

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Damla ALTINCI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Damla ALTINCI
(501211402)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

TEMMUZ 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**MULTI-CRITERIA EVALUATION OF HIGH SPEED TRACKED
TRANSPORT SYSTEMS**



M.Sc. THESIS

**Damla ALTINCI
(501211402)**

Department of Civil Engineering

Transportation Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

JULY 2024



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501211402 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Damla ALTINCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ercan YÜKSEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hazal YILMAZ SÖNMEZ
Doğuş Üniversitesi

Teslim Tarihi : 3 Haziran 2024
Savunma Tarihi : 1 Temmuz 2024





Anneme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitim sürecim boyunca tecrübe ve fikirleriyle bana yol gösteren, desteğini esirgemeyen, hep yanımda olan sevgili danışman hocam sayın Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca arkamda olduklarını bildiğim, maddi manevi her türlü desteği veren başta annem Hülya ALTINCI, babam Ahmet ALTINCI, kardeşim Deniz ALTINCI ve canım anneannem Neziha CİNDİL olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince desteklerini ve teşviklerini eksik etmeyen başta Rezan BULUT, Funda KILINÇ SUVAKÇI olmak üzere İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şube'sindeki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımda bana en güzel dostluğu kazandırmış olan ve bu süreçte her zaman destekleriyle yanımda olan, doğru arkadaşlıkların hayatı kurtardığını öğreten canım arkadaşım Gülsüm GÜZELSOY'a ve beni her zaman daha iyisine inandıran canım dostlarım Dilara SERAP DAĞLI ve Berçem BAHADIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2024

Damla ALTINCI
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	31
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	33
2. YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ	35
2.1 Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları	35
2.1.1 Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları'nın tarihsel gelişimi	36
2.1.2 Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları'nın teknolojik gereksinimleri	37
2.1.3 Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları'nın avantajları ve dezavantajları	38
2.2 Maglev (Manyetik Levitasyon Treni)	38
2.2.1 Maglev teknolojinin tarihsel gelişimi	39
2.2.2 Maglev teknolojinin çalışma prensibi	40
2.2.2.1 Manyetik levitasyon prensibi	41
2.2.2.2 Yanal kılavuzluk prensibi	43
2.2.2.3 İtme prensibi	44
2.2.3 Maglev teknolojisinin türleri.....	46
2.2.3.1 Elektromanyetik çekme sistemi (EMS)	46
2.2.3.2 Elektrodinamik itme sistemi (EDS)	47
2.2.3.3 EMS ve EDS sistemleri arasındaki farklar	48
2.2.4 Maglev'in Avantajları ve Dezavantajları	49
2.3 Hyperloop.....	50
2.3.1 Hyperloop teknolojisinin tarihsel gelişimi	51
2.3.2 Hyperloop çalışma prensibi	53
2.3.3 Hyperloop yapı özellikleri	54
2.3.3.1 Tüp Geçit.....	54
2.3.3.2 Hyperloop kapsülü	56
2.3.3.3 Tahrik sistemi.....	59
2.3.4 Hyperloop ulaşım sisteminin avantajları ve dezavantajları	61
3. ELE ALINAN SİSTEM ÖZELLİKLERİ.....	63
3.1 Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop'un Genel Özellikleri.....	64
3.1.1 Hız, seyahat süresi.....	64
3.1.2 Kapasite.....	67
3.1.3 Diğer ulaşım sistemleri ile uyumluluk	68
3.1.4 Güvenlik, güvenilirlik, konfor	69
3.2 Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop Ulaşım Türlerinin Geometrik Standartları	70
3.3 Maliyet	72
3.3.1 İnşa maliyeti	73

3.3.2 İşletme ve bakım maliyetleri	77
3.4 Enerji Tüketimi.....	78
3.5 Çevresel Etkiler	79
3.5.1 Arazi kullanımı.....	80
3.5.2 Gürültü	80
3.5.3 Titreşim	81
3.5.4 Manyetik alan kuvveti.....	81
4. YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	83
4.1 Çok Ölçütlü Değerlendirme Yöntemi	83
4.1.1 Analitik hiyerarşi süreci (Analytical Hierarchy Process-AHP)	84
olarak hesaplanmaktadır.....	87
4.1.2 MOORA (multi-objective optimization on the basis of ratio analysis) yöntemi.....	88
4.1.3 MOORA-oran yöntemi	89
4.1.4 MOORA-referans noktası yaklaşımı.....	90
4.1.5 MOORA-tam çarpım formu yaklaşımı	91
4.2 Ölçütlerin Belirlenmesi	92
4.2.1 Genel performans özellikleri	93
4.2.1.1 Hız	93
4.2.1.2 Hızlanma ivmesi.....	94
4.2.1.3 Seyahat süresi	94
4.2.1.4 Sefer aralığı	95
4.2.1.5 Kapasite	95
4.2.1.6 Mevcut ulaşım sistemleri ile uyumluluk	96
4.2.1.7 İki istasyon arası mesafe	96
4.2.2 Geometrik standartlar	97
4.2.2.1 Yatay kurp yarıçapı	98
4.2.2.2 Düşey kurp yarıçapı	98
4.2.2.3 Değer	98
4.2.2.4 Maksimum boyuna eğim.....	98
4.2.2.5 Enkesit genişliği	99
4.2.3 Maliyet	101
4.2.3.1 İnşa maliyeti	101
4.2.3.2 Altyapı bakım ve işletme maliyeti	102
4.2.3.3 Araç bakım ve işletme maliyeti.....	102
4.2.4 Çevresel etkiler.....	103
4.2.4.1 Enerji tüketimi.....	103
4.2.4.2 CO ₂ emisyonları	104
4.2.4.3 Arazi kullanımı.....	105
4.2.4.4 Gürültü	106
4.2.4.5 Elektriklenme şekli.....	106
4.2.4.6 Titreşim	106
4.3 Ağırlıkların Belirlenmesi.....	107
4.4 Karar Matrisinin Oluşturulması.....	114
4.5 MOORA-Oran Yöntemi	118
4.6 MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı	118
4.7 MOORA-Tam Çarpım Formu	121
4.8 MULTIMOORA.....	122
5. SONUÇ.....	125

KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ.....	133





KISALTMALAR

AHP	: Analitik Hiyerarşi Prosesi
CAHSR	: California High Speed Railways
CI	: Consistency Index/Tutarlılık İndeksi
CR	: Consistency Ratio /Tutarlılık Oranı
ÇÖKV	: Çok Ölçütlü Karar Verme
EDS	: Elektrodinamik Süspansiyon
EMS	: Elektromanyetik Süspansiyon
FRA	: Federal Railroad Administration
HSST	: High Speed Surface Transportation
ICE	: InterCity Express / Almanya Hızlı Tren Servisi
LGV	: Ligne a Grande Vitesse / Fransa Yüksek Hızlı Demiryolu
Hatları	
LLSM	: Lineer Senkron Motorlar
MAGLEV	: Manyetik Levitasyon
MOORA	: Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis
MULTIMOORA	: Multi Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio
Analysis	
PM	: Permanent Magnet
RI	: Random Index/ Rastgele İndeks
SCM	: Super-conducting Magnet
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TGV	: Train Grand Vitesse / Fransa Yüksek Hızlı Treni
UIC	: Union Internationale des Chemins de Fer (International
Union of Railways) /	Uluslararası Demiryolları Birliği
USDOT	: The United States Department of Transportation
UTM	: Urban Transit MAGLEV
YHD	: Yüksek Hızlı Demiryolları
YHT	: Yüksek Hızlı Tren



SEMBOLLER

dB(A)	: İnsan kulağının duyabileceği ses seviyesi
g	: Kütle çekim kuvveti
kg	: Kilogram
Km	: Kilometre
M	: Metre
mm	: Milimetre
m/s²	: İvme
Pa	: Paskal
\$	: Amerikan Doları





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : EMS ve EDS sistemlerinin karşılaştırılması.	49
Çizelge 2.2 : Hyperloop ulaşım sisteminin avantajları ve dezavantajları.....	62
Çizelge 3.1 : Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, Maglev ve Hyperloop sistemlerinin hızları.	65
Çizelge 3.2 : HT80001 YHT setinin ivmelenme tablosu.	66
Çizelge 3.3 : Maglev aracının hızlanması.....	66
Çizelge 3.4 : Hyperloop kapsülünün hızlanması.	66
Çizelge 3.5 : Temsili seyahat süreleri.....	67
Çizelge 3.6 : Ulaşım türlerinin kapasitesi.....	67
Çizelge 3.7 : Ulaşım türlerinin yıllık yolcu kapasitesi.	68
Çizelge 3.8 : Ulaşım türlerinin diğer modlarla uyumluluğu.....	68
Çizelge 3.9 : Ulaşım sistemlerinin güvenlik, güvenilirlik, konfor açısından değerlendirilmesi.....	70
Çizelge 3.10 : Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev ulaşım sistemlerinin gerekli yatay kurp yarıçapları.....	71
Çizelge 3.11 : Hyperloop Alpha raporunda öngörülen yatay kurp yarıçapları.....	71
Çizelge 3.12 : Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev ulaşım sistemlerinin gerekli düşey kurp yarıçapları.....	72
Çizelge 3.13 : Ulaşım sistemleri için gerekli maksimum deyer değerleri.....	72
Çizelge 3.14 : Bazı Yüksek Hızlı Demiryolları projelerinin inşa maliyetleri.	74
Çizelge 3.15 : Dünya genelindeki Maglev hatlarının ortalama inşa maliyetleri.	75
Çizelge 3.16 : Dünya genelindeki Hyperloop hatlarının ortalama inşa maliyetleri. .	76
Çizelge 3.17 : Ulaşım sistemlerinin arazi kullanımı.....	80
Çizelge 3.18 : Ulaşım sistemlerinin gürültü seviyeleri.....	81
Çizelge 4.1 : Karşılaştırma ölçeği.....	86
Çizelge 4.2 : Karşılaştırma matrislerinin boyutlarına göre IR değerleri.	87
Çizelge 4.3 : 500 km’lik mesafe için üç sistemin seyahat süresi ve kapasite tahmini.	94
Çizelge 4.4 : Ulaşım sistemlerinin sefer aralığı, araç kapasitesi, maksimum yolcu kapasitesi tahmini.....	95
Çizelge 4.5 : Genel performans ölçütünün değerlendirilmesi.	97
Çizelge 4.6 : Geometrik standartlar ölçütünün değerlendirilmesi.	101
Çizelge 4.7 : Maliyet ölçütünün değerlendirilmesi.	103
Çizelge 4.8 : Çevresel etkiler ölçütünün değerlendirilmesi.....	107
Çizelge 4.9 : Ana ölçütlerin ikili karşılaştırma matrisi.....	109
Çizelge 4.10 : Normalize edilmiş karar matrisi.	109
Çizelge 4.11 : Ana ölçütlerin önem ağırlıkları ve tutarlılık hesabı.....	109
Çizelge 4.12 : Alt ölçütlerin önem ağırlıkları ve tutarlılık hesabı.	110
Çizelge 4.13 : Alt ölçütlerin normalize karar matrisleri.	111
Çizelge 4.14 : Alt ölçütlerin önem ağırlıkları ve tutarlılık hesabı.	112
Çizelge 4.15 : Ölçütlerin son ağırlıkları.	113
Çizelge 4.16 : Karar matrisi.....	115
Çizelge 4.17 : Normalize karar matrisi.....	116
Çizelge 4.18 : Ağırlıklı normalize karar matrisi.....	117
Çizelge 4.19 : MOORA-oran yöntemine göre alternatiflerin sıralaması.....	118
Çizelge 4.20 : Ağırlıklı normalize karar matrisi ve referans noktalarına uzaklık. ..	119

Çizelge 4.21 : MOORA-referans noktası yaklaşımına göre alternatiflerin sıralaması.	121
Çizelge 4.22 : MOORA-referans noktası yaklaşımına göre alternatiflerin sıralaması.	122
Çizelge 4.23 : MULTIMOORA sonuçları.	122



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Maglev treninin çalışma prensibi.	41
Şekil 2.2 : EMS sisteminde manyetik levitasyon.	42
Şekil 2.3 : EDS sisteminde manyetik levitasyon.	42
Şekil 2.4 : EMS sisteminde yanıl kılavuzluk ilkesi.	43
Şekil 2.5 : EDS sisteminde yanıl kılavuzluk ilkesi	44
Şekil 2.6 : İtme prensibi.	45
Şekil 2.7 : İtme süreci ve seyahat alanı.	45
Şekil 2.8 : EMS sistemin uygulama türleri.	46
Şekil 2.9 : EDS sistemin uygulama türleri.	48
Şekil 2.10 : EDS ve EMS sistemleri.	49
Şekil 2.11 : Hyperloop ulaşım sisteminin çalışma mekanizması.	54
Şekil 2.12 : Hyperloop Alpha tüp tasarımı.	55
Şekil 2.13 : Hyperloop Alpha tüp tasarımı.	56
Şekil 2.14 : Hyperloop yolcu kapsülünün alt sistemleri.	57
Şekil 2.15 : Hyperloop yolcu kapsülü versiyonu.	58
Şekil 2.16 : Hyperloop manyetik kaldırma sistemi.	59
Şekil 2.17 : Üç boyutlu rotor ve stator gösterimi.	60
Şekil 2.18 : Lineer asenkron motoru içindeki manyetik alan.	60
Şekil 4.1 : MOORA yöntemi diyagramı.	89
Şekil 4.2 : Hiyerarşik yapı.	93
Şekil 4.3 : Yüksek Hızlı Demiryollarının tipik enkesiti.	99
Şekil 4.4 : Maglev hattının enkesiti.	100
Şekil 4.5 : Hyperloop yolcu kapsülünün tahmini enkesiti.	100
Şekil 4.6 : Yüksek hızlı tren ve Maglev aracının enerji tüketimi.	104
Şekil 4.7 : Yüksek hızlı tren ve Maglev aracının CO ₂ emisyonları.	105



YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Dünyadaki hızlı kentleşme süreciyle birlikte ulaşım modlarına olan talep artmıştır. Özellikle de yüksek hızlı ulaşım sistemlerine olan ilgi artmıştır. Daha yüksek hızlarda ulaşım sağlamak uzun süredir uğraş konusu olmuştur. Uzak mesafeli yolculuklarda seyahat süresini kısaltmak ve bununla birlikte seyahat maliyetlerini mümkün olduğunca düşürerek yüksek hız ve yenilikçi ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Yüksek hızlı izli ulaşım sistemleri sağladığı yüksek hız, konforlu ve güvenli seyahat imkanı, işletme güvenilirliği ile karayolu ve havayolu taşımacılığına bir alternatif oluşturmıştır. Bu bağlamda, günümüzde yaygın olarak kullanılan Yüksek Hızlı Demiryolu (YHD) teknolojisi ile birlikte Maglev ve Hyperloop gibi yenilikçi sistemler de geliştirilmeye başlanmıştır.

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, 20. yüzyılın ikinci yarısında ortaya çıkan ve geleneksel demiryolu sistemlerine kıyasla çok daha yüksek hızlarda seyahat edebilen tren sistemleridir. Bu sistemler, Japonya'nın Shinkansen'i, Fransa'nın TGV'si ve Almanya'nın ICE'si gibi başarılı örneklerle dünya genelinde yaygınlaşmıştır. Türkiye'de 2009 yılında Ankara-Eskişehir hattının açılmasıyla, ülkemizde yüksek hızlı demiryolu teknolojisi kullanılmaya başlamıştır. Avrupa'da ve diğer bölgelerde de yüksek hızlı demiryolu ağlarının genişlemesiyle bu sistemlerin etkinliği kanıtlanmıştır. Türkiye'de de yüksek hızlı demiryolu hatlarının artması, ülkenin ulaşım altyapısında önemli bir gelişmeyi temsil etmektedir. Yüksek hızlı demiryolların, mevcut hatlarda 200km/sa ve yeni inşa edilen hatlar için 250 km/sa üzerindeki hızlarda çalışabilen trenlerin kullanıldığı özel olarak inşa edilmiş veya iyileştirilmiş hatlarda işletilen sistemlerdir. Yüksek hızlı demiryollarının en büyük avantajlarından biri, yüksek yolcu kapasitesi ve şehir merkezlerini birbirine bağlayarak şehir içi ve şehirler arası yolculuk sürelerini önemli ölçüde kısaltmasıdır. Ayrıca, bu sistemler, karayolu ve havayolu ulaşımına kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olup, çevre dostu bir alternatif sunmaktadır.

