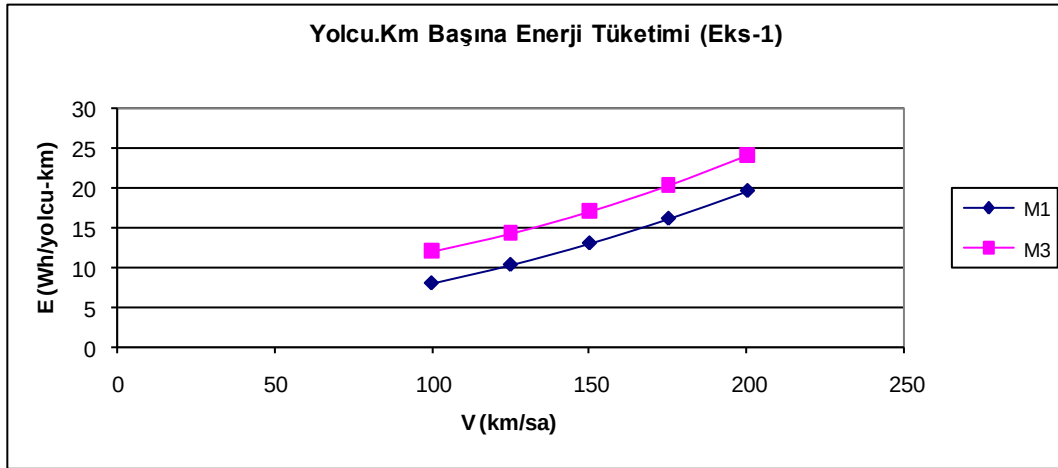
Şekil 6.7-6.11 de tüm tren modellerine ait birim enerji tüketimleri her iki yöntem için ayrı ayrı olmak üzere verilmektedir. Toplam yolcu sayısına trenlerin vagon sayısı belirlenerek ulaşılmıştır. Her vagona ortalama 50 kişilik yer olduğu varsayılarak, toplam yolcu sayısına ulaşılmıştır. Yolcu treni modellerine ait vagon ve yolcu sayıları çizelge 6.16 da verilmektedir.

Çizelge 6.16 : Yolcu treni modellerine ait vagon ve yolcu sayıları

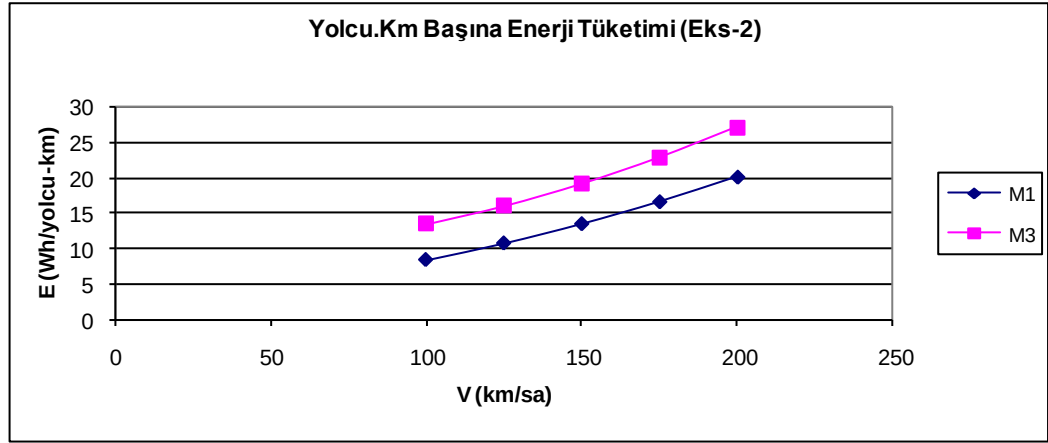
Tren Tipi	Vagon Sayısı	Yolcu Sayısı
Süper Ekspres	8	400
Ekspres-1	12	600
Ekspres-2	16	800



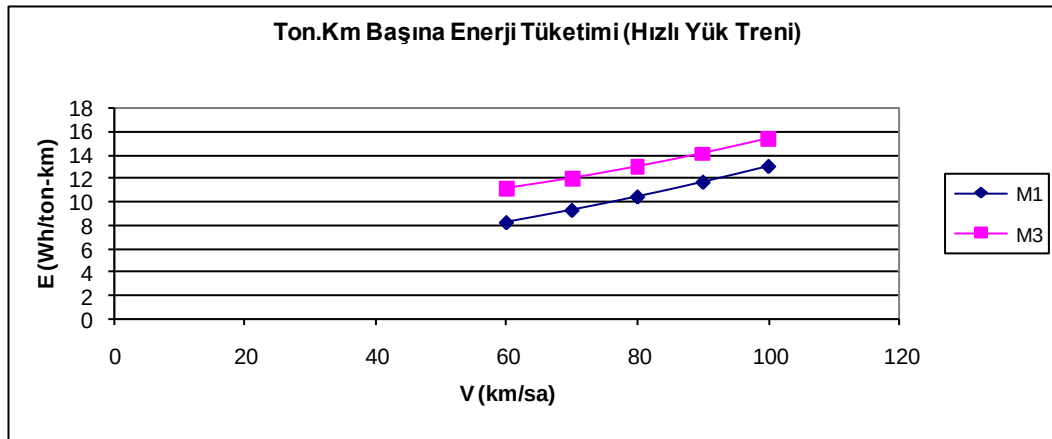
Şekil 6.7 : Süper- Ekspres yolcu treni için yolcu-km başına enerji tüketimi



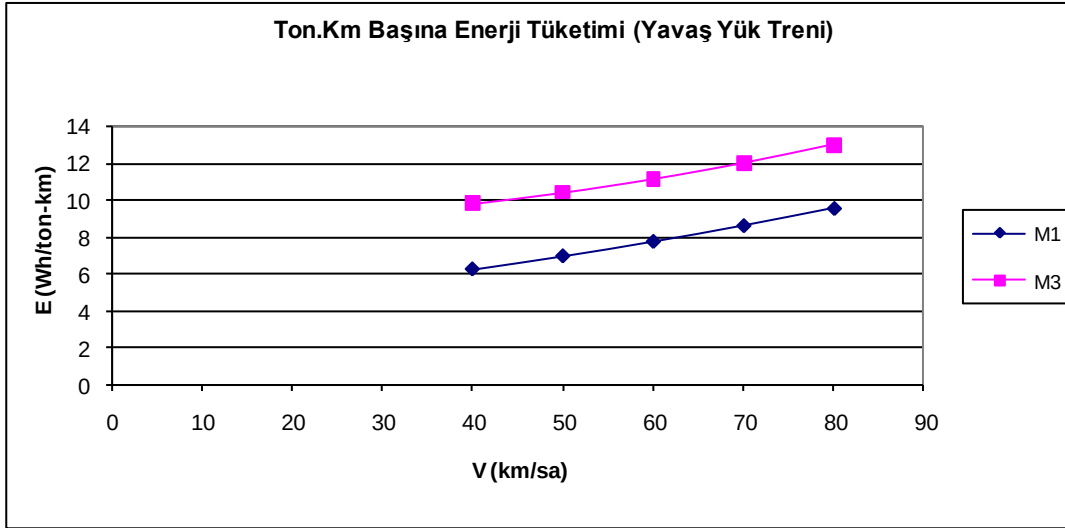
Şekil 6.8 : Ekspres-1 yolcu treni için yolcu-km başına enerji tüketimi



Şekil 6.9 : Ekspres-2 yolcu treni için yolcu-km başına enerji tüketimi



Şekil 6.10 : Hızlı yük treni için ton-km başına enerji tüketimi



Şekil 6.11 : Yavaş yük treni için ton-km başına enerji tüketimi

Emisyon hesapları Türkiye'deki elektrik santrallerine ait özel emisyon faktörlerinin belirlenmesine yönelik herhangi bir çalışma yapılmadığından dolayı Alman verilerine göre yapılacaktır. 2007 verilerine göre ülkemizde elektrik enerjisinin %47,3 ü doğalgaz, %20,7 si kömür, %18,2 si hidroenerji kullanılan santrallerden elde edilmektedir [16]. Buna göre santrallere ait özel emisyon faktörleri çizelge 6.17 deki gibi verilebilir.

Çizelge 6.17 : Ülkemizdeki santral kompozisyonuna göre emisyonlar

Yakıt/Enerji Türü	Kullanım yüzdesi	CO ₂	CO	HC	NO _x	SO ₂
	%	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Doğal Gaz	47,3	547	0,010	0,049	1,386	0,000
Kömür	20,7	991	0,201	0,031	1,178	1,759
Hidroenerji	18,2	0	0,000	0,000	0,000	0,000
Diğer	13,8	-	-	-	-	-
Toplam	100,0					

Buna göre Ekspres-1 treninin V=100, 125, 150, 175, 200 km/sa için yöntem- 1'e göre hesaplanan enerji tüketimleri sonucu oluşan emisyon miktarları çizelge 6.18 de verilmiştir.

Çizelge 6.18 : Ekspres 1 in yöntem- 1 ve farklı hızlara göre enerji tüketimi

Ekspres-1	V=100 km/sa	V=125 km/sa	V=150 km/sa	V=175 km/sa	V=200 km/sa
E (kWh)	976,962	1263,515	1598,386	1981,294	2412,520
CO ₂ (kg)	453,310	586,271	741,651	919,320	1119,409
CO (kg)	0,045	0,059	0,074	0,092	0,112
HC (kg)	0,029	0,037	0,047	0,059	0,071
NO _x (kg)	0,879	1,136	1,438	1,782	2,170
SO ₂ (kg)	0,356	0,460	0,582	0,721	0,878

Buna göre Süper-Ekspres, Ekspres-1, Ekspres-2 ve V=100 km/sa için yöntem 1 e göre hesaplanan enerji tüketimleri sonucu oluşan emisyon miktarları çizelge 6.19 da verilmiştir.

Çizelge 6.19 : Farklı Yolcu Trenleri için Emisyonlar

	Süper-Ekspres	Ekspres-1	Ekspres-2
E (kWh)	628,574	976,962	1384,588
CO ₂ (kg)	291,658	453,310	642,449
CO (kg)	0,029	0,045	0,064
HC (kg)	0,019	0,029	0,041
NO _x (kg)	0,565	0,879	1,245
SO ₂ (kg)	0,229	0,356	0,504

Yük trenleri dizel çekimli olduğundan emisyon hesabı yapılırken santrale ait emisyon faktörleri değil, aracın kendisinin yaydığı emisyonlara ait emisyon faktörleri dikkate alınacaktır. Bunun için de dizel çekimle çalışan demiryolu araçlarına ait ortalama emisyon faktörleri kullanılacaktır. Dizelli çekime ait emisyon faktörleri çizelge 6.20 de verilmektedir.

Çizelge 6.20 : Dizelli çekimde emisyon faktörleri

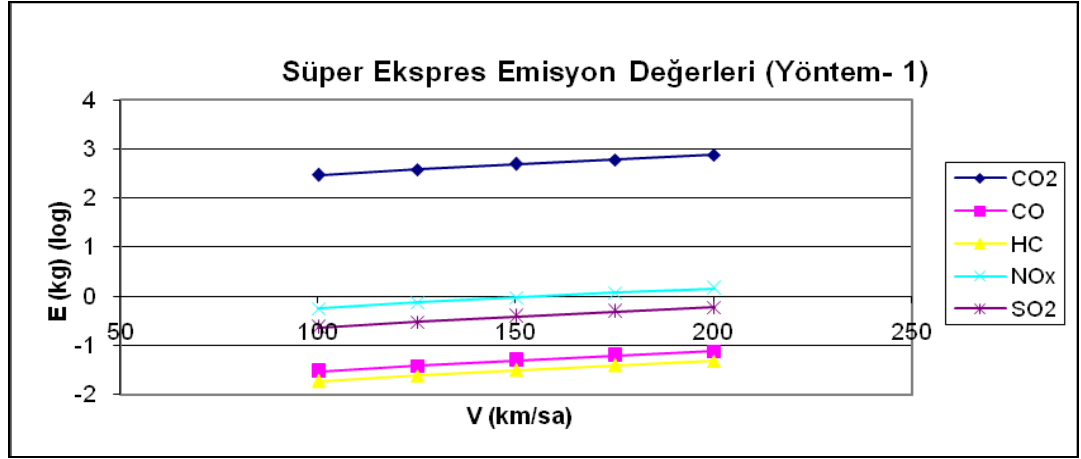
Emisyon	Yakıt (g/kg)	
	Aralık	Ortalama
CO	5 - 40	22
HC	3 - 25	11
NO _x	30 - 70	53
Partikül	1 - 6	3
SO ₂	1 - 10	4
CO ₂	3180	3180

Buna göre hızlı yük treninin V=100 km/sa, yavaş yük treninin V=80 km/sa için yöntem- 1 e göre hesaplanan enerji tüketimi sonucu oluşan emisyon miktarları çizelge 6.21 de verilmiştir.

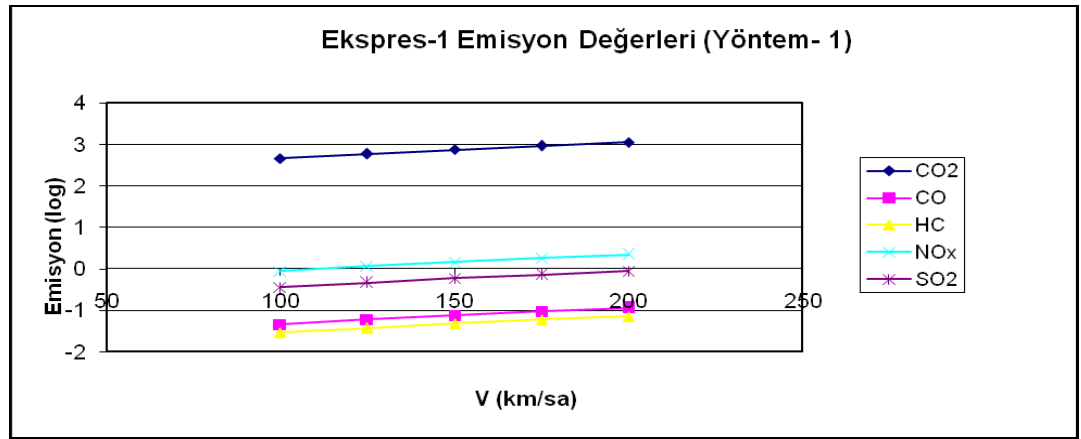
Çizelge 6.21 : Yük Treni için yöntem-1 e ait enerji ve emisyonlar