Maglev trenleri, manyetik kaldırma prensibiyle çalışan tekerleksiz ulaşım araçlarıdır. Manyetik alanlar kullanarak sürtünmeyi azaltan bu trenler, yüksek hızlara ulaşabilme potansiyeline sahiptir. Maglev teknolojisi, tarihsel olarak 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır ve Japonya, Almanya ve Çin gibi ülkelerde geliştirilmiştir. Levitasyon prensibi, mıknatısın aynı kutuplarının birbirini çekmesi ve zıt kutupların birbirini itmesi prensibinin araçları havada tutmak için kullanılmasını içermektedir. Maglev trenlerinde yanal kılavuzluk ilkesi, manyetik alanların kontrolüyle sağlanır. Maglev ulaşım sistemlerinin elektromanyetik süspansiyon (EMS) ve elektrodinamik süspansiyon (EDS) olmak üzere iki farklı teknoloji bulunmaktadır. EMS, manyetik çekim kuvvetiyle levitasyon sağlar, ancak doğrusallığı ve kararsızlığı nedeniyle bazı dezavantajlara sahiptir. EDS ise manyetik itme kuvvetleriyle treni havada taşımaktadır ve daha yüksek hızlara ulaşabilir, ancak daha karmaşıktır ve başlangıçta tekerlekler kullanılması gerekmektedir. EMS ve EDS sistemleri arasında farklı avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. EDS, daha yüksek hızlar için daha uygun olabilirken, EMS sistemi enerji tüketimi açısından avantajlıdır. Ayrıca, EMS trenlerin hızı için bir asgariye ihtiyaç duymazken, EDS için belirli bir hız gereklidir. Maglev trenleri, temiz ve sessiz toplu taşıma seçenekleri olarak bilinir. Yüksek başlangıç maliyetleri ve sınırlı

uyumlulukları gibi dezavantajlar da vardır. Sürekli araştırma ve geliştirme, bu dezavantajların üstesinden gelmek için önemlidir.

Hyperloop ulaşım sistemi ilk olarak Elon Musk tarafından 2013 yılında beşinci ulaşım modu olarak gündeme gelmiştir. Hala kavramsal aşamada olan Hyperloop fikri ilk olarak 1910'larda Amerikalı roket bilimci Robert Goddard tarafından tünel içinde yüzen vakum treni olarak ortaya atılmıştır. Hyperloop teknolojinin çalışma prensibi, kapsüllerin düşük basınçlı bir tüpte lineer asenkron motorlarla sürtünmeyi ve hava direncini en aza indirerek 1220 km/saat gibi çok yüksek hızlara ulaşmasıdır. Hyperloop teknolojisinin çalışma prensibi, manyetik kaldırma ilkesine dayanır ve yüksek hızlarda seyahat eden otonom kapsüllerin düşük hava basıncına sahip tüplerde taşınmasını içermektedir. Kapsüller, hava sürtünmesini en aza indirerek araçların ses üstü hızlara ulaşmasını sağlamaktadır. Yolcu veya yük taşımak için kullanılan kapsüller ve bunların hareket ettiği tüpler sistemin temel bileşenleridir. Tüpler, vakumlanmış silindir şeklinde tasarlanır ve kapsüllerin etrafındaki hava akışını sağlamaktadır. Kapsüllerin tasarımında, sürtünmeyi azaltmak için aerodinamik yapılar kullanılır ve iç kısımları yolcu konforunu ön planda tutacak şekilde düzenlenmektedir. Hyperloop'un yapı özellikleri, tüp geometrisi, kapsül tasarımı ve istasyonların yapısı gibi unsurları içermektedir. Tüplerin yapı malzemesi çelikten olup, pilonlarla desteklenir ve arazi kullanımını azaltmak için prefabrik kolonlar üzerine inşa edilmektedir. Kapsüllerin tasarımı, hava direncini azaltmak ve yüksek hızlara ulaşmak için optimize edilmiştir. Yolcu kapsüllerinin iç tasarımı, konfor ve güvenlik açısından özenle planlanmıştır. Hyperloop'un avantajları arasında yüksek hız kabiliyeti, enerji verimliliği, kısa seyahat süreleri, sürdürülebilir ulaşım ve trafik sorununun olmaması gibi unsurlar yer almaktadır. Ancak, güvenlik endişeleri, yüksek ilk yatırım maliyeti, teknik fizibilite zorlukları ve kamu kabulü gibi dezavantajlar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Üç yüksek hızlı izli taşıma sisteminin teknik gereksinimleri ve çalışma prensipleri birbirlerinden farklıdır. Her sistemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu sistemler farklı yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme literatürde bulunan bilgiler esas alınarak yapılmıştır. Hangi sistem veya teknolojinin tercih edilmesi gerektiği konusunda karar vermek karmaşık bir süreçtir. Bu süreçte dikkate alınması gereken bir dizi önemli ölçüt bulunmaktadır. Yüksek hızlı ulaşım sistemlerinin değerlendirilmesi için genel performans özellikleri, geometrik standartları, maliyet ve çevresel etkiler olmak üzere dört adet ana ölçüt belirlenmiştir. Hız, sefer aralığı, kapasite, hızlanma ivmesi, seyahat süresi, mevcut sistemler ile uyumluluk, istasyonlar arası mesafe, minimum yatay kurp yarıçapı, minimum düşey kurp yarıçapı, deyer, maksimum boyuna eğim, enkesit genişliği, inşa maliyeti, altyapı işletme ve bakım maliyeti, araç işletme ve bakım maliyeti, enerji tüketimi, sera gazı emisyonu, elektrikleşme şekli, gürültü, titreşim, arazi kullanımı olmak üzere toplam 21 alt ölçüte yer verilmiştir.

Öncelikle Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemlerinden olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen kriter ağırlıklarında en önemli ana kriter genel performans özellikleri olarak belirlenmesine rağmen maliyet ana ölçütünün inşa maliyeti, altyapı işletme ve bakım maliyeti en önemli alt ölçütler olmuştur. Arazi kullanımı, titreşim ve enkesit genişliği ise en az öneme sahip alt kriterler olarak belirlenmiştir.

Daha sonra belirlenen ölçütlere göre alternatifler ÇÖKV yöntemlerinden olan MOORA yönteminin farklı adımları olan MOORA-Oran yöntemi, Referans Noktası Yaklaşımı, Tam çarpım Formu Yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. MOORA yöntemlerinin her biri farklı kriter ve hesaplama yöntemlerine odaklandığından, her

yöntemde farklı sonuçlar ortaya çıkmış, ancak elde edilen sıralamalar MULTIMOORA yöntemi ile bir araya getirilerek nihai sıralama yapılmıştır. MULTIMOORA yöntemi, üç farklı MOORA yönteminin sonuçlarını birleştirerek daha dengeli ve kapsamlı bir sıralama sunmaktadır. Bu kapsamlı değerlendirme sonucunda Hyperloop, genel performans ve ölçüt değerlendirmelerinde en yüksek puanı alarak birinci sırada yer almıştır. Bu durum, Hyperloop'un yenilikçi teknolojisi, yüksek performans potansiyeli ve çevresel etkiler avantajı sayesinde diğer alternatiflere göre daha üstün bir seçenek olduğunu göstermektedir. Yüksek Hızlı Demiryolları, dengeli performansı ve düşük inşaa maliyeti etkinliği ile ikinci sırada yer alırken, Maglev yüksek inşaa maliyetleri, düşük çevresel etkiler performansı nedeniyle üçüncü sırada yer almıştır. Hyperloop yüksek bakım maliyetlerine, mevcut sistemler ile uyumlu olmamasına rağmen yapılan değerlendirmede sağladığı hız, seyahat süresi ve minimum çevresel etkileriyle en iyi performansa sahip seçenek olarak görülmektedir. Ancak Hyperloop ulaşım sisteminin hala teorik bir teknoloji olması ve henüz aktif bir işletmesinin bulunmaması unutulmamalıdır. Bu çalışmanın, karar vericilerin projelerini planlarken hangi alternatifin daha avantajlı olacağını belirlemelerine yardımcı olması amaçlanmıştır.



MULTI-CRITERIA EVALUATION OF HIGH SPEED TRACKED TRANSPORT SYSTEMS

SUMMARY

With the rapid urbanisation process in the world, the demand for transport modes has increased. In particular, interest in high-speed transport systems has increased. Providing transport at higher speeds has been a subject of endeavour for a long time. It has become important to shorten the travel time for long distance journeys and to develop high speed and innovative transport systems by reducing travel costs as much as possible. High-speed tracked transport systems have become an alternative to road and air transport with their high speed, comfortable and safe travel and operational reliability. In this context, innovative systems such as Maglev and Hyperloop have started to be developed along with High Speed Rail (HSR) technology, which is widely used today.

Conventional high-speed railways are train systems that emerged in the second half of the 20th century and can travel at much higher speeds compared to conventional railway systems. These systems have become widespread around the world with successful examples such as Japan's Shinkansen, France's TGV and Germany's ICE. With the opening of the Ankara-Eskişehir line in Turkey in 2009, high-speed railway technology has started to be used in our country. With the expansion of high-speed railway networks in Europe and other regions, the effectiveness of these systems has been proven. The increase of high-speed railway lines in Turkey represents an important development in the transport infrastructure of the country. High-speed railways are systems that operate on specially constructed or upgraded lines using trains capable of operating at speeds above 200 km/h on existing lines and 250 km/h for newly constructed lines. One of the major advantages of high-speed railways is their high passenger capacity and the ability to connect city centres, significantly shortening journey times within and between cities. In addition, these systems have a lower carbon footprint compared to road and air transport and offer an environmentally friendly alternative.

Maglev trains are wheelless transport vehicles operating on the principle of magnetic levitation. By reducing friction using magnetic fields, these trains have the potential to reach high speeds. Maglev technology dates back to the early 20th century and was developed in countries such as Japan, Germany and China. The principle of levitation involves using the principle that the same poles of a magnet attract each other and the opposite poles repel each other to keep the vehicles in the air. The principle of lateral guidance in Maglev trains is achieved by controlling magnetic fields. Maglev transport systems have two different technologies: electromagnetic suspension (EMS) and electrodynamic suspension (EDS). EMS provides levitation by magnetic attraction, but has some disadvantages due to its linearity and instability. EDS, on the other hand, levitates the train by magnetic repulsion and can reach higher speeds, but is more complex and initially requires the use of wheels. There are different advantages and disadvantages between EMS and EDS systems. While EDS may be more suitable for higher speeds, the EMS system is advantageous in terms of energy consumption. Also, EMS does not require a minimum for the speed of the trains, while EDS requires a certain speed. Maglev trains are known as clean and quiet public transport options. There are also disadvantages, such as their high initial costs and limited compatibility. Continuous research and development is important to overcome these disadvantages.

Hyperloop transport system was first proposed by Elon Musk in 2013 as the fifth mode of transport. The idea of Hyperloop, which is still in the conceptual stage, was first put forward by American rocket scientist Robert Goddard in the 1910s as a floating vacuum train in the tunnel. The working principle of Hyperloop technology is that the capsules reach very high speeds of 1220 km/h by minimising friction and air resistance with linear asynchronous motors in a low-pressure tube. The working principle of Hyperloop technology is based on the principle of magnetic levitation and involves the transport of autonomous capsules travelling at high speeds in tubes with low air pressure. The capsules minimise air friction, allowing vehicles to reach supersonic speeds. The capsules used to carry passengers or cargo and the tubes in which they move are the basic components of the system. The tubes are designed as vacuumised cylinders and provide the air flow around the capsules. In the design of the capsules, aerodynamic structures are used to reduce friction and the interiors are organised to prioritise passenger comfort. Hyperloop's structural features include elements such as tube geometry, capsule design and the structure of the stations. The construction material of the tubes is steel, supported by pylons and built on prefabricated columns to reduce land use. The design of the capsules is optimised to reduce air resistance and achieve high speeds. The interior design of the passenger capsules has been carefully planned for comfort and safety. The advantages of Hyperloop include high speed capability, energy efficiency, short journey times, sustainable transport and no traffic problems. However, disadvantages such as safety concerns, high initial investment cost, technical feasibility challenges and public acceptance should also be considered. The technical requirements and operating principles of the three high-speed tracked transport systems are different from each other. Each system has its own advantages and disadvantages. These systems have been compared and evaluated with different approaches. This evaluation is based on the information available in the literature. Deciding which system or technology should be preferred is a complex process. There are a number of important criteria to be considered in this process. Four main criteria have been identified for the evaluation of high speed transport systems: general performance characteristics, geometric standards, cost and environmental impacts. A total of 21 sub-criteria including speed, travel interval, capacity, acceleration, travel time, compatibility with existing systems, distance between stations, minimum horizontal curve radius, minimum vertical curve radius, curve, maximum longitudinal slope, cross-section width, construction cost, infrastructure operation and maintenance cost, vehicle operation and maintenance cost, energy consumption, greenhouse gas emission, electrification pattern, noise, vibration, land use were included.

Firstly, the criteria weights were determined by Analytical Hierarchy Process (AHP) method, which is one of the Multi-criteria Decision Making (MCDM) methods. Although the most important main criterion in the obtained criterion weights was determined as general performance characteristics, the most important sub-criteria were the construction cost, infrastructure operation and maintenance cost of the cost main criterion. Land use, vibration and cross-section width were determined as the least important sub-criteria.

Then, the alternatives were evaluated according to the determined criteria by using the different steps of the MOORA method, which is one of the CRM methods, namely MOORA-Ratio method, Reference Point Approach, Exact Product Form Approach. Since each of the MOORA methods focuses on different criteria and calculation methods, different results were obtained in each method, but the final ranking was made by combining the rankings obtained with the MULTIMOORA method. The

MULTIMOORA method provides a more balanced and comprehensive ranking by combining the results of three different MOORA methods. As a result of this comprehensive evaluation, Hyperloop ranked first in the overall performance and criteria evaluations with the highest score. This shows that Hyperloop is a superior option compared to other alternatives due to its innovative technology, high performance potential and environmental impact advantages. High-Speed Railways ranked second due to its balanced performance and low construction cost effectiveness, while Maglev ranked third due to its high construction costs and low environmental impact performance. Although Hyperloop has high maintenance costs and is not compatible with existing systems, it is seen as the best performing option with its speed, travel time and minimal environmental impacts. However, it should be noted that the Hyperloop transport system is still a theoretical technology and there is no active operation yet. This study is intended to help decision makers determine which alternative will be more advantageous when planning their projects.





1. GİRİŞ

Ulaşım sistemleri, modern toplumların ekonomik ve sosyal yapılarının temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Sanayi devrimi ile başlayan hızlı gelişim süreci, ulaşım altyapısının ve teknolojilerinin hızla evrilmesine neden olmuştur. Günümüzde ise küreselleşme, şehirleşme ve nüfus artışı gibi faktörler, daha hızlı, verimli ve çevre dostu ulaşım sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Dünya genelindeki hızlı kentleşme süreci, ulaşım modlarına olan talebi artırmış ve bu da karayolu ve havayolu ulaşımında sıkışıklıklara neden olmuştur. Bu durum, birçok ülkede demiryolu ulaşım sistemlerine, özellikle de yüksek hızlı ulaşım sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda, yüksek hızlı izli ulaşım sistemleri, geliştirilmesi önem kazanmıştır. Yüksek hızlı izli ulaşım sistemleri kullanılan teknolojiye göre Yüksek hızlı demiryolları, Maglev ve Hyperloop olarak üçe ayrılmaktadır. Bu sistemler geleceğin ulaşım ihtiyaçlarına yanıt verebilecek potansiyele sahip yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, 20. yüzyılın ikinci yarısında ortaya çıkan ve geleneksel demiryolu sistemlerine kıyasla çok daha yüksek hızlarda seyahat edebilen tren sistemleridir. Bu sistemler, Japonya'nın Shinkansen'i, Fransa'nın TGV'si ve Almanya'nın ICE'si gibi başarılı örneklerle dünya genelinde yaygınlaşmıştır. Türkiye'de 2009 yılında Ankara-Eskişehir hattının açılmasıyla, ülkemizde yüksek hızlı demiryolu teknolojisi kullanılmaya başlamıştır. Avrupa'da ve diğer bölgelerde de yüksek hızlı demiryolu ağlarının genişlemesiyle bu sistemlerin etkinliği kanıtlanmıştır. Türkiye'de de yüksek hızlı demiryolu hatlarının artması, ülkenin ulaşım altyapısında önemli bir gelişmeyi temsil etmektedir. Yüksek hızlı demiryolların, mevcut hatlarda 200km/sa ve yeni inşa edilen hatlar için 250 km/sa üzerindeki hızlarda çalışabilen trenlerin kullanıldığı özel olarak inşa edilmiş veya iyileştirilmiş hatlarda işletilen sistemlerdir. Yüksek hızlı demiryollarının en büyük avantajlarından biri, yüksek yolcu kapasitesi ve şehir merkezlerini birbirine bağlayarak şehir içi ve şehirler arası yolculuk sürelerini önemli ölçüde kısaltmasıdır. Ayrıca, bu sistemler, karayolu ve havayolu ulaşımına kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip olup, çevre dostu bir alternatif

sunmaktadır. Ancak, yüksek hızlı demiryollarının inşa maliyetleri ve bakım gereksinimleri, dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir.