	Hızlı Yük Treni (V=100 km/sa)	Yavaş Yük Treni (V=80 km/sa)
E (kWh)	2133,676	2139,932
CO ₂ (kg)	1365,553	1369,556
CO (kg)	8,321	8,346
HC (kg)	4,267	4,280
NO _x (kg)	22,830	22,897
SO ₂ (kg)	1,707	1,712
Partikül (kg)	1,280	1,284

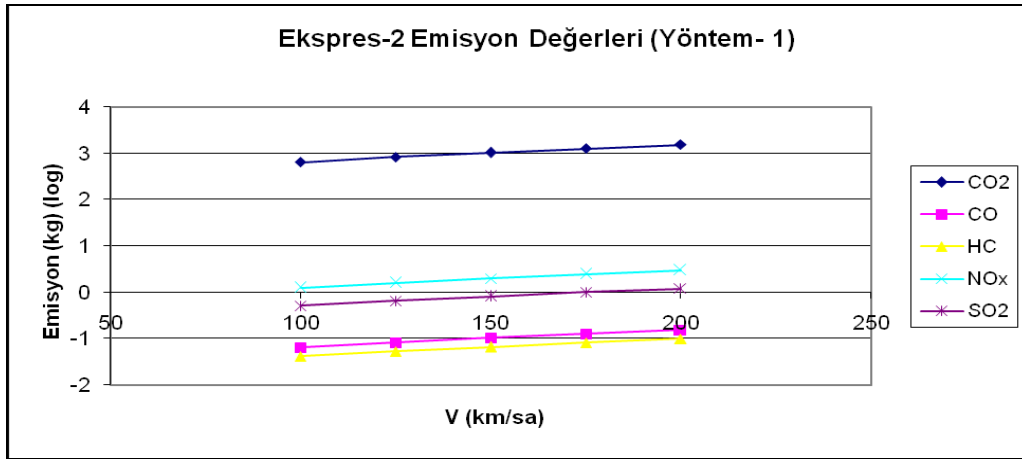
Şekil 6.12-6.16 de tüm tren tiplerine ait emisyon miktarları yöntem 1 için ayrı ayrı olmak üzere verilmektedir:



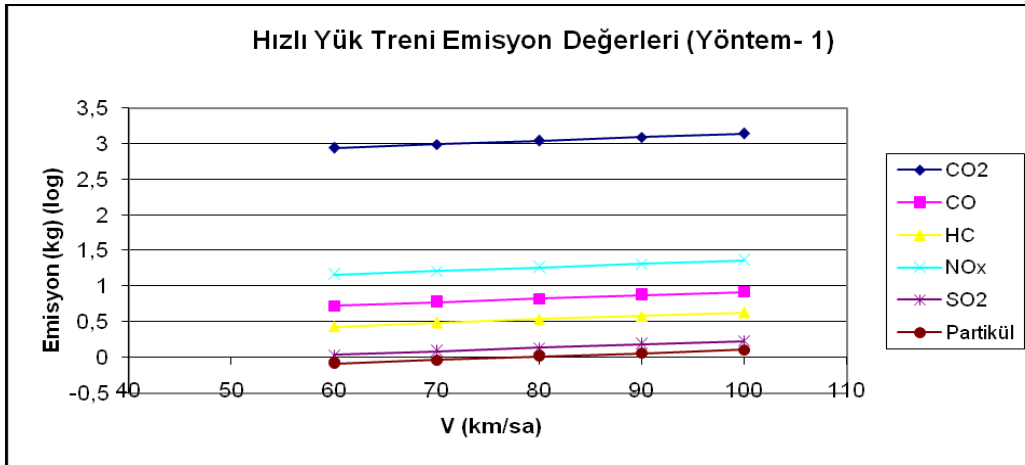
Şekil 6.12 : Süper Ekspres yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 1)



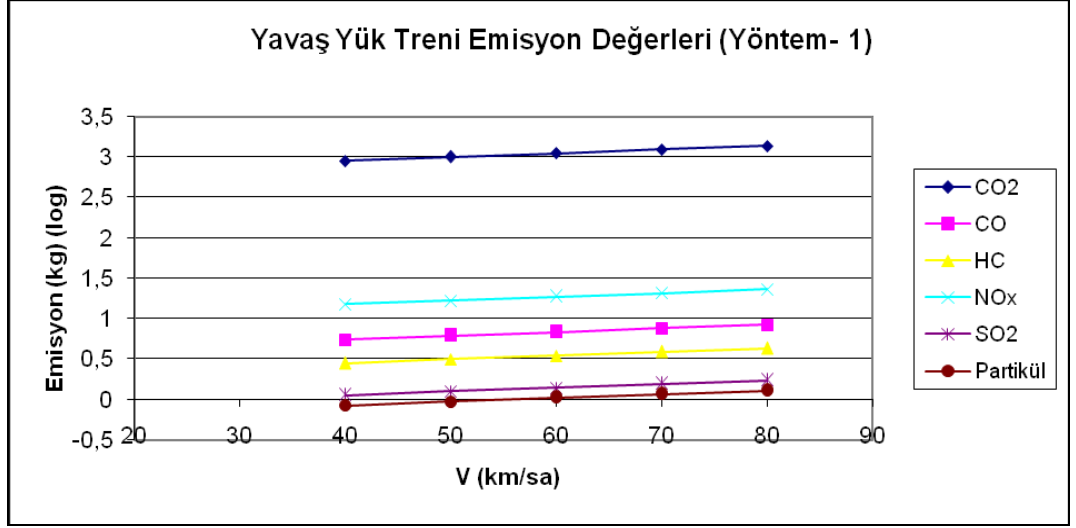
Şekil 6.13 : Ekspres-1 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 1)



Şekil 6.14 : Ekspres-2 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 1)

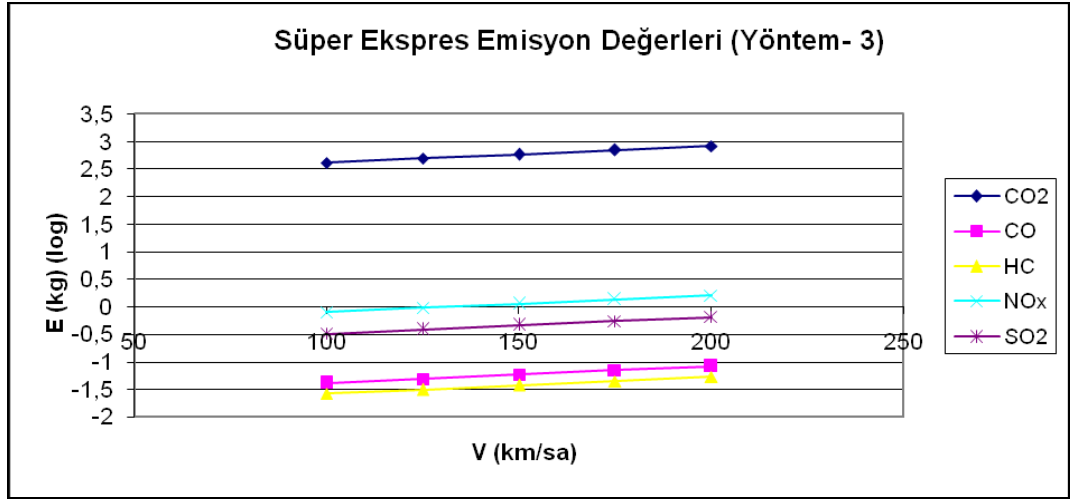


Şekil 6.15 : Hızlı yük treni emisyon değerleri (yöntem- 1)