Maglev (Manyetik Levitasyon) sistemleri, manyetik kuvvetler kullanılarak trenlerin raylar üzerinde temas etmeden havada tutulduğu ve ileri doğru itildiği ileri teknoloji ulaşım sistemleridir. İlk olarak 20. yüzyılın ortalarında teorik olarak ortaya atılan bu teknoloji, 21. yüzyılda çeşitli prototipler ve operasyonel sistemlerle hayata geçirilmiştir. Japonya'nın SC Maglev ve Çin'in Şanghay Maglev Treni, bu teknolojinin başarılı örneklerindendir. İlk yüksek hızlı Maglev hattı 2004 yılında işletmeye açılan Shanghai Maglev hattıdır. Hat Longyang Lu- Pudong Uluslararası Havalimanı arasında hizmet vermektedir. Hattın uzunluğu yaklaşık 30 km'dir.

Maglev ulaşım sistemlerinin elektromanyetik süspansiyon (EMS) ve elektrodinamik süspansiyon (EDS) olmak üzere iki ana teknikten oluşmaktadır. EMS, manyetik çekim kuvvetiyle levitasyon sağlar, ancak doğrusallığı ve kararsızlığı nedeniyle bazı dezavantajlara sahiptir. EDS ise manyetik itme kuvvetleriyle treni havada taşır ve daha yüksek hızlara ulaşabilir, ancak daha karmaşıktır ve başlangıçta tekerlekler kullanılması gerekebilir.

Maglev trenleri, manyetik levitasyon sayesinde sürtünme kuvvetlerinin neredeyse tamamen ortadan kalkmasıyla çok yüksek hızlara ulaşabilmektedir. Örneğin, Japonya'nın SC Maglev treni 603 km/saat hıza ulaşarak dünya rekorunu elinde bulundurmaktadır. Bu sistemlerin bir diğer avantajı, sessiz çalışmaları ve düşük araç bakım gereksinimleri ile uzun vadede ekonomik avantajlar sunabilmesidir. Ancak, Maglev sistemlerinin yüksek inşa maliyetleri ve karmaşık teknoloji gereksinimleri, geniş ölçekli uygulamalarının önündeki en büyük engellerden biridir.

Hyperloop, ilk olarak Elon Musk tarafından 2013 yılında önerilen ve son yıllarda çeşitli şirketler tarafından geliştirilme yenilikçi bir ulaşım konseptidir. Hyperloop sistemleri, düşük basınçlı tüpler içerisinde hareket eden kapsüller kullanarak çok yüksek hızlarda yolcu ve yük taşımayı amaçlamaktadır. Bu sistemde, kapsüller manyetik kuvvetler veya hava basıncı kullanılarak hızlandırılmakta ve sürtünmesiz bir ortamda hareket etmektedir.

Hyperloop'un teorik olarak 1000 km/saat ve üzeri hızlara ulaşabileceği öngörülmektedir. Bu hızlar, şehirler arası yolculuk sürelerini dramatik bir şekilde azaltarak hava yolu ulaşımına ciddi bir alternatif olma potansiyeli taşımaktadır.

Ayrıca, Hyperloop sistemleri enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu teknoloji henüz geliştirme aşamalarında olup, ticari kullanıma geçişi için ciddi mühendislik ve güvenlik zorluklarının aşılması gerekmektedir.

Her bir ulaşım sisteminin avantajlarını ve dezavantajlarını göz önünde bulundurulmalıdır. Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, güvenilirlik ve kapasite açısından öne çıkarken, Maglev ve Hyperloop daha yüksek hızlar ve potansiyel olarak düşük işletme maliyetleri sunar. Ancak, Hyperloop'un henüz ticari kullanımda olmaması ve maliyetlerin tam olarak belirlenmemiş olması önemli bir faktördür. Bu nedenle, her bir ulaşım sisteminin belirli koşullar altında uygun olabileceğini düşünmek önemlidir. Örneğin, yoğun bir şehir içi trafiği olan bir bölgede Hyperloop gibi yüksek hızlı, düşük maliyetli bir sistem tercih edilebilirken, uzun mesafeli seyahatler için konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları daha uygun olabilir. Bu kararlar, maliyet, hız, kapasite ve diğer faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesini gerektirir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop sistemleri çok ölçütlü bir değerlendirme sürecinden geçirilerek karşılaştırılacaktır. Genel performans özellikleri, geometrik standartlar, maliyetler ve çevresel etkiler ölçütleri üzerinden yapılacak bu değerlendirme, gelecekteki ulaşım projeleri için karar vericilere rehberlik etmeyi amaçlamaktadır. Ulaşım sistemlerinin mevcut durumu ve gelecekteki potansiyelleri üzerine yapılan bu kapsamlı analiz, yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin seçiminde kritik bir rol oynayacaktır.

Tezde önce yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin neler olduğu ve ortaya çıkış sebepleri anlatılıp, üç farklı yüksek hızlı izli ulaşım sisteminin teknolojisi, tarihsel süreci, çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Çok ölçütlü değerlendirmede kullanılacak yöntemler, ölçütler ve ölçüt değerleri açıklanıp, ölçütlerin ağırlıkları hesaplanmış, daha sonra alternatifler arasında bir sıralama yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



2. YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Dünya genelinde hızlı kentleşme sürecinin sonucu olarak, ulaşım modlarına talep artmıştır. Bu artan taleple birlikte, karayolu ve havayolu ulaşım modlarında sıkışıklıklar ve gecikmeler meydana gelmiştir. Bu durum, birçok ülkede demiryolu ulaşım sistemine, özellikle de yüksek hızlı ulaşım sistemlerine yapılan yatırımların artmasına neden olmuştur. Bu sebeple yüksek hızlı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi ve hayata geçirilmesi önemli bir çalışma konusu olmuştur. Bu bağlamda yapılan çalışmalarla geleneksel demiryolu teknolojisi hız ve verimlilik açısından geliştirilmiş, konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları ile daha yüksek standartlara ulaşılmıştır. Bir diğer sistem olan Maglev (Manyetik Levitasyon) sistemleri ile trenlerin raylar yerine manyetik alanlar kullanarak daha yüksek hızlara ulaşmasına izin verilmiştir. Diğer taraftan Hyperloop son zamanlarda, kapsüllerin vakum tüpleri içinde yüksek hızlarda seyahat etmesini vaat eden bir sistem olarak ilgi odağı olmuştur [1].

2.1 Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları

Yüksek hızlı demiryolu teknolojisi, bir ülkenin teknolojik ilerlemesini yansıtan önemli bir ölçüttür. 20. yüzyılın ikinci yarısında, yüksek hızlı demiryolu teknolojisi gelişmiş ve yolcu taşımacılığında önemli bir teknolojik ilerleme olmuştur. Geleneksel demiryolu sistemlerine göre daha yüksek hızlarda hareket eden konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, bu amaçla özel olarak tasarlanmıştır. Bu sistemler, genellikle 250 km/saat ve üzeri hızlara ulaşabilen gelişmiş altyapı ve mühendislik yöntemleriyle desteklenmiştir. Trenlerin düşük sürtünme ve stabilite ile yüksek hızlarda seyahat etmesini sağlayan standart raylar ve aerodinamik vagonlar gibi özel tasarlanmış bileşenleri vardır.

Yüksek hızlı demiryolları, bir ülkenin teknolojik ilerlemesini yansıtan önemli bir ölçüt olarak kabul edilmiştir. Bu sistemler hem azalan yolculuk süreleri hem de konforlu ve güvenli bir yolculuk deneyimi sunmaları ile ülkelerin ulaşım politikalarını belirlerken

dikkat çeken bir seçenek olmuştur. Ülkemizde de yüksek hızlı demiryolu hatlarının artırılması ve yolcu taşımacılığında önemli bir yer tutması hedeflenmiştir [1].

2.1.1 Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları'nın tarihsel gelişimi

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolu sistemlerinin ortaya çıkışı 20. Yüzyılın ortalarına dayanmaktadır. İlk yüksek hızlı demiryolu hatları, Japonya'da Shinkansen ve Fransa'da TGV gibi sistemlerle tanıtılmıştır [2]. Bu sistemler, daha sonra Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolu sistemlerinin dünya çapında yaygınlaşmasına ve gelişmesine teknolojik gelişmeler ve altyapı yatırımları katkıda bulunmuştur. Yüksek hızlı demiryollarını tanımlamak, sadece bir faktöre dayanmamaktadır; bu sistemler, çeken ve çekilen araçlar, altyapı, işletim sistemi gibi birçok bileşenin karmaşık bir birleşimiyle oluşmuştur.

Dünyanın ilk yüksek hızlı tren hattı olan Tokaido Shinkansen hattı 1964 yılında Japonya'da Tokyo ve Osaka arasında hizmete açılmıştır. Bu hat 515 kilometre uzunluğunda, standart hat açıklığında (rayların iç kenarları arasındaki açıklığı 1.435 mm) ve 210 km/sa hıza ulaşabilecek şekilde inşa edilmiştir [1]. Japon hükümeti, Shinkansen'in başarısının ardından ülke genelinde birçok yüksek hızlı demiryolu hattı inşa etmiştir. Bu projeler, Japonya'nın demiryolu ulaşımında öncü bir konuma yükselmesini sağlamış ve dünya genelinde diğer ülkeleri de benzer projeler geliştirmeye teşvik etmiştir [3].

Avrupa'da ise ilk yüksek hızlı demiryolu hattı 1981 yılında Paris ve Lyon arasında işletmeye açılmıştır. Bu hat maksimum 260 km/saat hız yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu hattın faaliyete geçmesiyle Avrupa'da yüksek hızlı demiryolu taşımacılığında hızlı bir gelişme yaşanmıştır. Günümüzde Fransız TGV Hatları 300-320 km/saat'e varan hızlara ulaşmıştır. Bu gelişmeler, yüksek hızlı demiryolu teknolojisinin dünya çapında yayılmasını hızlandırmıştır. Amerika Birleşik Devletleri, Güney Kore, Tayvan ve Çin gibi ülkeler, kendi yüksek hızlı demiryolu projelerini geliştirerek bu alanda önemli bir rol oynamışlardır.

Çin, konvansiyonel yüksek hızlı demiryolu teknolojisine yeni bir boyut ve bakış açısı kazandırmıştır. Çin, bu alanda çalışmalara 1990'ların ikinci yarısında başlamasına rağmen en hızlı gelişme gösteren ülke olarak adlandırılmıştır. Bu gelişmenin ilk adımı, Pekin ile Tianjin arasında açılan 120 kilometrelik hat olmuştur [1]. Asya kıtasında hizmet veren yüksek hızlı hatlar sadece Çin ve Japonya'da değil, Tayvan ve Güney

Kore’de bunların arasındadır. Amerika Birleşik Devletleri’nde ise ilk yüksek hızlı demiryolu hattı 2000 yılında Washington-Boston arasında azami 240 km/saat hıza ulaşacak şekilde işletmeye açılmıştır [4].

Türkiye’de yüksek hızlı demiryolu, 2003’te TCDD tarafından Ankara – İstanbul arasında 250 kilometre/saat azami hıza uygun olacak şekilde inşasına başlanmıştır. Hattın ilk etabı olan Ankara- Eskişehir hattında deneme seferlerine başlanmıştır. Uzunluğu 245 kilometre olan hatta ilk ticari sefer 13 Mart 2009’da yapılmıştır [5]. Bu hattın açılması Türkiye’nin bu alandaki ilk adımı olmuştur. Ankara-Eskişehir hattının başarısı, hızlı tren ağının genişlemesini ve Türkiye’nin yüksek hızlı demiryolu projelerine olan ilgisini artırmıştır. 2014 yılında Ankara ile İstanbul arasında yapılan yüksek hızlı tren hattının açılması, ülkenin en büyük şehirleri arasındaki ulaşımı büyük ölçüde kolaylaştırmıştır. 26 Nisan 2023’te ise 250 kilometre/saat azami hıza uygun Ankara – Sivas yüksek hızlı demiryolu hizmete girmiştir. Türkiye, yüksek hızlı demiryolu ağını sürekli olarak genişletme ve geliştirme çalışmalarını sürdürmektedir. Bugün, konvansiyonel yüksek hızlı demiryolu sistemleri dünya çapında önemli bir ulaşım alternatifi olarak görülmekte ve sürekli olarak geliştirilmektedir [6].

2.1.2 Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları’nın teknolojik gereksinimleri

Modern ulaşım altyapısının önemli bir parçası olan konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, birçok teknolojik unsurdan oluşmaktadır. Yüksek hızlarda seyahat eden trenlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için bu sistemler çeşitli altyapısal ve teknolojik özelliklere sahiptir. Yüksek hızlı trenler teknolojinin bir parçasıdır. Bu trenler, aerodinamik tasarımları, güçlü fren sistemleri, hızlı ivmelenme ve durma yetenekleri ve yüksek hızlarda seyahat edebilecek şekilde optimize edilmiş motorlara sahiptir. Ayrıca, modern iç mekan tasarımları ve hızlı internet gibi hizmetler, müşterilerin rahatlığını artırmaktadır. Yüksek hızlı demiryolu hatlarının geometrik standartları, trenlerin yüksek hızlarda hareket etmesini sağlamaktadır. Bu standartlar, rayların düzgün bir şekilde döşenmesi, eğimlerin ve dönüşlerin ideal bir şekilde tasarlanması ve düzenli olarak ray bakımının yapılması gibi etkenleri içermektedir. Geometrik standartların bir parçası da, hattın topografik özelliklerine göre uygun hız limitlerini belirlemektir.

Yüksek hızlı demiryolu sistemlerinin işletilmesi için gerekli olan fiziksel yapıları ve tesisleri içeren altyapı gereksinimleri bulunmaktadır. Bu, köprüler, tüneller,

istasyonlar, sinyalizasyon sistemleri, raylar, balast, rayların üzerindeki beton veya asfalt tabakası ve rayların altındaki stabilizasyon tabakasını içermektedir. Trenlerin güvenli bir şekilde seyahat etmesini ve yolcuların konforunu artırmak için bu altyapı bileşenleri titizlikle planlanmalı ve inşa edilmelidir.

2.1.3 Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları'nın avantajları ve dezavantajları

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarının bir dizi avantaj ve dezavantaj. Bu sistemlerin avantajları arasında; çevre dostu olmaları, enerji verimliliği sağlamaları ve yüksek hızda seyahat etmeleri bulunmaktadır. Geleneksel karayolu ve havayolu ulaşımıyla karşılaştırıldığında, yüksek hızlı demiryolları daha hızlı seyahat süreleri sağlamakta ve böylelikle zaman tasarrufu sağlamaktadırlar. Ek olarak, yüksek hızlı trenlerin elektrikle çalışması, karbondioksit salınımının ve bunun çevreye olan etkilerinin azalmasına yardımcı olmaktadır. Böylece iklim değişikliğiyle mücadelede çok önemli görülmektedir. Yüksek hızlı demiryolları, yoğun trafikli bölgelerde trafik sıkışıklığını azaltarak hem şehir içi hem de şehirler arası ulaşım için daha verimli bir yol sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu tür sistemlerin yapım, işletme maliyetleri oldukça pahalıdır. Ek olarak, yeni hatların inşası, arazi kullanımı nedeniyle toprak kayması gibi çevresel etkilere neden olabilmekte, bu da halk arasında endişe yaratabilmektedir. Ek olarak, yüksek hızlı demiryolları belirli rotalarda ekonomik olarak sürdürülebilir olmamakla birlikte bazı bölgelerde yolcu talebini karşılamakta zorlanabilmektedir.

Yüksek hızlı demiryolu projelerinin hem avantajlarının hem de dezavantajlarının dikkate alınması önemlidir. Bu sayede, sürdürülebilir ve verimli bir ulaşım altyapısı oluşturmak mümkün olacaktır.