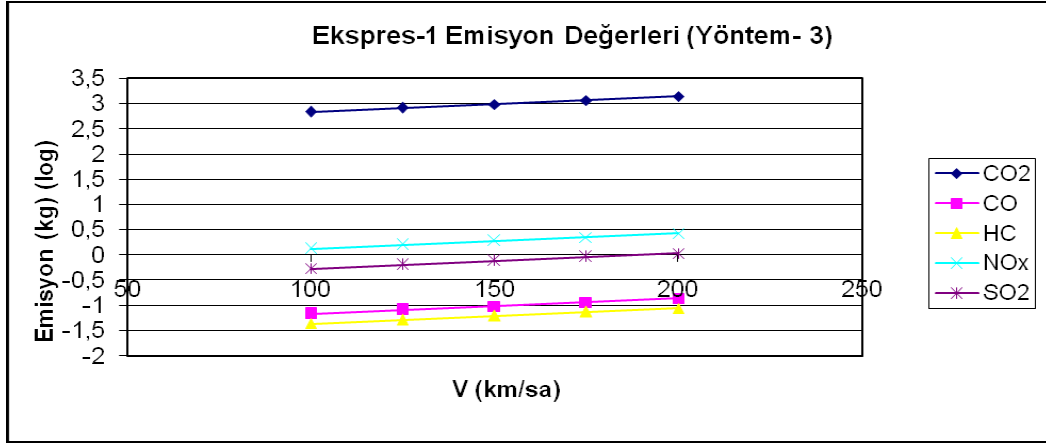


Şekil 6.16 : Yavaş yük treni emisyon değerleri (yöntem- 1)

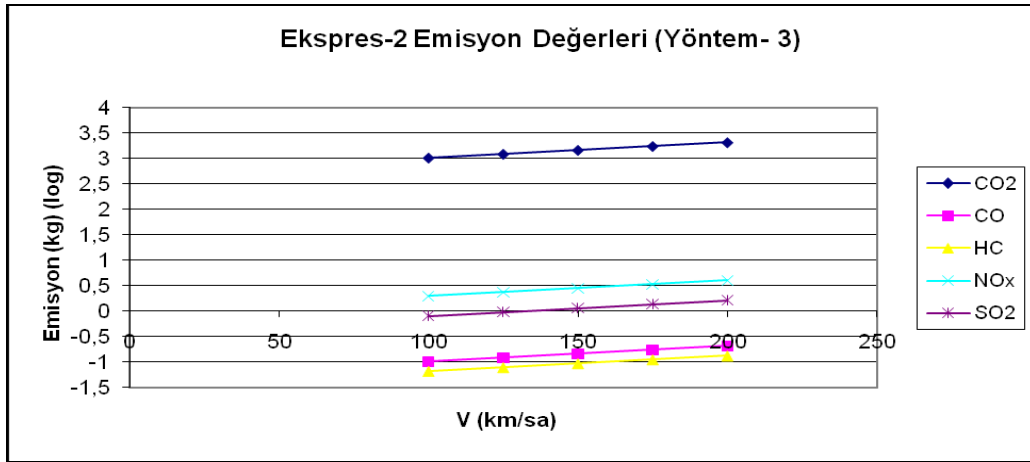
Şekil 6.17-6.21 de tüm tren tiplerine ait emisyon miktarları yöntem- 3 için ayrı ayrı olmak üzere verilmektedir:



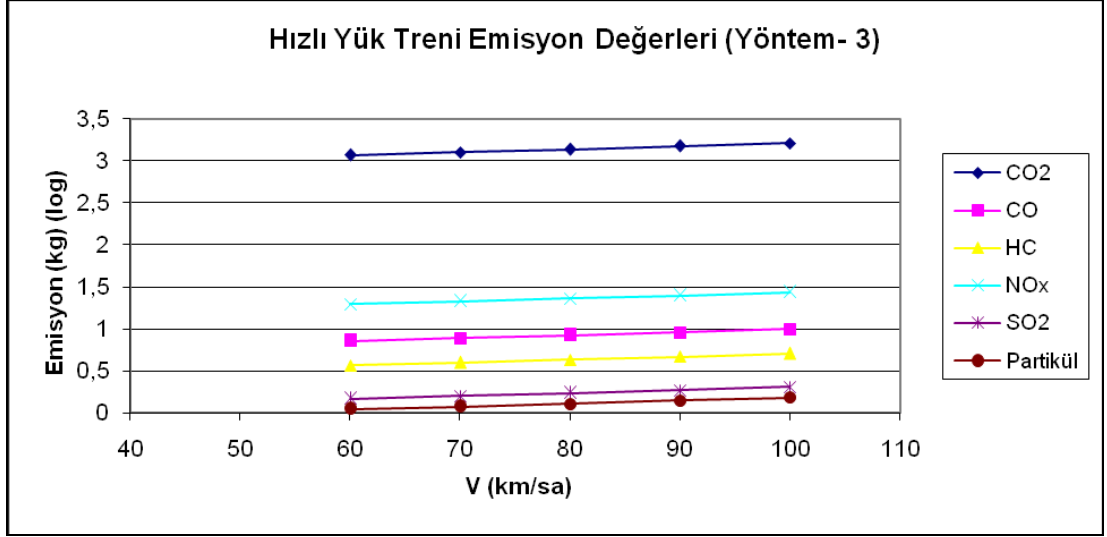
Şekil 6.17 : Süper- Ekspres yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 3)



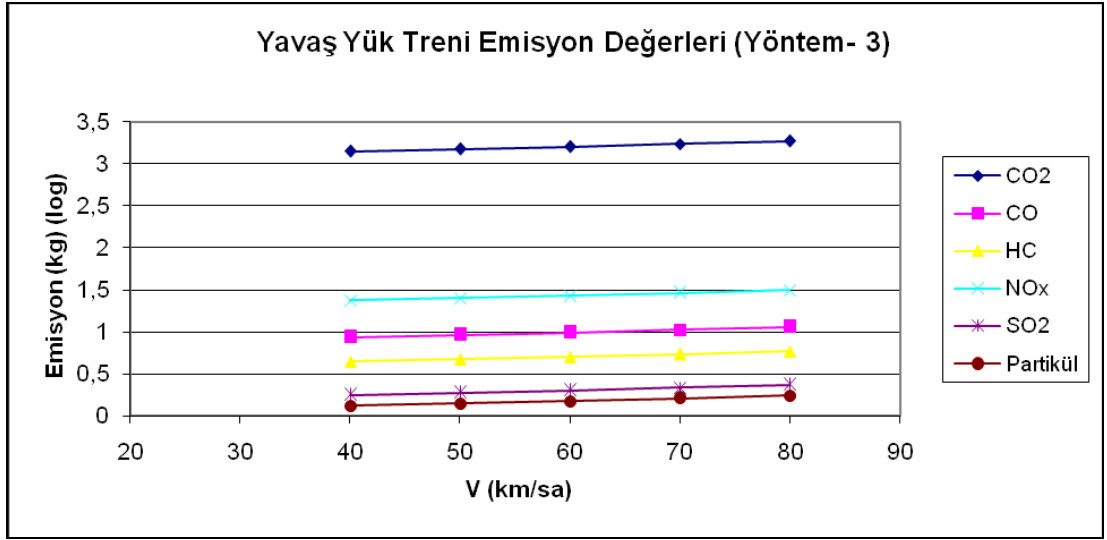
Şekil 6.18 : Ekspres-1 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 3)