2.2 Maglev (Manyetik Levitasyon Treni)

Maglev trenleri, manyetik levitasyon trenlerinin kısaltmasıdır. Tekerleksiz olarak çalışan yenilikçi bir ulaşım aracıdır. Bu araçlar rayların üzerinde asılı kalmak için tekerlek yerine fiziksel temas ihtiyacını ortadan kaldırarak sürtünmeyi azaltan manyetik alanları kullanmaktadır. Maglev trenleri, bu özel itme yöntemi sebebiyle modern taşıma sistemleri içinde ilgi çekici bir seçenektir çünkü yüksek hızlara ulaşabilmektedirler. Maglev teknolojisi, manyetik kuvvetle havaya yükselme prensibini kullanmaktadır. Fiziksel bir temas olmadan bir aracın kılavuz bir yol

boyunca manyetik kuvvetler tarafından kaldırılıp itilmesini içerir. Bu teknolojiye kullanılan bir küme mıknatıs, aracın takip ettiği yol boyunca treni raylardan iterken diğer mıknatıs kümesi sürtünme kuvveti olmadan treni ileri doğru itmektedir. Böylece trenin havaya kaldırılmasını sağlamıştır [1].

Maglev trenleri, yüksek hızlar, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik potansiyeline sahip, ileri teknoloji bir ulaşım çözümünü temsil etmektedir. Alanındaki devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, maglev tren sistemlerinin performansını, güvenliğini ve operasyonel verimliliğini artırmaya devam ederek, onları geleceğin umut vadeden bir ulaşım modu olarak konumlandırmaktadır.

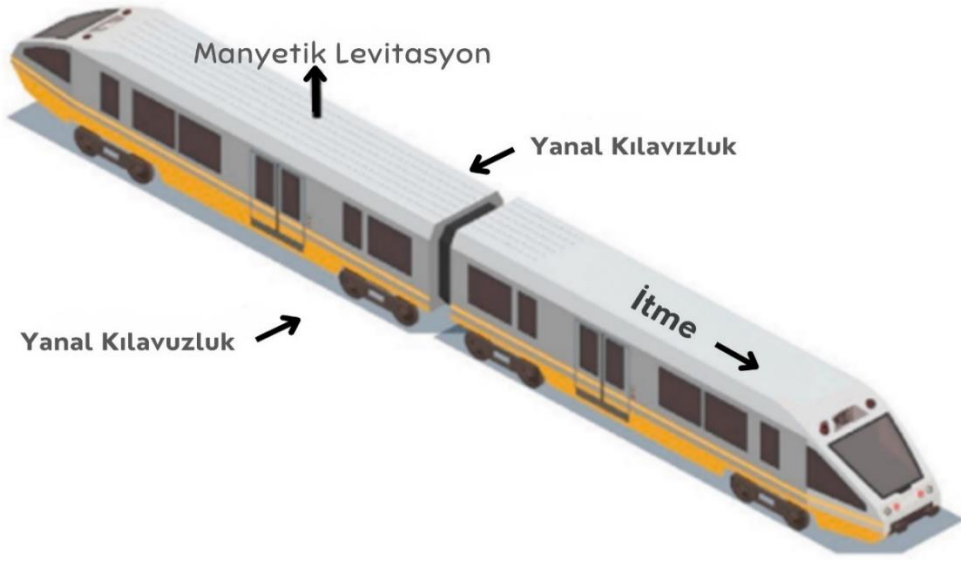
2.2.1 Maglev teknolojinin tarihsel gelişimi

Maglev teknolojisinin ortaya çıkışı, 20. Yüzyılın başlarında elektromanyetik süspansiyon cihazlarının geliştirilmesine dayanmaktadır. 1900'lerin başlarında, Amerikalı Robert Goddard ve Emile Bachelet tarafından yüksek hızlı ulaşım için manyetik levitasyon teknolojisini kullanma konsepti önerilmiştir. Fakat bu konsept dönemin teknolojik sınırlarından dolayı süper iletken mıknatısların icadına kadar atıl durumda kalmıştır. Hermann Kemper, uçakların ve trenlerin avantajlarını birleştirerek ulaşımında manyetik alanların kullanımı üzerine araştırmalarına 1922 yılında başladı. 1933 yılında elektromanyetik çekim prensibine dayalı bir yüzen araç için teknik bir konsept oluşturmayı başarmış ve bu konseple 1934 yılında patent almıştır. Hermann çalışmalarına devam etmiş, 1953 yılında elektromanyetik çekme sistemli Maglev için temel tasarımı oluşturmuştur. Hermann'ın icatları, diğer ülkelerde manyetik levitasyon teknolojisi hakkında geniş çapta araştırmalar yapılmasına yol açmış, Maglev taşımacılığına ilişkin araştırmalar özellikle 1965 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde, 1970'lerde Almanya ve Japonya'da yoğunlaştırılmıştır. Günümüzde Almanya'da elektromanyetik çekme sistemli Maglev teknolojisi, Japonya'da elektrodinamik itme sistemli Maglev teknolojisi kullanılmaktadır. 1977 yılında 7 km uzunluğundaki ilk Maglev test hattı Japonya'da inşa edilmiştir. Bu hatta elde edilen test hızı: 517 km/saattir. 1984 yılında İngiltere'de Birmingham Havaalanı ile tren istasyonu arasında yaklaşık 600 metre uzunluğunda ilk ticari Maglev hattı hizmete girmişti [7]. Hat on bir yıl işletildikten sonra 1995 yılında kapatılmıştır. 1963 yılında Almaya'da 1674 km'lik Maglev testi yapılmış 450km/saat hıza ulaşılmıştır. 1990 yılında, Japonya'da 42,8 km uzunluğundaki Yamanashi Maglev test hattı inşa edilmiş

ve ilk test 1997’de yapılmıştır. Bu sistem Elektro Dinamik Süspansiyon (EDS) tarafından desteklenmektedir. 2004 yılında Çin’de Şanghay ve Pudong Uluslararası Havalimanı arasındaki ilk Maglev hattı inşa edilmiş ve ticarileştirilmiştir. Hat uzunluğu: 30 km; Ortalama seyahat süresi: 7.33 dakika; Ortalama hız: 246 km/saat; Taşıma servisi sıklığı: Saatte 4 seferdir. 2021 yılında Çin, Chengdu’da, hızı 620 km/sa olan bir prototip trenle en yeni manyetik levitasyon (maglev) versiyonu sergilenmiştir. Bu, levitasyon ve itiş için çığır açan yüksek sıcaklıkta süper iletken maglev teknolojisini kullanılmaktadır. Araştırmacıların, bu hızı 800 km/sa olarak artırmak üzerinde çalıştıklarını iddia edilmektedir. Ayrıca, Maglev teknolojisinin geleneksel demiryolu sistemlerine uygulanması üzerine araştırmalar yapılmış ve maglev ilerlemelerinin mevcut ulaşım altyapısına entegre edilme potansiyeli gösterilmiştir [1].

2.2.2 Maglev teknolojinin çalışma prensibi

Maglev trenlerinin çalışma ilkesi mıknatıslanmış cisimlerin birbirini itmesi ve çekmesi üzerine kurulmaktadır. Mıknatıslar, benzer kutupları bir araya getirildiğinde birbirlerini iterler çünkü burada manyetik bir alan oluşturmaktadırlar. Maglev sisteminde manyetik alan oluşturularak oluşturulan manyetik kuvvet yer çekimi etkisini dengelemek için kullanılmadığıdır. Böylece araçlar kılavuz yoldan belirli bir yükseklikte askıda tutulmaktadır. Sistemde kullanılan bir grup mıknatıs aracı kılavuz yoldan yukarı iterken bir grup mıknatıs sürtünme kuvveti olmadan treni ileri doğru itmektedir. Böylece Maglev trenlerinin manyetik bir kılavuz yolda sürtünmeyi en aza indirerek yüksek hızlara ulaşması sağlanmaktadır. Maglev treninin çalışma prensibinin manyetik levitasyon, yanıl kılavuzluk ve itme olmak üzere üç temel ilke bulunmaktadır (Şekil 2.1).

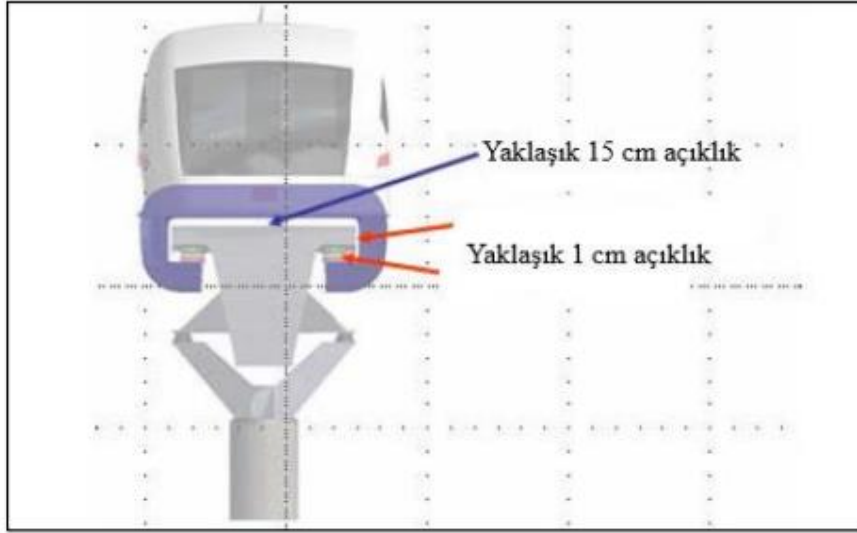


Şekil 2.1 : Maglev treninin çalışma prensibi.

2.2.2.1 Manyetik levitasyon prensibi

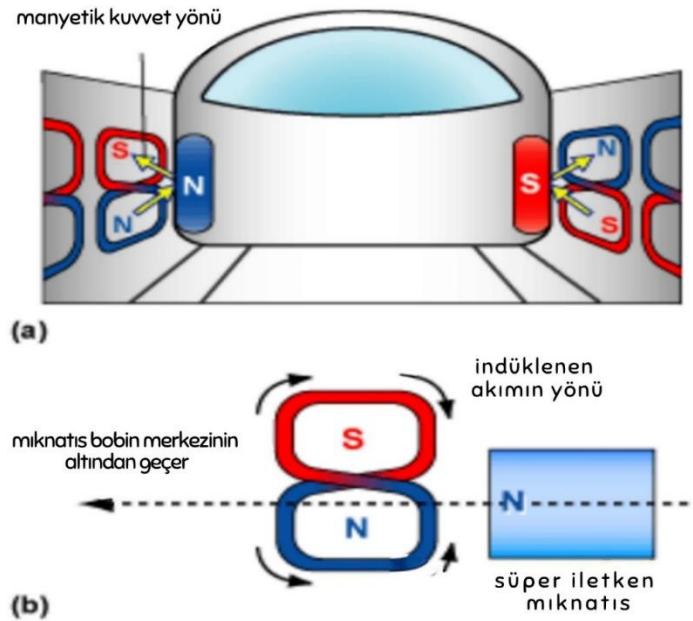
Maglev sistemleri manyetik kaldırma prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Bu teknoloji, trenleri fiziksel temasa gerek kalmadan askıya almak ve itmek için manyetik alanları kullanmaktadır. Maglev sistemlerindeki kaldırma, elektromanyetik süspansiyon, süper iletken mıknatıslar ve sabit mıknatıslar dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle edilmektedir.

Elektromanyetik çekme sisteminin (EMS) kullanıldığı hatlarda MAGLEV trenini havada askıda tutmak için araç ve kılavuz yol arasındaki manyetik kuvveti kontrol etmek gerekmektedir. Süper iletken mıknatıslar bir tren vagonunu U şeklindeki beton bir kılavuz yolun üzerinde asılı tutmaktadır. Kullanılan mıknatıslar süper iletken, yani sıfırın altında 450 Fahrenheit derecenin altına kadar soğutulduklarında, sıradan elektromıknatıslardan 10 kata kadar daha güçlü manyetik alanlar üretebilmektedir. Bu da bir treni askıya almak ve itmek için yeterlidir. Elektromıknatısların kuvveti, kılavuz yol ile aracın şasi alt kısmı arasında yaklaşık bir santimetrelilik bir mesafe oluşmasını sağlamaktadır [8]. Trenin alt kısmı ile kılavuz yol arasındaki boşluk yaklaşık 15 santimetredir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : EMS sisteminde manyetik levitasyon [8].

Elektrodinamik itme sistemi (EDS) kullanılan hatlarda ise levitasyon ilkesi, kılavuz yolun yan duvarlarına yerleştirilmiş bobinler ile sağlanmaktadır. Araç üzerindeki süper iletken mıknatıslar bobinlerin merkezinin birkaç santimetre altından yüksek hızda geçtiğinde, bobinler içinde bir elektrik akımı indüklenmektedir. Kılavuz yolun yan duvarlarında bulunan bobinlerin bir elektromıknatıs gibi davranmaktadır. Böylece Maglev aracı, süperiletken mıknatısları yukarı iten ve aynı anda onları yukarı çeken kuvvetlerle kaldırılması sağlanmaktadır. Şekil 2.3' te EDS sisteminde manyetik levitasyon prensibi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : EDS sisteminde manyetik levitasyon [8].

Maglev sistemlerindeki levitasyon prensibi, işlevsellikleri ve performansları için çok önemlidir. Manyetik alanların etkileşimiyle ortaya çıkan kaldırma kuvvetleri, aracın ağırlığının desteklenmesinde ve çalışma sırasında dengenin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Manyetik alan özelliklerinin optimizasyonu ve gelişmiş kontrol sistemlerinin uygulanması, Maglev sistemlerinin performansını ve güvenilirliğini artırmak için gereklidir.

2.2.2.2 Yanal kılavuzluk prensibi

Maglev trenlerinde kullanılan yanal kılavuzluk ilkesi, genellikle manyetik alanların yönlendirilmesi ve kontrol edilmesi yoluyla sağlanmaktadır. Bu ilke, trenin yatay yönde sabitlenmesini ve doğru bir şekilde ray üzerinde seyahat etmesini sağlamaktadır. Özellikle, yanal kılavuzluk, trenin dönüşlerde ve eğrilerde stabilitesini korumak için büyük öneme sahiptir.

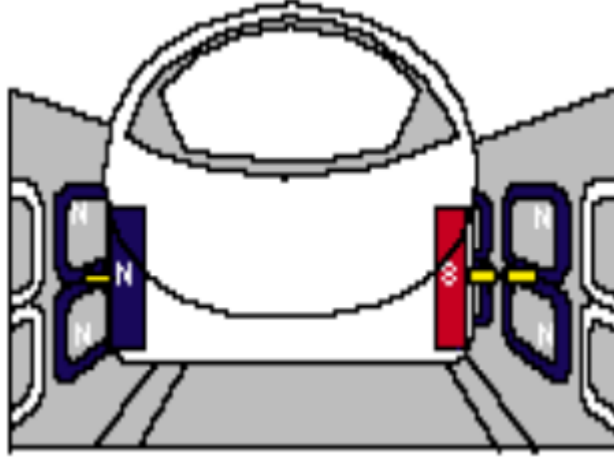
Elektromanyetik süspansiyon (EMS) tipi maglev araçlarında, U şeklindeki elektromanyetikler kullanılarak levitasyon ve kılavuzluk kuvvetleri tek bir elektromanyetik tarafından oluşturulmaktadır. Bu sistemde, aracın yanal hareketini kontrol etmek için manyetik alanlar kullanılarak trenin kılavuz yoldan 10 mm'den fazla sapmaması sağlanmaktadır. Şekil 2.4'te EMS sisteminde yanal kılavuzluk ilkesi gösterilmektedir [8].



Şekil 2.4 : EMS sisteminde yanal kılavuzluk ilkesi [8].

Elektrodinamik süspansiyon (EDS) maglev araçlarında, birbirine bakan levitasyon bobinleri kılavuz yolun altına bağlanarak bir döngü oluşturulmaktadır. Süper iletken

bir mıknatıs olan bir Maglev aracı yanal olarak hareket ederken, döngüde bir elektrik akımı meydana getirmektedir. Bu, araca yakın taraftaki levitasyon bobinlerine itici bir kuvvet ve araçtan daha uzak taraftaki levitasyon bobinlerine çekici bir kuvvet oluşturmaktadır. Böylece, yol boyunca trenin kılavuz yolun merkezinde kalması sağlanmaktadır. Şekil 2.5'te EDS sisteminde yanal kılavuzluk ilkesi gösterilmektedir.



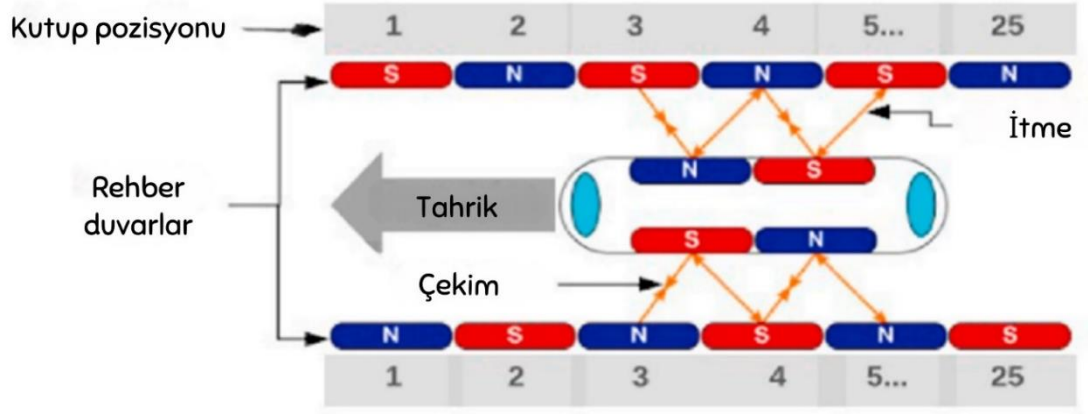
Şekil 2.5 : EDS sisteminde yanal kılavuzluk ilkesi [8].

Yanal kılavuzluk ilkesi, maglev trenlerinin güvenli ve etkili bir şekilde seyahat etmelerini sağlayan önemli bir unsurdur. Manyetik alanların kullanımı, aracın doğru yolu takip etmesini sağlamakta ve yanal stabiliteyi artırarak viraj alma performansını iyileştirmektedir. Bu prensipler, maglev trenlerinin güvenilirliğini ve performansını artırmak için sürekli olarak geliştirilmektedir.

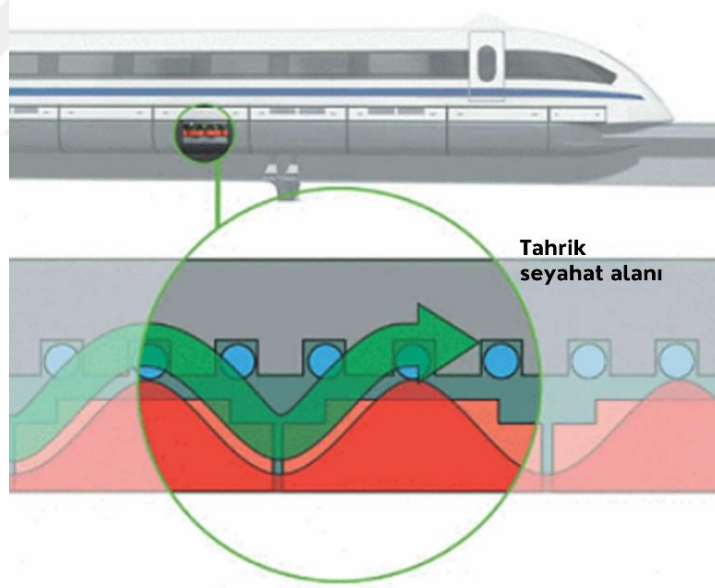
2.2.2.3 İtme prensibi

Maglev trenlerinde kullanılan itme ilkesi genellikle uzun stator lineer senkron motorlar (LLSM) aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Bu motorlar dış kısımda sabit olarak bulunan stator ve iç kısımda dönen rotor olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bu motorlar, treni itmek ve hızlandırmak için manyetik alanları kullanmaktadır. Stator kısmı açıldıktan sonra kılavuz yolun altına gerilen bir elektrik motoru gibi çalışmaktadır. Motor sargılarının içindeki alternatif akım, aracı temassız olarak hareket ettiren manyetik bir alan oluşturmaktadır. Araçtaki destek mıknatısları rotor olarak çalışmaktadır. Trenin hızı, alternatif akımın frekansı değiştirilerek değiştirilebilmektedir. Hareket alanının tersine çevrilmesi durumunda ters yönde manyetik kuvvet oluşturmaktadır. Böylece trenin herhangi bir temas olmadan

frenlemesi ve durdurulması sağlanmaktadır. Bu motorlar, maglev trenlerinin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayarak yüksek hızlı ulaşım sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 2.6’da itme prensibi, Şekil 2.7’de İtme süreci ve seyahat alanı gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : İtme prensibi.



Şekil 2.7 : İtme süreci ve seyahat alanı.

Yanal kılavuzluk ilkesi, maglev trenlerinin güvenli ve etkili bir şekilde seyahat etmelerini sağlayan önemli bir unsurdur. Manyetik alanların kullanımı, aracın doğru yolu takip etmesini sağlamakta ve yanal stabiliteyi artırarak viraj alma performansını iyileştirmektedir. Bu prensipler, maglev trenlerinin güvenilirliğini ve performansını artırmak için sürekli olarak geliştirilmektedir [9].

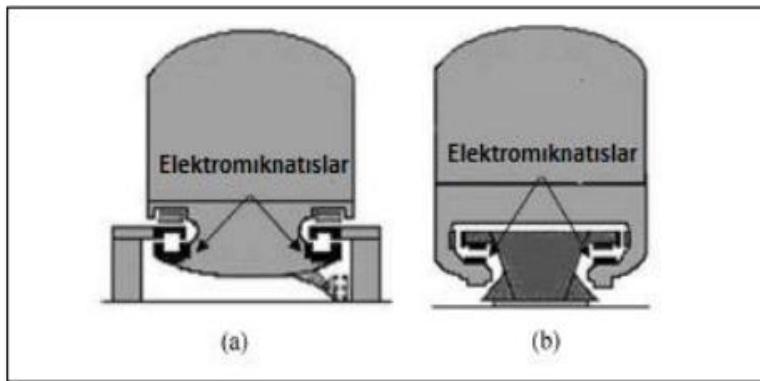
2.2.3 Maglev teknolojisinin türleri

Maglev teknolojisinin levitasyon için kullanılan tekniklere dayanarak, 'Elektromanyetik Çekme Sistemi (EMS)' ve 'Elektrodinamik İtme Sistemi (EDS)' olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır.

2.2.3.1 Elektromanyetik çekme sistemi (EMS)

EMS tipi sistemlerde, trenin levitasyonu kılavuz yol ve elektromıknatıslar arasında manyetik çekme kuvveti oluşturulmasıyla sağlanmaktadır. EMS, sıfır hızda çekim kuvveti sağlaması açısından önemli bir avantaja sahiptir olmakla birlikte doğası gereği kararsızdır ve doğrusal değildir. EMS sisteminde geleneksel elektromıknatıslar kullanılması sebebiyle üretimi daha kolaydır.

Mevcut EMS sistemlerinde, tren çelik ray üzerinde yükselirken, trene bağlı elektromıknatıslar alttan raya doğru yönlendirilmektedir. Elektromıknatıslar, bir treni raydan yaklaşık 10 milimetre sabit bir mesafede tutmak için geri besleme kontrolünü kullanmaktadır. Bu uygulamada kılavuz yol, T şeklinde tasarlanmıştır. Maglev treni ise C şeklinde tasarlanarak kılavuz yolu saracak şekilde ilerlemektedir [10]. EMS sisteminin iki farklı levitasyon teknolojisi bulunmaktadır. Bunlardan biri yanal kılavuzluk ve levitasyon ilkelerinin birleştirilmesidir. Bu, düşük hızlar ve düşük maliyetli koşullar için uygun bir uygulamadır. Bu uygulamaya örnek olarak Kore UTM ve Japonya HSST verilmektedir. Diğeri ise yanal kılavuzluk ve levitasyon ilkelerinin ayrı ayrı kontrol edilmesidir. Bu sebeple daha fazla kontrol sistemi gerektirmektedir ancak daha yüksek hızlara çıkılmasına olanak sağlamaktadır. Şekil 2.8'de EMS sisteminin uygulama türleri gösterilmektedir [11].



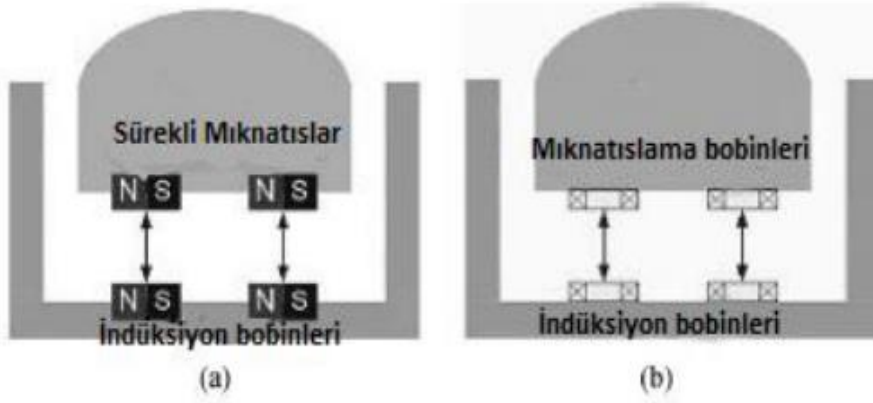
Şekil 2.8 : EMS sistemin uygulama türleri [11].

2.2.3.2 Elektrodinamik itme sistemi (EDS)

EDS sisteminde EMS sisteminden farklı olarak treni havada ilerletebilmek için manyetik itme kuvveti kullanılmaktadır. Bu sistemde kılavuz yolda indüksiyon akımı verilen süper iletken bobin ve maglev treni üzerinde bulunan elektromıknatıslar arasında manyetik alan oluşmaktadır. Böylece oluşan itici kuvvet treni havaya kaldırmaktadır. EDS sisteminde hava boşluğunu kontrol etmek gerekmemektedir. Araç ve kılavuz yol arasındaki boşluk azaldıkça itme kuvveti artacağından, EDS sistemi doğası gereği kararlıdır. EDS sistemi bu özellikleriyle daha yüksek hızlara ulaşmaya olanak sağlamaktadır.

EDS sisteminde süper iletken mıknatıslar trenin manyetik alanını oluştururken, hareketten dolayı bobinlere verilen akım kılavuz yolun manyetik alanını oluşturmaktadır. Bu özellik yüzünden düşük hızlarda indüklenen akın treni havaya kaldırmak için gerekli manyetik alanı oluşturamamaktadır. Trenin hareketsizken ve yeterli hıza ulaşana kadar tekerleklerden destek alması gerekmektedir. Tren yeterli hıza ulaştığında tekerleklerini içe çekerek yoluna devam etmektedir. Treni havada tutmak için trenin 100 km/sa hız ulaşması gerekmektedir. Bu durum EDS sisteminin önemli dezavantajlarından biridir. EDS sisteminde kılavuz yol U şeklinde tasarlanmaktadır. EDS sistemlerinde kullanılan süper iletken mıknatıslar için karmaşık ve pahalı soğuma sistemleri gerekmektedir. Mıknatısların süper iletkenlik özelliği sadece düşük sıcaklıklarda elde edilebileceğinden, sıvı helyum ve nitrojen içeren tanklar gerekmektedir.

EDS sistemi de mıknatısların tipine göre iki türden oluşmaktadır (Şekil 2.9). Birincisi sürekli mıknatıs (PM) ve diğeri süper iletken mıknatıs (SCM) türüdür. PM tipi için elektrik besleme gerekmemektedir. PM tipi yalnızca küçük sistemler için kullanılır. SCM tipi daha karmaşık ve işletme sırasında helyum buzdolabı gerektirmektedir. 2003 yılında Japonya'da SCM tipi Maglev sistemi 581 km/saat hız rekorunu kırmıştır.



Şekil 2.9 : EDS sistemin uygulama türleri [10].

2.2.3.3 EMS ve EDS sistemleri arasındaki farklar

Maglev trenlerinde kullanılan manyetik kaldırma prensibinin uygulamasında farklı avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır.

EDS sistemlerinde kullanılan süper iletken mıknatıslar sayesinde daha yüksek hızlara ulaşılmaktadır. Ancak bu süper iletken mıknatıslar oldukça pahalı ve karmaşık soğutma sistemleri gerektirmektedir. EMS sistemleri ise kullanılan geleneksel mıknatıslar kullanılmaktadır. Bu sebeple EDS sistemi, EMS sistemine göre daha fazla enerji tüketir.

EMS sisteminde tren havada askıda kalmak için herhangi bir hıza ihtiyaç duymamaktadır. Tren tekerlek ya da ikincil bir itme sistemi gerektirmez. EDS sistemine ise trenin askıda kalabilmesi için belirli bir hıza ulaşması gerekmektedir. Bu süreçte tren tekerlekler üzerinde hareket etmektedir.

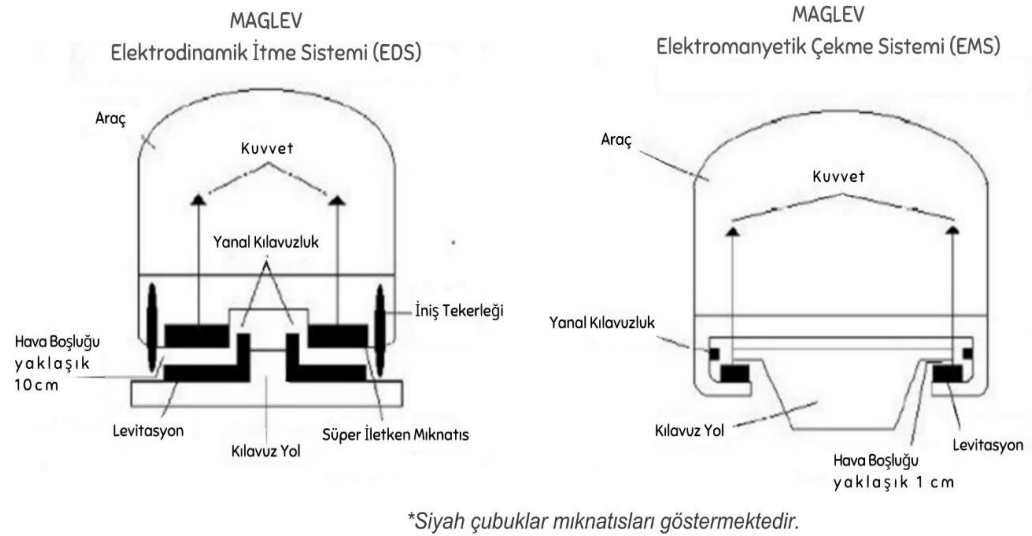
EMS sisteminin bir dezavantajı, kılavuz yol ile tren arasında yaklaşık 10 mm boşluk bulunmasıdır. Çok az boşluk olması sebebiyle hassas kontrol sistemi gerekmektedir. Bununla birlikte kılavuz yolun da hassas inşa edilmesi, sistemin inşa maliyetlerini artırmaktadır.

EDS sisteminde ise kılavuz yol ile tren arasındaki mesafe 15 cm'ye kadar çıkabilmektedir. Bu sayede yer sarsıntılarına daha az duyarlı bir sistem geliştirilmiştir. Deprem bölgesinde bulunan Japonya'nın EDS sistemini tercih etmesinin sebeplerinden biri budur. Çizelge 2.1'de sistemlerin karşılaştırılması gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : EMS ve EDS sistemlerinin karşılaştırılması.

EMS	EDS
Geleneksel mıknatıslar kullanılmaktadır	Süper iletken mıknatıslar kullanılmaktadır
Üretimi kolaydır	Daha yüksek hızlara çıkabilir
Daha az enerji tüketir	Pahalı soğutma sistemlerine ihtiyaç duymaktadır
Yaklaşık 10 mm hava boşluğu bulunmaktadır.	Yaklaşık 15 mm hava boşluğu bulunmaktadır
Hassas kontrol sistemine ihtiyaç duymaktadır	Yer sarsıntılarına karşı daha az duyarlıdır
Her hızda havada askıda kalabilmektedir	Havada askıda kalması için yaklaşık 100 km/sa hıza ulaşması gerekmektedir
Tekerleğe ihtiyaç duymaz	Tekerlek sistemine ihtiyaç duyar

Şekil 2.10'da EDS ve EMS sistemlerinin karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 2.10 : EDS ve EMS sistemleri.

2.2.4 Maglev'in Avantajları ve Dezavantajları

Maglev trenleri çeşitli avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Maglev teknolojisi, geleneksel yüksek hızlı demiryollarına kıyasla daha hızlı seyahat süreleri, gelişmiş enerji verimliliği ve daha iyi operasyonel performans sunarak ulaşım sektöründe bir devrim yaratabilir.