Şekil 6.19 : Ekspres-2 yolcu treni emisyon değerleri (yöntem- 3)



Şekil 6.20 : Hızlı yük treni emisyon değerleri (yöntem- 3)

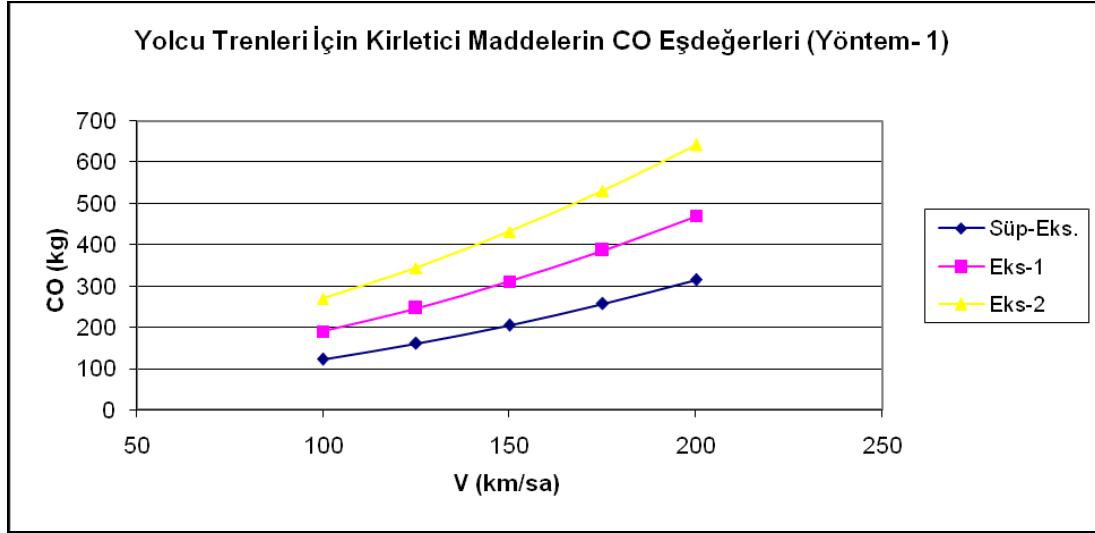


Şekil 6.21 : Yavaş yük treni emisyon değerleri (yöntem- 3)

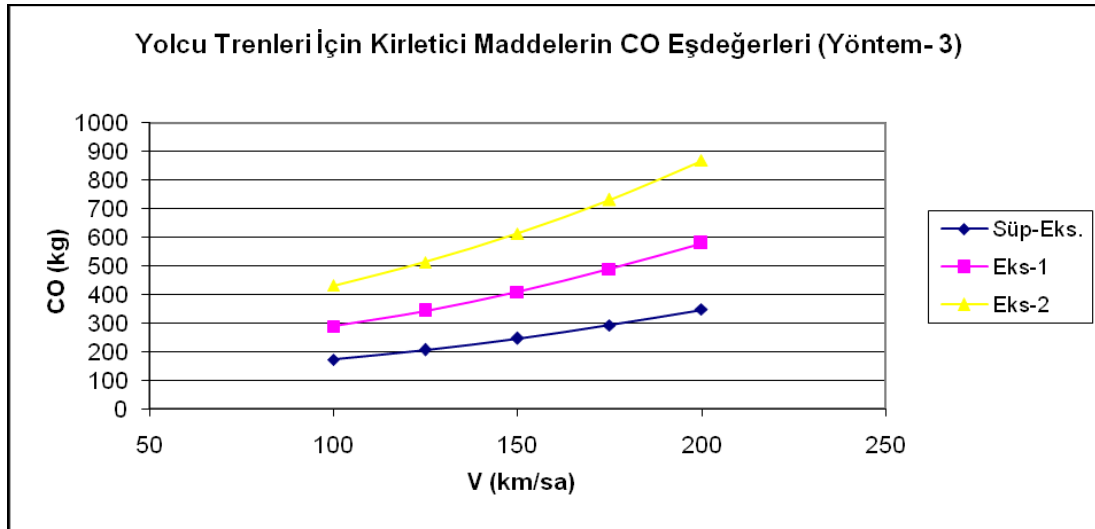
Şekil 6.22-6.25 de tren tiplerine ait emisyon miktarları CO eşdeğerlerine dönüştürülmüş olarak her iki yöntem için ayrı ayrı olmak üzere verilmektedir [17]. Çeşitli kirletici maddelerin CO eşdeğerleri çizelge 6.22 de verilmiştir.

Çizelge 6.22 : Çeşitli Kirlетici Maddelerin CO- Eşdeğerleri [17]

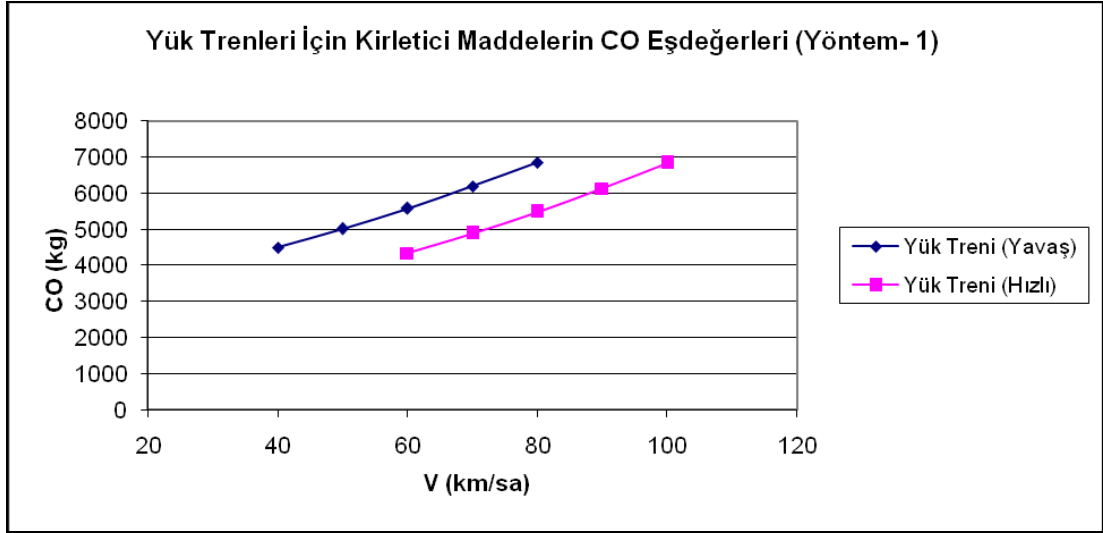
Zararlı Madde	Toksik Faktörü
CO	1
NO _x	200
HC	500
Partikül	100