Maglev trenleri, gürültü seviyelerini ve çevresel etkilerini azalttığı için daha temiz ve sessiz bir toplu taşıma aracı olarak bilinmektedir. Maglev trenleri, benzer hızlardaki geleneksel trenlere göre daha az gürültü üretir çünkü temel gürültü kaynağı tekerlek değil yer değiştiren havadır.

Maglev trenleri, tren ve kılavuz yol arasında fiziksel temas olmadığı için yuvarlanma direnci yaşamamaktadır. Bunun yerine hava direnci ve elektromanyetik sürüklenme uygulanmaktadır, bu da güç verimliliğini artırmaktadır. Bununla birlikte ray ve tren arasında sürtünmeden kaynaklı yıpranma olmayacağından bakıma ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum bakım maliyetlerini düşürmektedir. Öte yandan, maglev teknolojisi kendi zorluklarını ve dezavantajlarını da beraberinde getirmektedir. Maglev trenlerinin ana dezavantajlarından biri, altyapı geliştirme ve sistem uygulaması için gereken yüksek ilk yatırım maliyetleridir. Maglev trenleri şu anda işletilmekte olsa da geleneksel hatlarla uyumlu değildir ve bu nedenle tüm güzergahları için yeni altyapıya ihtiyaç duymaktadır. Ek olarak, maglev teknolojisinin yaygın olarak benimsenmesi, maglev araçları ve kılavuz köprüleri arasındaki etkileşim sorunu gibi belirli alanlardaki sınırlı araştırma ve geliştirme çalışmaları nedeniyle zorluk teşkil etmektedir. Maglev sistemlerinin karmaşıklığı, bakım maliyetlerini ve operasyonel sorunları artırabilmektedir. Bu durum stabiliteye ve hassas kaldırma kontrolüne bağlıdır. Maglev trenleri, daha hızlı seyahat süreleri, daha yüksek enerji verimliliği ve çevresel faydalar gibi önemli faydalar sunarken, yüksek başlangıç maliyetleri, belirli alanlarda sınırlı araştırma ve sistem karmaşıklığı gibi sorunlarla da karşı karşıyadır. Maglev teknolojisinin potansiyel faydalarını en üst düzeye çıkarmak ve sınırlamalarının üstesinden gelmek için bu zorlukların sürekli araştırma, geliştirme ve inovasyon yoluyla ele alınması büyük önem taşımaktadır.

2.3 Hyperloop

Hyperloop, Türkçede "hız yuvarı" anlamına gelen yeni nesil yüksek hızlı ulaşım konseptidir. Elon Musk tarafından 2013 yılında mevcut ulaşım sistemlerine ek beşinci ulaşım modu olarak tanıtılmıştır. Bu konsept, düşük basınçlı tüpler aracılığıyla yolcuların ve yüklerin kapsüller içinde ultra yüksek hızlarda taşınmasını içermektedir. Bu tüpler potansiyel olarak 1200 km/saate kadar ulaşabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Sistem, hava direncini ve sürüklenmeyi en aza indirmek için neredeyse vakumlu bir ortamda çalışmaktadır. Böylece verimli ve hızlı bir seyahat

sağlamaktadır. Hyperloop sistemi, demiryolu ve havayolu taşımacılığının avantajlarını birleştirerek işletme maliyetlerini azaltan bir ağ oluşturmayı amaçlamaktadır.

Hyperloop teknolojisi, kaldırma, yönlendirme ve itme sistemlerini birleştirerek yüksek hızlara ulaşmayı sağlamaktadır. Hyperloop'un tasarımı, yaklaşık 3.3 metre çapında olan tüpler içinde çok yüksek hızlarda hareket eden kapsülleri veya pod adı verilen bölmeleri içermektedir. Sistem, yabani hayata ve tehlikeli hemzemin geçitler gibi faktörlerden olumsuz etkilenmemek adına kolonlar üzerinde yükseltilmiş hat üzerinde hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Ulaşım sisteminin bir diğer amacı, orta menzilli mesafelerde seyahat sürelerini önemli ölçüde azaltmaktır. Ayrıca, ticari havayolları ve yüksek hızlı demiryolları gibi mevcut ulaşım yöntemlerine rekabetçi bir alternatif sunmaktır. Hyperloop, uzun mesafelerde hızlı, enerji tasarruflu ve uygun maliyetli seyahat sağlamak için ileri teknolojilerden yararlanan bir ulaşım sistemini temsil etmektedir. Yüksek hızlı, çevre dostu ve güvenli seyahat deneyimleri sunarak taşımacılık sektöründe devrim yaratma potansiyeli, dünya çapında önemli bir ilgi ve araştırma merakı uyandırmıştır [12].

2.3.1 Hyperloop teknolojisinin tarihsel gelişimi

Hyperloop, vakumlanmış bir tüp içerisinde ses üstü hızlarda seyahat etmeye olanak sağlayan yolcu kapsüllerinden oluşan bir raylı ulaşım teknolojisidir. Hyperloop konseptinin ilk tanıtımı, SpaceX ve Tesla Motors şirketlerinin kurucusu Elon Musk tarafından Temmuz 2012'de Kaliforniya'da düzenlenen PandoDaily etkinliğinde yapılmıştır. 2013 yılında yine Elon Musk tarafından yayınlanan 'Hyperloop Alpha' adıyla yayınlanan raporda Los Angeles ve San Francisco arasında planlanmakta olan yüksek hızlı demiryolu sisteminin pahalı ve yavaş olarak görülmesi nedeniyle, alternatif olarak yayınlanan bir raporda ortaya atılmıştır. Bu konsept ile Los Angeles, Kaliforniya ile San Francisco, Kaliforniya arasında seyahat süresi 35 dakika olarak belirlenmiştir [12].

2013 yılında yine Elon Musk tarafından bu konsept 'Hyperloop Alpha' adıyla bir rapor olarak yayınlanmıştır. Los Angeles ve San Francisco arasında planlanmak olan yüksek hızlı demiryolu sisteminin pahalı ve yavaş olması sebebiyle alternatif olarak hyperloop sistemi sunulmuştur.

Musk yayınladığı raporda Amerikalı roket bilimci Robert Goddard'ı hyperloop teknolojisinin öncüsü kabul etmektedir. 1909 yılında Goddard tarafından yazılan 'Hızlı Transitin Sınırı' başlıkla makalede Boston'dan New York'a 12 dakikada gidebilecek bir tren anlatılmaktadır. Bu makale, havalanan kapsüller ve vakumla kapatılmış bir tüp gibi hyperloop'un yapı taşlarından bazılarını içermektedir. 1945 yılında Goddard çalışmaları doğrultusunda geliştirdiği 'Vakum Tüplü Ulaştırma Sistemi'nin patentini almıştır. Yıllar içinde bu konsept daha da geliştirilmiş 1972 yılında RAND şirketi tarafından "Vactrain" isimli bir tren tasarlanmıştır. Bu tren yüksek hızlı demiryolu taşımacılığının hızını daha da artırma amacıyla basıncı alınmış tüp aksamı bir yeraltı trenidir.

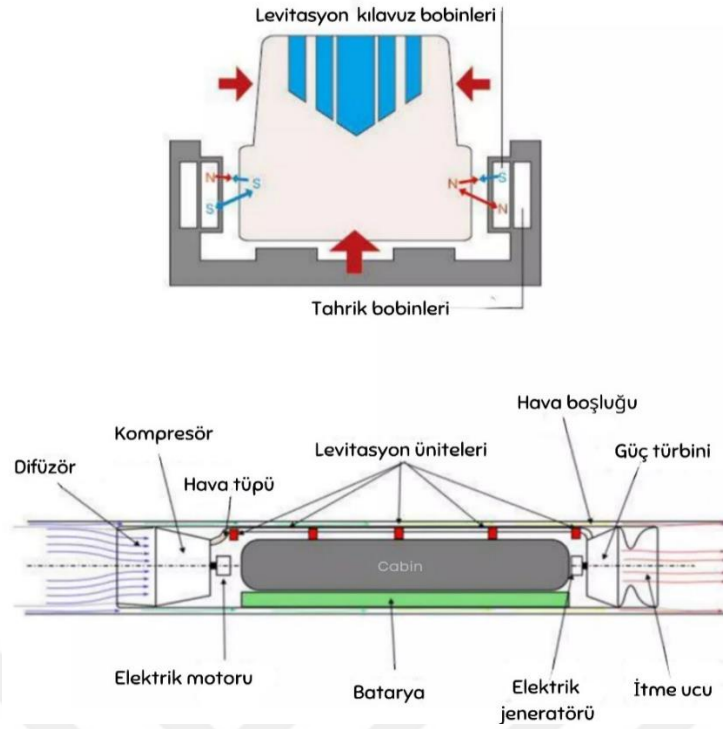
Yıllar içinde oluşturulan çoğu fikir ve tasarım çeşitli sebeplerle başarısız olmuştur. Elon Musk tüm bu çalışmalardan faydalananarak Ağustos 2013'de yayınladığı raporda 'Hyperloop Alpha' tasarımını tanıtmaktadır. Bu raporda Hyperloop Alpha'nın 28 yolcu kapasiteli kapsüller ya da pod adı verilen bölmelerden oluşacağı belirtilmiştir. Bu kapsüllerin atmosfer basıncının 0.001'i kadar hava basıncına sahip bir tüp içinde yüksek hızlara ulaşabileceği aktarılmaktadır. Sistemin kompresörler tarafından sağlanan bir hava yastığı üzerinde havalanan kayaklar üzerinde hareket etmesi önerilmektedir.

2013 yılının Kasım ayında Musk'ın tasarımlarından yola çıkarak konsepti geliştirmek için "Hyperloop Technologies" adında ilk şirket kurulmuştur. 2014 yılında Hyperloop teknolojisinin bileşenlerini tasarlamak ve test etmek için Los Angeles'da inovasyon kampüsü kurulmuştur. Aralık 2015'te, Kuzey Las Vegas, Nevada üzerinde ilk tam sistem, tam ölçek ve tam hız testini başlatmak için test sahası kurulmuştur. 11 Mayıs 2016 tarihinde Hyperloop Technologies şirketi tarafından ilk Tahrik Sistemi Açık Hava Testi (POAT) gerçekleştirilmiştir. Bu testin başarıyla gerçekleştirilmesinden sonra şirket Hyperloop üzerinde aktif olarak çalışmaya başlamış yaklaşık iki ay sonra Helsinki ve Stockholm arasında 500 km'lik potansiyel bir hyperloop hattının çevresel ve ekonomik etkilerini gösteren ilk fizibilite çalışmasını hazırlamıştır. Bu çalışmaya göre iki şehir arasındaki seyahat süresi 28 dakikaya indirilmiştir. Mart 2017'de ilk büyük çaplı Hyperloop test hattının yapımı tamamlanmıştır. 'Devloop' olarak adlandırılan test hattı 3,3 m çapı ve 500 m uzunluğu ile dünyanın tek tam sistemli ve tam ölçekli test sahası olmuştur. Temmuz 2017'de ilk nesil Hyperloop kapsülünün test

sürüşü başarıyla yapılmış ve tanıtılmıştır. Araç 111.057 Km/saat hıza ulaşmıştır. 2018’de Hyperloop kargo sistemini geliştirmek amacıyla “DP World CargoSpeed” şirketi kurulmuştur. Ekim 2020’de Virgin Hyperloop ilk yolcu testi düşük hızlarla gerçekleştirmiştir. Test sırasında maksimum 172 km/saat hıza ulaşılmıştır. Ocak 2023’te Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi, hyperloop sistemleri için ilk teknik standardı yayınlamıştır. TUM Hyperloop şirketi tarafından 10 Temmuz 2023 tarihinde vakum koşulları altında ilk yolcu sürüşü gerçekleştirilmiştir [12, 13].

2.3.2 Hyperloop çalışma prensibi

Hyperloop sisteminin ana çalışma prensibi manyetik kaldırma ilkesine üzerine kuruludur. Hyperloop, otonom kapsüllerin yüksek hızlarda seyahat ettiği vakuma yakın bir ortam yaratmak için sızdırmaz kapsüller kullanmaktadır. Bu kapsüller, yolcuları veya yükleri düşük hava basıncına sahip tüpler aracılığıyla yüksek hızlarda taşıyarak orta menzilli mesafelerde seyahat sürelerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Hava sürtünmesini en aza indirilerek araç ses üstü hızlara ulaşması sağlanmaktadır. Pilon desteği ile düşük basınçlı bir tüp, yolcu kapsülünü belirli bir mesafe boyunca hareket ettirmektedir. Kapsülün ön tarafında bulunan hava kompresörleri aracılığıyla ön kısımdaki yüksek basınçlı hava kapsülün arka ve yan kısımlarına itilmektedir. Böylece hava sürtünmesi azaltılmaktadır. Tüp içinde aracın havada hareket etmesi sağlanmaktadır. Kapsülün ileriye doğru hareketi, lineer asenkron motorlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Burada enerji güzergah boyunca uzanan Hyperloop tüpünün üzerinde bulunan güneş panelleri ile sağlanmaktadır. Gece veya olumsuz hava koşullarında yeterli enerji bataryalarda depolanmaktadır [14]. Şekil 2.11’de Hyperloop’un çalışma mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.11 : Hyperloop ulaşım sisteminin çalışma mekanizması [14].

2.3.3 Hyperloop yapı özellikleri

Hyperloop ulaşım sisteminin temel bileşenleri yolcu veya yük taşımak için kullanılan pod adı verilen kapsül, kapsülün içinde hareket ettiği tüp ve kapsülün tüp içerisinde hareket etmesini sağlayan itme sistemidir.

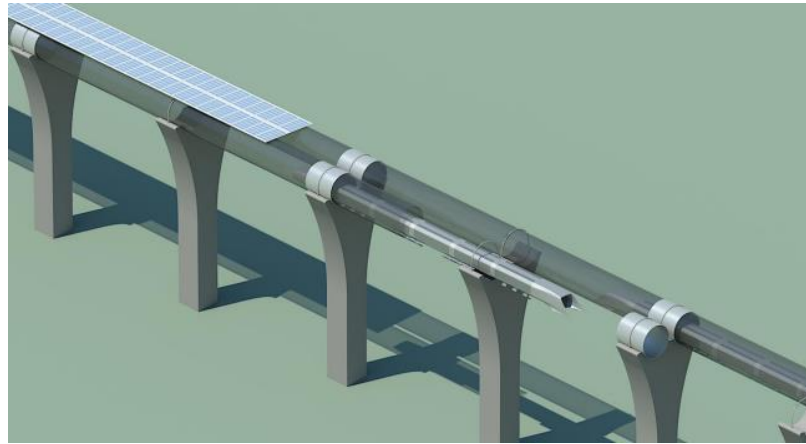
2.3.3.1 Tüp geçit

Hyperloop hattı kapsülün etrafındaki hava akışını sağlayacak vakumlanmış silindir şeklinde tüp olarak tasarlanmaktadır. Böylece enerji verimliliği ve hedeflenen yüksek hızlara ulaşılması hedeflenmektedir. Hyperloop Alpha raporunda tüp basıncının sürtünme kuvvetini azaltarak tüpten dışarıya hava pompalanması amacıyla 100 Pa olarak ön görülmektedir. Bu değer, Dünya'daki hava basıncının 1/1000'i ve Mars'taki basıncın yaklaşık 1/6'sına eşittir. Hyperloop sisteminde, kapsüller havanın süpersonik hızlara ulaştığı anda sürtünme kuvvetini artıran şok dalgası üretmektedir. Bu durum hareket için gereken enerji miktarını artırmaktadır. Şok dalgalarının oluşumunu önlemek için tasarım aşamasında kapsül/tüp alanı oranını optimum hale getirmek yeterli hava akışını sağlamaktadır.

Tüp, boyuna kirişlerle desteklenmiş çelik malzemeden yapılmaktadır. İnşa maliyetlerini ve arazi kullanımını en aza indirmek amacıyla tüp 30 m aralıklarla yerleştirilen 6 m yüksekliğinde prefabrik kolonlar üzerine inşa edilmektedir. Burada kolonların açıklığı maliyetini azaltmak amacıyla kısa tutulmaktadır. Hyperloop Alpha raporunda ihtiyaç duyulan kolon sayısı nedeniyle, kolonların betonarme olarak imal edilmesi maliyeti düşürmektedir.