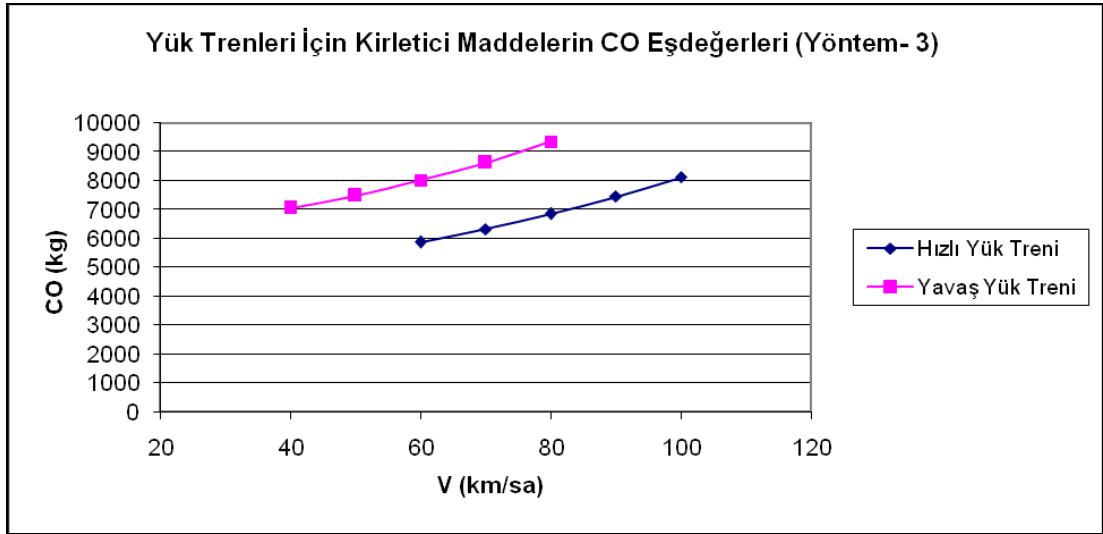
Şekil 6.22 : Yolcu trenleri için kirlетici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 1)



Şekil 6.23 : Yolcu trenleri için kirlетici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 3)



Şekil 6.24 : Yük trenleri için kirletici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 1)



Şekil 6.25 : Yük trenleri için kirletici maddelerin CO eşdeğerleri (yöntem- 3)

7. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında demiryolunda enerji tüketimini etkileyen faktörler ve bu faktörlerin demiryolu ulaşımında sebep olduğu hava kirliliği incelenmiştir. Demiryolu ulaşımında enerji tüketimi, araçların teknik özelliklerine bağlı olmakla birlikte, hava koşulları, kat edilen mesafe, doluluk oranı ve seyir direnimlerinden de etkilenmektedir. Demiryolu ulaşımı enerji tüketimi açısından diğer ulaşım sistemleri arasında avantajlı bir konumdadır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda demiryolu; birim km de tüketilen enerji miktarına göre yakın mesafe yük trafiğinde en az enerji tüketen ulaştırma sistemidir. Uzak mesafe yolcu trafiğinde otobüsten sonra ikinci sırada gelmektedir.

Demiryolu araçları, buhar, dizel ya da elektrik gücüyle çalışan araçlar olup, günümüzde çoğunlukla dizel ve elektrik gücünden faydalanmaktadır. Dizel çekim, II. Dünya Savaşı sonrasında geliştirilmiş olup, buharlı çekime oranla daha etkin, daha düşük maliyetli, daha konforlu ve daha temiz bir işletme sunduğundan dolayı buharlı çekimin önüne geçmiştir. Elektrikli çekim ise dizele oranla daha yüksek hat döşeme maliyetine sahip olmakla birlikte, işletme ve bakım maliyetleri, spesifik güç ve kirlitici özellikleri açısından dizel çekimden çok daha avantajlı konumdadır. Elektrikli çekim özellikle hava kirliliği konusunda dizel çekimle kıyaslandığında üstün durumdadır. Elektrikli işletim sırasında araçta hemen hemen hiç kirlitici emisyon oluşmamaktadır, yalnızca santralde elektrik elde edilirken kirlilik söz konusudur. Dizel çekimde ise dizel otomobillere kıyasla çok daha az olmakla birlikte kirlitici emisyon oluşmaktadır.

Demiryolu araçlarında enerji tüketimine etki eden direnimler doğru ve düzlük direnimi, tünel direnimi, demeraj direnimi, kurba ve eğim direnimleridir. Direnim hesaplarını ve buna paralel olarak enerji tüketimini en çok etkileyen direnim türü ise

işletme aracının özelliklerine bağlı olan ve mekanik ve hava direnimlerini de içeren doğru ve düzlük direnidir.

Çalışmanın devamında iki örnek hat alınarak bu hatlara ilişkin incelemeler yapılmıştır. Almanya'daki ICE (Intercity Express) yüksek hızlı trenlerinin çalıştığı Hannover-Würzburg ve 2009 yılında hizmete açılan Eskişehir-Ankara hızlandırılmış tren hattında çalışan trenlerin toplam enerji tüketimi ve zararlı madde emisyon üretimleri hesaplanmıştır. Enerji tüketimleri için iki ana farklı yöntem kullanılmış olup, ilk yöntem genel demiryolu direnimlerinden faydalanmaktır. Bunun için ilgili direnim denklemi kullanılarak hesaplanan direnimlerin mesafe ve araç ağırlığı ile çarpılması suretiyle enerji belirlenmektedir. Enerjiyi belirlemede kullanılan ikinci yöntem ise ampriktir. Bu yöntemde, hat boyunca trenin durduğu istasyon sayılarını ve hattın başlangıcı ile sonu arasındaki kot farkını dikkate alarak hesaplama yapılır. Her iki yöntemde de tren hızı, sonucu etkileyen en önemli değişkendir. İkinci yöntemde, ayrıca ivmelenme hesaplanırken maksimum hızdan yararlanılır. İvmelenme ve kot farkı büyüklüklerinden dolayı bu yöntemi kullanarak ulaşılan sonuçlar diğer yöntemin sonuçlarından daha fazla çıkmaktadır. Ayrıca mesafe, istasyon sayısı ve kot farkı gibi parametreler dikkate alındığı ve aracın sadece bir kesimdeki hareketi sırasında karşılaştığı direnimler değil, diğer kesimler de dikkate alındığı için sonuçlar daha gerçekçi olmaktadır. Yani belli bir hat kesimi boyunca mevcut istasyon sayıları, buna bağlı olarak gerekli ivmeli hareketler ve hattın geçtiği topografik yapı bu yöntemde etkili olabilmektedir. Bu yöntemler arası farklılıklar emisyon sonuçlarını da etkilemektedir. İlk yöntem kullanılarak ulaşılan emisyon değerleri hatla ilgili bahsedilen değişkenler dikkate alınmadığı için ikinci yönteme göre ulaşılan değerlerden daha düşük çıkmaktadır. Enerji tüketimini belirlemede kullanılan yöntemlerde kullanılan bir takım parametreler amprik çalışmalar sonucu elde edilmiş olup sadece çalışmanın yapıldığı tren modeline aittir. Eskişehir- Ankara hattında kullanılan tren modellerine ait parametre değerlerine ulaşılamadığı için hesaplamalar mevcut parametre değerlerini kullanarak yapılmıştır. Aynı durum emisyon hesabı için de geçerlidir. Türkiye'deki elektrik santrallerine ait özel emisyon

faktörlerinin belirlenmesine yönelik herhangi bir çalışma yapılmadığından dolayı hesaplamalar Alman verilerine göre yapılmıştır.