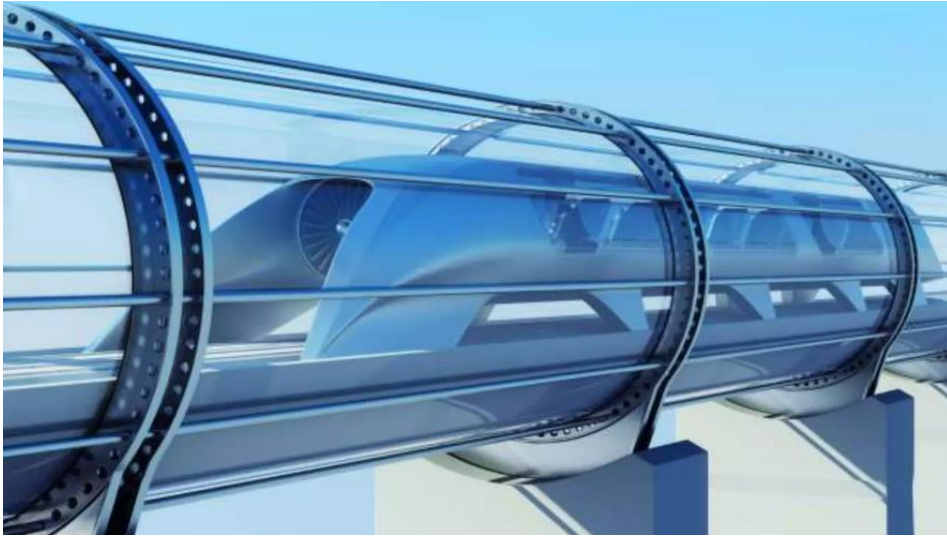
Tüp ve kolon bağlantısı dikey ve yatay yönde zemin oturmalarına karşı ayarlanabilir şekilde tasarlanmaktadır. Kolonlar sayesinde depremde ve ısı genleşme ile yatay yönde oluşabilecek sehime izin verilirken tüpün dikeyde sehimini en aza indirilmektedir.

Hyperloop teknolojisinde, çift yönde hareketin sağlanması amacıyla birbirine kaynaklanmış iki tüp bulunmaktadır. Sistemin ihtiyaç duyduğu enerji tüp üzerinde hat boyunca yerleştirilen güneş panelleri ile sağlanmaktadır. Hyperloop Alpha raporunda, tüp geometrisi yolcu ve yolcu+araç versiyonuna göre değişmektedir. Yalnızca yolcu bulunan versiyonda kapsül etrafında hava akışının sağlanması göz önünde bulundurularak tüpün iç çapı 2.23 m olacak şekilde tasarlanmaktadır. Yolcu+araç bulunan versiyon da ise daha büyük kapsül bulunduğundan tüplerin iç çapı 3,30 metre olacak şekilde tasarlanmaktadır. Raporda dikkate alınan yük durumları için gerekli mukavemeti sağlamak amacıyla yalnızca yolcu bulunan versiyonda tüpün et kalınlığı 20 ile 23 mm arasında, yolcu+ araç bulunan versiyonda ise 23 ila 25 mm arasında olarak düşünülmektedir [15, 16]. Hyperloop hattı boyunca belirli yerlere acil durum çıkışı kapıları ve basınçlandırma üniteleri konulmuştur (Şekil 2.12, Şekil 2.13).



Şekil 2.12 : Hyperloop Alpha tüp tasarımı.

Hyperloop sisteminde her bir istasyon tüpün içinde entegre edilmektedir. İstasyonlar    bölümden oluşmaktadır. Bunlardan biri gelen kapsülü taşıyan vakum tüpünün bir parçası olan odacıktır. Kapsül odaya girdikten sonra vakum boşaltılarak araç normal atmosfer basıncına sahip ikinci bölüme geçmektedir. İkinci bölüm yolcuların kapsüle biniş ya da iniş yaptığı bölümdür. Buradan sonra kapsül üçüncü bölüme geçmektedir.    nc  bölümde basınç başta normal atmosferik basınçtır daha sonra hazne vakumlanarak kapsül tekrar harekete geçmektedir. Bu taşıma işlemin her istasyonda gerçekleşmesi öngörülmektedir. Bölümler gerekli hava basıncının oluşturulması ve korunmasını sa latan hermetik kapılar ile ayrılmaktadır.

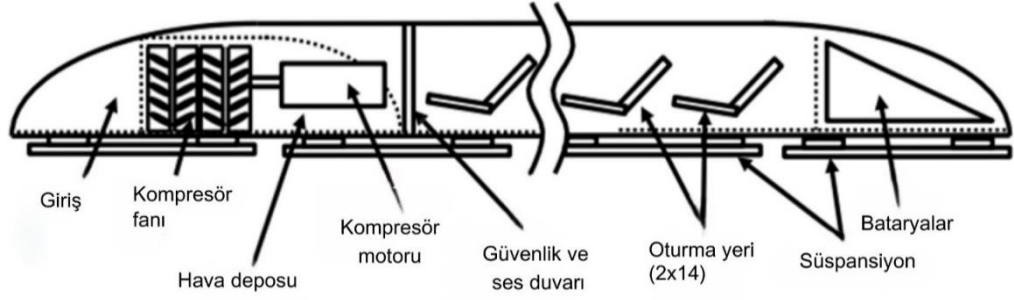


Şekil 2.13 : Hyperloop Alpha t p tasarımı.

2.3.3.2 Hyperloop kapsülü

Yolcu ve y k taşınmasında ana bileşen trenlerde vagonlar olduğu gibi Hyperloop sisteminde de kaps llerdir. Hava direnci ve sürtünme kapsülün vakumlanmış t p içerinde hedeflenen yüksek hızlara ulaşması için en büyük engellerdir. Kapsülün tasarımı hareket esnasında hava direncini en aza indirecek şekilde yapılmış ve tekerlek kullanılmamıştır. İstenilen yüksek hızlara erişebilmek sadece tasarım ile mümkün olmamaktadır. Hareket sırasında meydana gelen Kantrowitz etkisi ile de mücadele etmek gerekmektedir. Kapsül harekete geçtiğinde, t p ve kapsül arasındaki boşluk nedeniyle kapsülün ön tarafında hava birikmeye başlamaktadır. Biriken hava direnç olu turdu undan kapsülün hızını yavaşlatmaktadır. Bu duruma Kantrowitz etkisi denilmektedir. Kapsülün  n tarafına yerleştirilen kompresör yardımı ile kapsülün önünde biriken basınçlı hava emilerek hava yataklarına gönderilmektedir. Böylece

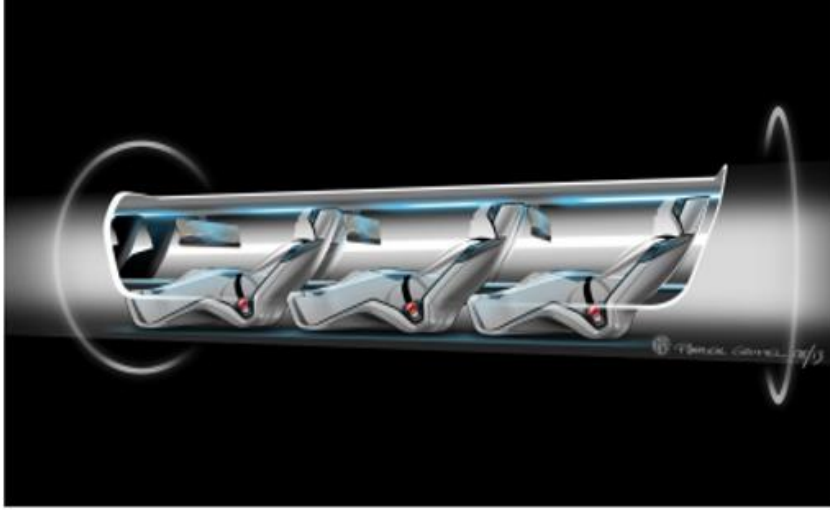
kapsülün yavaşlamadan hareketine devam etmesi sağlanmaktadır. Bununla birlikte kompresör sayesinde yüksek hızlarda hareket ederken düşük sürtünmeli süspansiyon sistemi elde edilmektedir. Kapsüller, düşük basınçlı tüp içinde, basınçlı hava ve aerodinamik kaldırma özelliğine sahip 0,5-1,3 mm'lik bir hava tabakası üzerinde çalışmaktadır. Bu koşullar altında, maksimum 1.220 km/sa hıza ulaşabilmektedirler. Şekil 2.14'de Hyperloop yolcu kapsülünün alt sistemleri gösterilmektedir [15].



Şekil 2.14 : Hyperloop yolcu kapsülünün alt sistemleri.

Hyperloop Alpha raporunda yalnızca yolcu kapsülü ve hem yolcu hem de araç kapsülü olarak iki çeşit kapsül düşünülmektedir.

Yalnızca yolcu bulunduran Hyperloop kapsüllerinin tasarımı, verimliliği ve hızı artıracak aynı zamanda yolcu konforunu ön planda tutacak şekilde yapılmıştır. Kapsülün ön yüzey alanı en aza indirilmiş ve aerodinamik yapısı sürtünmeyi azaltarak yüksek hızlara ulaşabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kapsüllerin iç tasarımında koltuklar, seyahat sırasında ortaya çıkan yüksek hızlanma ivmesinden oluşacak rahatsızlığı en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.15). Her yolcunun kendi eğlence sistemine sahip olması düşünülmektedir. Kapsülün her iki yanında yolcu iniş ve binışı için kapı tasarlanmıştır. Yolcu kapsülünde en yüksek genişlik 1,35 m ve yükseklik 1.10 m olarak belirlenmiştir. Kapsüllerin yolcu kapasitesi 28 olarak düşünülmüş, kapsüller arasında kalkış süresi ortalama 2 dakika olarak belirmiştir. Böylece saatlik yolcu kapasitesi 840 olarak hesaplanmıştır. Kalkışlar arasındaki süreyi azaltarak hyperloop kapasitesini daha da artırmak mümkündür [15,16].



Şekil 2.15 : Hyperloop yolcu kapsülü versiyonu.

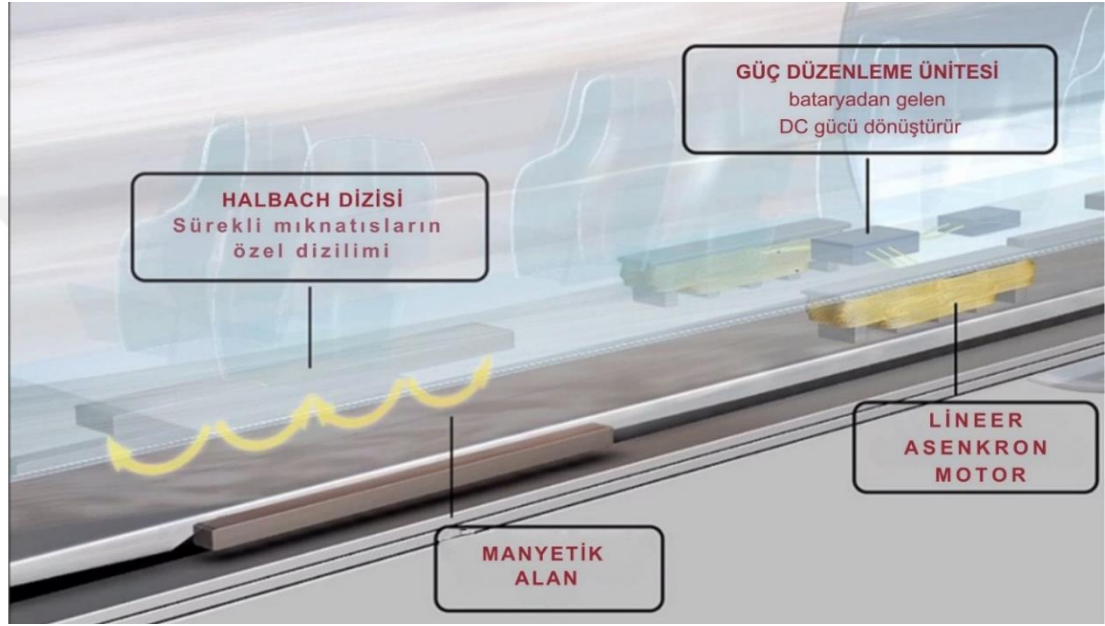
Yolcu ve araç bulunduran Hyperloop kapsüllerinde sefer aralığı aynı kalacak şekilde yolcu kapasitesine 3 araç eklenmesi düşünülmektedir. Ayrıca bu versiyonun daha geniş ön yüzey alanına sahip olması düşünülmektedir.

Hyperloop Alpha’da yolcu kapsülünün tüm sistemler dahil olmak üzere toplam iç ağırlığının 2500 kg, toplam ağırlığının ise 3100 kg olması ön görülmüştür. Yolcu ve araç kapsülünde ise toplam iç ağırlığın 2700 kg, genel ağırlığın 3500 kg olması ön görülmüştür. İnşaa maliyetleri dahil yapının toplam maliyetinin 245.000 \$’dan fazla olmaması beklenmektedir.

Hyperloop Ulaşım Sisteminde kapsülü havada askıda hareket ettirmek için farklı yöntemler mevcuttur. Elon Musk tarafından yayınlanan Hyperloop Alpha raporunda kapsül etrafında oluşturulan hava yastıklarıyla kapsülün havada hareket etmesi önerilmektedir. Bu yöntemde kapsülün ön kısmına yerleştirilen kompresörler ile emilen havanın kapsülün arka ve yan kısımlarına iletilmesi ile kapsülün askıda kalmasını sağlamaktadır. Bu sistemin yüksek rijitliğe sahip olduğu bu sayede yüksek hızlara ulaşabileceği düşünülmüştür. Yıllar içerisinde yapılan araştırmalara göre, hava yastıkları ile tüp arasındaki çok küçük bir değişiklik bile yüksek hava akış debisi gerektirmektedir [17].

Hyperloop teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar kapsüllerin tüp içinde hareketini sağlamak için farklı itme ve kaldırma sistemlerini araştırmıştır. Elektromanyetik süspansiyon sistemleri (EMS) ve Elektrodinamik süspansiyon sistemleri (EDS) Hyperloop kapsüllerinin tasarımı için uygun teknolojiler olarak tanımlanmaktadır.

Hyperloop ulaşım sisteminde Maglev teknolojisinde kullanılan farklı olarak tüp boyunca raya sürekli güç verilmesi gerekmemektedir. Bu sebeple daha düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olması düşünülmektedir. Bu sistem hyperloop teknolojisinde kapsülün altına lineer asenkron motor v sürekli mıknatısların, tüp içerisine ise güçsüz bobinlerin yerleştirilmesi şekilde tasarlanmaktadır. Sürekli mıknatıslar uyarılmadan manyetik alan üretebilmektedirler. Lineer asenkron motor tarafından oluşturulan manyetik kuvvetle kapsül havaya kaldırılmaktadır (Şekil 2.16).



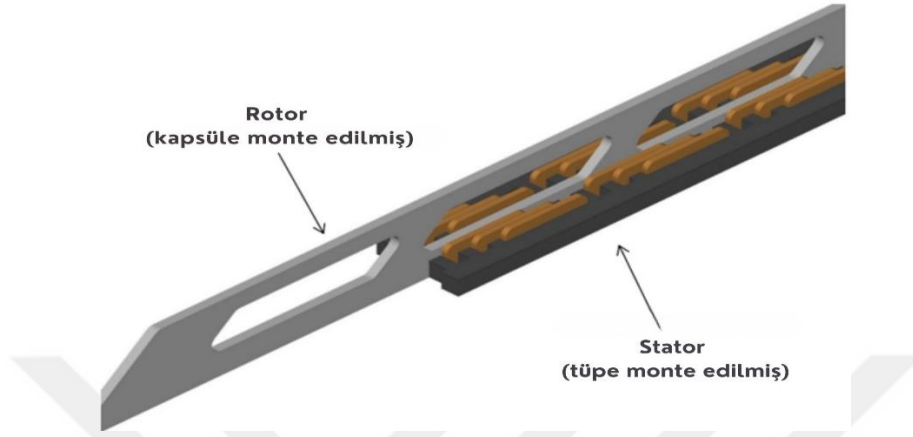
Şekil 2.16 : Hyperloop manyetik kaldırma sistemi.