Hesap sonuçları ve oluşturulan diyagramlar incelendiğinde, enerji tüketimini etkileyen en önemli parametrelerden birinin hız olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Hızlar arttıkça aracın enerji tüketimi artmakta, dolayısı ile kirletici madde emisyonunda da artış olmaktadır. Enerji tüketimini etkileyen diğer parametreler ise aracın ağırlığı ve uzunluğudur. Bu iki değişken arttıkça enerji tüketimi ve emisyon oluşumu da artmaktadır. Yani daha ağır ve uzun araçların enerji tüketimi ve emisyon değerleri daha hafif ve kısa araçlara göre daha fazla olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Erel, A.**, 1986, *Sosyal ve Ekonomik Gelişmemizde Ulaştırma Sempozyumu, Ulaştırma ve Enerji*, TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu İTÜ Ulaştırma ve Ulaşım Araçları UYG-AR Merkezi.
- [2] **Öztürk, Z.**,1994, *Otoyol ve Demiryolunun Önemli Çevre Etkilerinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi*, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] **Profillidis, V.**, 1995, *Railway Engineering*, Avebury Technical, Ashgate Publishing Limited, USA.
- [4] **Öztürk, Z.**, *Motorlu Araçlardan Oluşan Kirlilik ve Egzos Emisyon Regülasyonları*, II. Ulaşım ve Trafik Kongresi Sergisi.
- [5] **Andersson, E., Lukaszewicz, P.**, 2006, *Energy Consumption and Related Air Pollution for Scandinavian Electric Passenger Trains*, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering Royal Institute of Technology, KTH.
- [6] **Url-1** <http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance>, alındığı tarih 08.03.2008.
- [7] **Eurobitume, EAPA**, 2004, *Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements*, EAPA and Eurobitume Report, Executive Summary.
- [8] **Url-2** <http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_locomotive>, alındığı tarih 05.04.2009.
- [9] **Url-3** <<http://ge.ecomagination.com/site/index.html#hybr/details>>, alındığı tarih 08.11.2008.
- [10] **Kumbasar, F.**, 1972, *Üst Yapı ve Demiryolu Mekaniği*, Ankara.
- [11] **Tünay, O., Alp, K.**, 1996, *Hava Kirlenmesi Kontrolü*, İstanbul Ticaret Odası.
- [12] *Ulaştırma Ana Plan Stratejisi Sonuç Raporu*, 2005, Ulaştırma ve Ulaşım Araçları UYG-AR Merkezi.
- [13] **Jorgensen, M., Sorenson, S.**, 1997, *Estimating Emissions From Railway Traffic*, Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark.
- [14] **Öztürk, Z.**, 2003, *Raylı Taşımada Enerji Kullanımı ve Hava Kirliliği*, Ulaşım ve Trafik Kongresi, Ankara.

- [15] **Gürbüzer, T.**, 2005, *Ankara-Eskişehir Yeni Demiryolu Hattı Alt Yapısının Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] **Url-4** <<http://www.enerji.gov.tr>>, alındığı tarih 05.04.2009.
- [17] **Öztürk, Z.**, Ulaştırmanın Çevresel Etkileri Ders Notları.