2.3.3.3 Tahrik sistemi

Hyperloop teknolojisinde kullanılan tahrik sistemi lineer asenkron motorların sürekli lineer mıknatıslar üzerinde kullanılmasıyla çalışmaktadır. Bu sistemler, kapsülleri düşük basınçlı tüp içinde hızlandırmak ve yavaşlatmak için kullanılmaktadır. Ayrıca Hyperloop'un 1200 km/saat'e kadar hızlara ulaşmasını sağlamaktadırlar. Burada kullanılan sistemin düşük malzeme maliyeti, hafif ve daha küçük boyutlu kapsül tasarımı yapılabilmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Kapsülü hızlanmasını sağlamak amacıyla hat boyunca lineer hızlandırıcılar inşa edilmektedir.

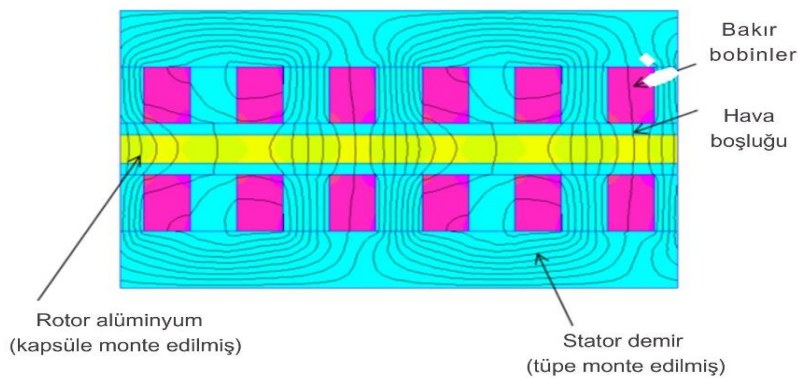
Kapsüle, oluşan momentumu aktarması ve ağırlık tasarrufu sağlanması için rotor adı verilen hareketli motorlar yerleştirilmektedir. Hyperloop Alpha raporunda hareketli motor parçası rotor 15 m uzunluğunda, 0,45 m yüksekliğinde, 50 mm kalınlığında alüminyum malzemeden ağırlık ve maliyeti azaltmak için ortası oyuk olarak

tasarlanmıştır. Akım bu parçanın 10 mm dışından akmaktadır. Rotor ve stator arasındaki boşluk her iki tarafta da 20 mm'dir. Kapsülün bu küçük boşlukta ilerlemesi kontrol sistemleri ve manyetik kuvvetlerin kombinasyonu sayesinde sağlamaktadır. Şekil 2.17'de rotor ve stator gösterilmektedir [15].



Şekil 2.17 : Üç boyutlu rotor ve stator gösterimi [15].

Tüp üzerine kapsüle güç veren stator adı verilen sabit motorlar yerleştirilmektedir. Bu motorlar yaklaşık 0,5 m genişliğe ve 10 cm yüksekliğe sahiptir. Rotor parçasının iki tarafına simetrik olarak yerleştirilmektedir. Birincil tahrik sistemi kapsülün uzun mesafeler boyunca yüksek hızlarda taşınmasından sorumluyken, ikincil tahrik sistemi birincil sistem devreye girmeden önce kapsülü kısa mesafelerde yüksek hızlara çıkarmak için tasarlanmaktadır. Hyperloop teknolojisinde tahrik sistemi tamamen elektrikli, fosil yakıtlara dayanmaz. Böylece ulaşım sisteminin sürdürülebilirliği artmaktadır. Ayrıca, Hyperloop sistemindeki sürüklenmeyi azaltmak, maliyet etkinliği ve tahrik sisteminin enerji yükünü en aza indirmek açısından önem taşımaktadır. Şekil 2.18'de Lineer asenkron motor içindeki manyetik alan gösterilmektedir.



Şekil 2.18 : Lineer asenkron motoru içindeki manyetik alan [15].

2.3.4 Hyperloop ulaşım sisteminin avantajları ve dezavantajları

Hyperloop teknolojisinin umut verici bir ulaşım sistemi olarak konumlandırılan avantajlar sunmaktadır. En önemli avantajlarından biri, sürtünmenin önemli ölçüde azaltılmasıdır. Bu durum yapım ve işletme maliyetlerinin azatılmasına ve tahrik için daha az enerji tüketilmesini sağlamaktadır. Hyperloop sistemi çıkabildiği yüksek hızlar sayesinde seyahat sürelerini azaltarak uzun mesafeli seyahatler için yüksek hızlı demiryolu ve havayolu ulaşım modlarına bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca Hyperloop kapalı tüpler içinde çalıştığından karayolu altyapısı ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve trafik sıkışıklığını hafifletmektedir. Hyperloop sistemi manyetik kaldırma ve elektro dinamik süspansiyon gibi gelişmiş teknolojileri entegre ederek verimliliğini ve etkinliğini artırmaktadır. Süper iletken elektrodinamik süspansiyon sistemleri ile oluşturulan büyük kaldırma boşlukları, stabilite ve azaltılmış kontrol gereksinimleri gibi avantajlar sunarak Hyperloop teknolojisinin genel performansı artırmaktadır. Bununla birlikte, Hyperloop sistemlerine güç sağlamak için güneş panellerinin kullanılması sürdürülebilirliği teşvik etmekte ve geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmaktadır.

Hyperloop ulaşım sistemi çok sayıda avantaj sunarken, dikkate alınması gereken bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Önemli dezavantajları arasında, sistemin çalıştığı yüksek hızlarla ilişkili potansiyel güvenlik endişeleri yer almaktadır. Özellikle aşırı yüksek hızlarda acil frenleme senaryolarında olası bir arıza riski, araçların ve frenleme sisteminin bütünlüğünü etkileyerek ele alınması gereken güvenlik sorunlarını gündeme getirmektedir. Ayrıca, kaldırma, yönlendirme ve itme gibi işlevleri bir araya getiren sistemin karmaşıklığı, sistem güvenilirliği ve bakımı açısından zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Hyperloop teknolojisinin bir diğer dezavantajı, altyapı için önemli bir başlangıç yatırımına ihtiyaç duymasıdır. Ayrıca, sistemin etkinliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak için araç tasarımı, kapasite, operasyonlar, tahrik, yönlendirme, enerji tedariki, trafik kontrolü ve güvenlik gibi hususlar da dahil olmak üzere Hyperloop'un teknik fizibilitesinin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Yüksek hızlarda dönüş yapanın zorluğu, yolcu konforunu ve güvenliğini potansiyel olarak etkileyen önemli bir ölçüttür. Tasarımda kapsüllerin dönüş mekanizmalarının dikkate alınması gerekmektedir. Hızlı hızlanma ve yavaşlama nedeniyle yolcular

üzerinde hareket hastalığı ve baş dönmesi olasılığı gibi etkiler bulunmaktadır. Ayrıca, şok dalgaları gibi delinmiş tünellerle ilişkili potansiyel riskler, sağlam güvenlik önlemlerine ve acil durum planlarına duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Ayrıca, Hyperloop sistemi halkın kabulü ve algısıyla ilgili zorluklarla karşılaşabilir. Avantajlarına rağmen, düşük basınçlı ortamlarda yolcu güvenliği ile ilgili endişeler ve bu yeni ulaşım şeklini kullanma korkusu, yolcular arasında benimsenmesini ve popülerliğini etkileyebilmektedir. Bu güvenlik endişelerinin giderilmesi ve Hyperloop'un faydalarının halka etkili bir şekilde anlatılması, ulaşım ağına başarılı bir şekilde entegre edilmesi için önem taşımaktadır. Çizelge 2.2’de Hyperloop ulaşım sisteminin avantajları ve dezavantajları verilmektedir.

Çizelge 2.2 : Hyperloop ulaşım sisteminin avantajları ve dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek hız kabiliyeti	Güvenli endişeleri
Enerji verimliliği	Yüksek ilk yatırım maliyeti
Kısa seyahat süreleri	Teknik fizibilite zorlukları
Sürdürülebilir ulaşım	Potansiyel kamu kabulü
Depreme karşı direnç	Yolcu sağlığı üzerindeki etki
Çevresel etkiler	
Trafik sorunu olmaması	

3. ELE ALINAN SİSTEM ÖZELLİKLERİ

Yüksek hızlı ulaşım sistemleri, modern toplumların mobilitesini ve ekonomik büyümesini destekleyen önemli altyapı unsurlarından biridir. Ulaşımında yüksek hızlara ulaşılması uzun süredir önemli bir çalışma konusu olmaktadır. Yeni ulaşım sistemlerinin çoğu ekonomik ve zaman açısından kısıtlamalar sebebiyle seyahat mesafelerini kısaltmak ve en yüksek hızlara ulaşmak amacıyla tasarlanmaktadır. Bu durum dünya çapınca pek çok ülkenin yaygın olarak kullandığı yüksek hızlı demiryollarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve Japonya gibi ülkelerin kullandığı Maglev sistemi ve beşinci ulaşım modu olarak tanıtılan Hyperloop sistemleri geliştirilmiştir.

Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Manyetik Levitasyon (Maglev) ve Hyperloop gibi farklı teknolojiler, bu alanda hız, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Ancak, hangi sistem veya teknolojinin tercih edilmesi gerektiğine karar verirken, bir dizi önemli ölçütün dikkate alınması gerekmektedir. Bu üç farklı ulaşım sistemini farklı teknik yönlerden karşılaştırmak mümkündür. Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop ulaşım sistemleri arasından seçim yapılırken dikkate alınacak ölçütler;

- Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop Ulaşım türlerinin genel özellikleri,
- Geometrik standartlar,
- Operasyonel gereksinimler,
- Maliyet,
- Enerji tüketimi,

- Çevresel etkiler, olmak üzere altı ana başlıkta toplanmıştır. Bu şekilde, geleceğin yüksek hızlı ulaşım altyapısının belirlenmesinde bilinçli ve verimli bir karar süreci sağlanabilmektedir.

3.1 Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop'un Genel Özellikleri

3.1.1 Hız, seyahat süresi

Yolcuların bir ulaşım türünü tercih ederken göz önünde bulundurdıkları en önemli ölçütlerden biri seyahat süresidir. Seyahat süresi, tasarım ve işletim hızına bağlı olarak değişmektedir. Maksimum tasarım hızı altyapıya bağlıdır. Bununla birlikte projenin kurp yarıçap eğimleri, dever gibi geometrik tasarımları da tasarım hızı esas alınarak yapılmaktadır. Maksimum işletim hızı trenlerin teknik özelliklerine bağlıdır. Burada maksimum işletim hızı tasarım hızından büyük olmamaktadır. Ortalama hız toplam hat uzunluğunun toplam seyahat süresine bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişmesiyle maksimum işletme hızları artış göstermektedir. Trenlerin aerodinamik yapısı, hat geometrisi, gürültü bileşeni gibi kısıtlamalar hız artışını etkileyen önemli etkenlerdir. Konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarının işletme hızları, tren özelliklerine ve hat yapısına göre ülkeden ülkeye değişmektedir. Ülkemizde ortalama 250 km/saat azami hız kullanılmaktadır. Konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarında hız rekoru 2007 yılında Fransız TGV POS yüksek hızlı treni tarafından kırılmıştır. TGV POS tren seti, Fransa LGV Doğu yüksek hızlı demiryolu hattında, TGV treni 574.8 km/sa hıza ulaşmıştır. Ancak bu rekor, yolcu taşımacılığı için değil, konsept ve mühendislik kanıtı elde etmek için kırılmıştır [18].

Shanghai Maglev treni Dünya'da ticari olarak kullanılan ilk maglev hattıdır. Longyang Lu ile Pudong Uluslararası Havalimanı arasında hareket eden hattın uzunluğu 30 kilometre olup maksimum işletme hızı 460 km/saat ve ortalama hızı 251 km/saattir [19]. Maglev hız rekoru 2015 yılında Japonya'ya ait L0 serisi SC Maglev treni tarafından kırılmıştır. Yamanashi test hattında gerçekleştirilen insanlı test sürüşünde 630 km/ saat hıza ulaşılmıştır. 2023 yılında Çin Havacılık ve Uzay Bilim ve Sanayi Kurumu tarafından yapılan bir testte maglev treni hava direncini azaltan bir vakum

tüpünden geçerek manyetik kuvvetler aracılığıyla bir kılavuz yol boyunca havalanmasını sağlanarak 623 km/saat hıza ulaşılmıştır.

2013 yılında yayınlanan Hyperloop Alpha raporunda, Hyperloop kapsülünün 1200 km/saat hıza ulaşabileceği hedeflenmektedir. Buna rağmen şu ana kadar ulaşılan en yüksek hız SpaceX tarafından yapılan bir yarışmada Münih Teknik Üniversitesi takımı tarafından elde edilen 457 km/saat'tir.

Çizelge 3.1 incelendiğinde, Hyperloop ulaşım türünün diğer türlere kıyasla daha hızlı "sisteminin herhangi ticari işletilen hattının bulunmaması bir dezavantaj olsa da istenilen yüksek hızlara ulaşılması halinde en avantajlı ulaşım türü olabilir. Her üç ulaşım sistemi için de hız konusunda geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Çizelge 3.1 : Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, Maglev ve Hyperloop sistemlerinin hızları [20].

Hız (km/sa)	TGV	ICE	Shangai MAGLEV	Hyperloop
Proje Hızı	350	330	550	1220
İşletme Hızı	300	280	430	Bilinmiyor
Ortalama Hız	250	200	290	965

İncelenen ulaşım sistemlerinin önemli bir farkı yüksek hızlara çıkarken ihtiyaç duydukları süre ve mesafedir. Maglev treni 300 km/sa hıza çıkabilmek için yaklaşık 4 km mesafeye ihtiyaç duyarken, konvansiyonel yüksek hızlı trenler ise 20 km'den daha fazla mesafeye ve yaklaşık iki katı süreye ihtiyaç duymaktadır. Hyperloop ulaşım sisteminde ise hedeflenen 1220 km/sa hıza yaklaşık 5,7 kilometre mesafede çıkması öngörülmektedir.

Hızlanma ivmelenmesi ise seyahat süresini büyük oranda etkileyen bir diğer faktördür. USDOT Federal Demiryolu İdaresi (FRA) 0,1 g (1m/s^2) 'yi şehirlerarası yolcu trenleri için sınırlayıcı bir ivme olarak kabul etmektedir çünkü bu değer yolcuların emniyet kemeri takmamasına, tuvaleti özgürce kullanmasına ve yiyecek ve içecekleri dökülmeden taşımasına izin vermektedir. Ülkemizde TCDD tarafından kullanılan, HT80001 YHT seti kullanılmaktadır. Bu tren seti için Uluslararası demiryolları birliği (UIC) tarafından verilen ivme tablosu aşağıda verilmektedir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 : HT80001 YHT setinin ivmelenme tablosu [21].

Hız (km/sa)	İvme (m/s ²)
0-160	1,1
160-165	1,025
165-175	0,875
175-180	0,80
180-210	0,7
210-300	0,6625

Aşağıdaki Çizelge 3.3’de Maglev için bir dizi potansiyel maksimum çalışma hızı ve 0,1 g kuvveti için hızlanma ve yavaşlama süresi ve mesafesi verilmektedir.

Çizelge 3.3 : Maglev aracının hızlanması [22].

Hız (km/sa)	Mesafe (m)	Süre (sn)
0-200	1700	61
0-300	4200	94
0-400	9100	148
0-500	10475	256

Aşağıdaki Çizelge 3.4’de Hyperloop ulaşım sistemi için bir dizi potansiyel maksimum çalışma hızı ve g kuvveti için hızlanma ve yavaşlama süresi ve mesafesi verilmektedir.

Çizelge 3.4 : Hyperloop kapsülünün hızlanması [15].

Hız (km/sa)	Ivmelenme	Mesafe (km)	Süre (sn)
600	0,5	29	340
	1	15	170
800	0,5	41	453
	1	26	227
1000	0,5	79	567
	1	40	284
1200	0,5	114	680
	1	57	340

Tablolar incelendiğinde Maglev ve Hyperloop araçlarının yüksek hızlara daha kısa mesafede ve sürede çıkabildiği görülmektedir. Hyperloop hedeflenen yüksek hızlara ulaştığında en kısa seyahat süresini sağlayacak ulaşım sistemi olacaktır. Çizelge 3.5’de Los Angeles-Las Vegas ve San Francisco-Los Angeles güzergahları için temsili seyahat süreleri belirtilmektedir [15].

Çizelge 3.5 : Temsili seyahat süreleri [15].

	Yüksek Hızlı Demiryolları	Maglev	Hyperloop
Los Angeles- Las Vegas (434,5 km)	84 dk*	61 dk	26 dk
San Francisco-Los Angeles	160 dk	86 dk	35 dk

*(LA-Victorville ve Victorville-LV olmak üzere