EKLER

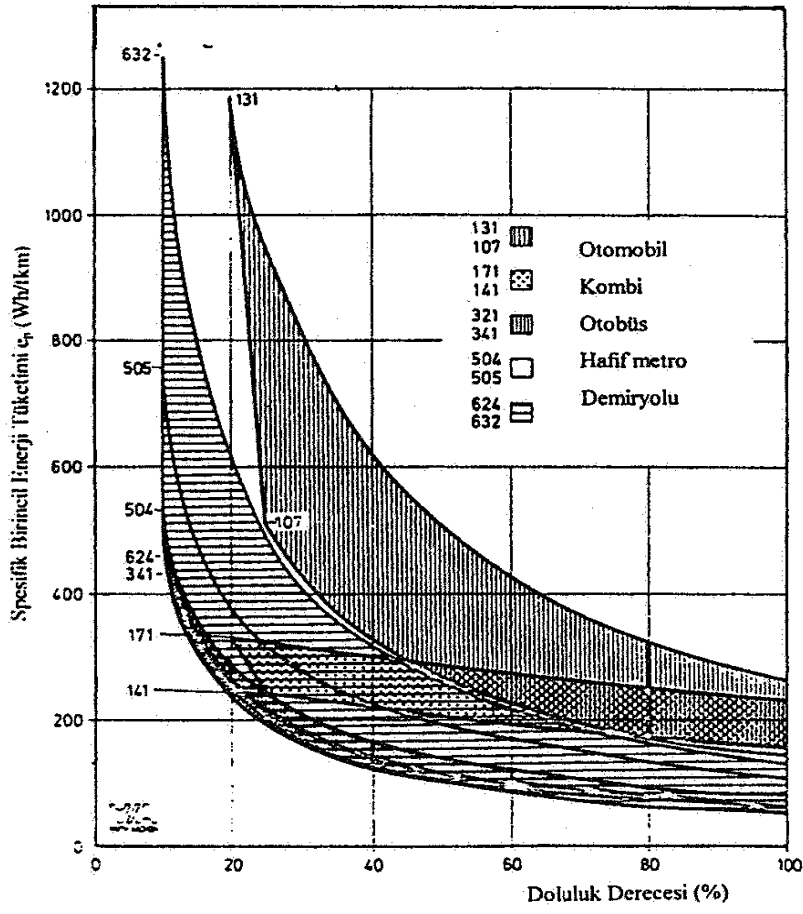
EK A.1: Kısa mesafe yolcu trafiği

EK A.2: Uzun mesafe yolcu trafiği

EK A.3: Kısa mesafe yük trafiği

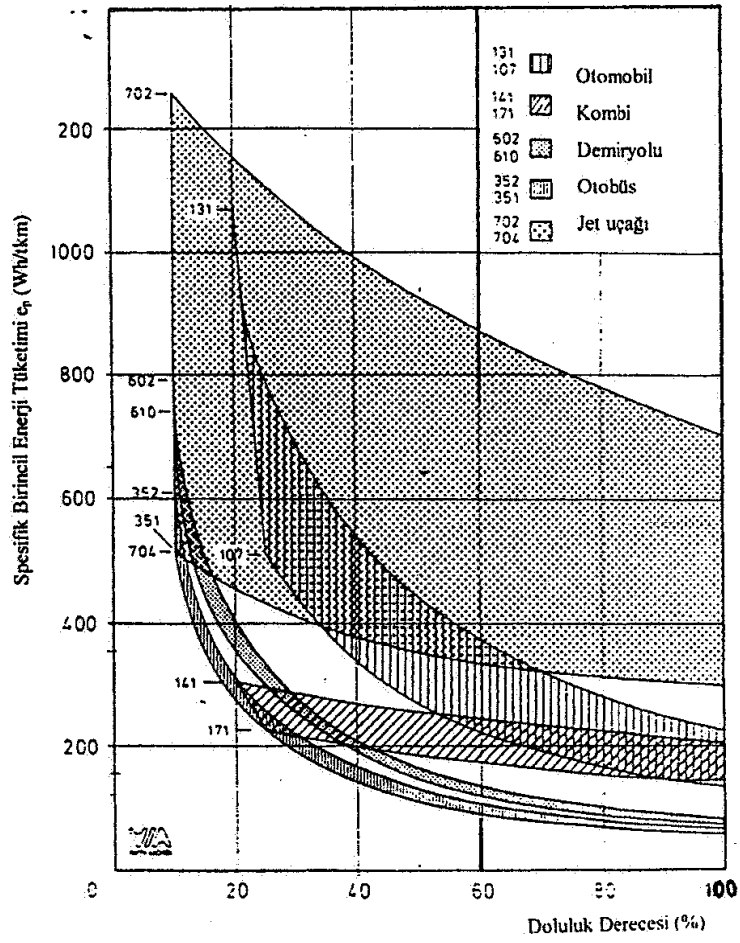
EK A.4: Uzun mesafe yük trafiği

EK A.1



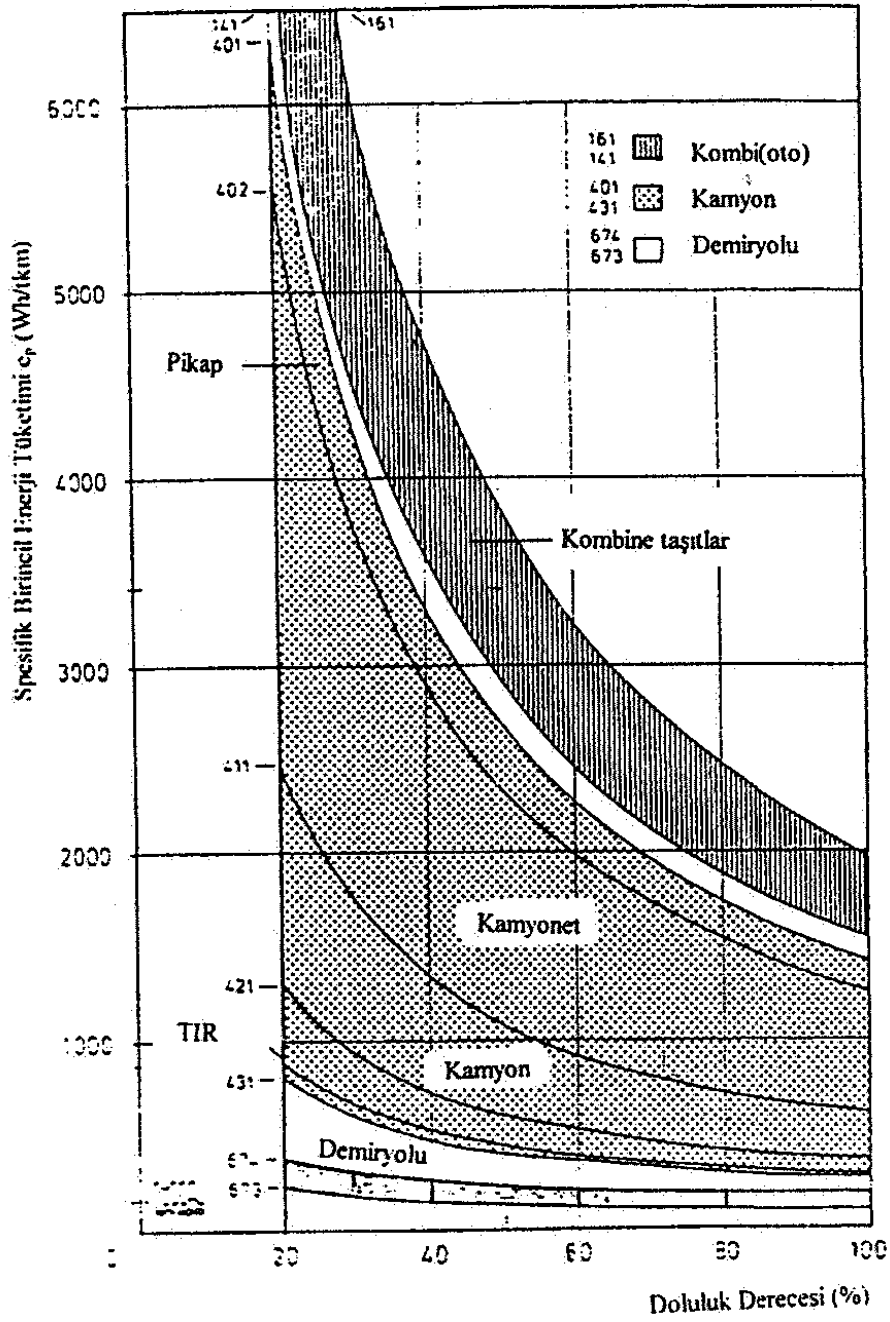
Şekil A.1 : Kısa mesafe yolcu trafiği

EK A.2



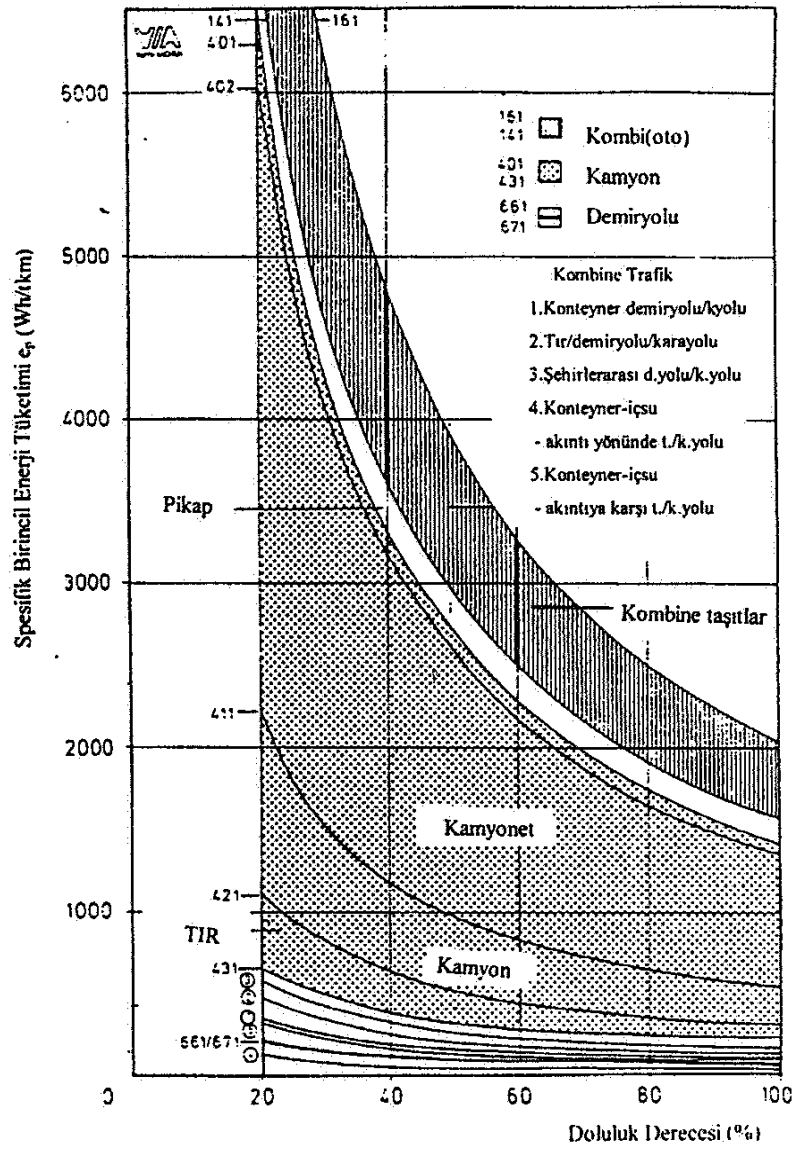
Şekil A.2 : Uzun mesafe yolcu trafiği

EKA.3



Şekil A.3 : Kısa mesafe yük trafiği

EK A.4



Şekil A.4 : Uzun mesafe yük trafiği

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Elif ERSÖZ

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 26.05.1983

Adres: Fahrettin Kerim Gökay Cad. No: 138/9 Kadıköy, İstanbul

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi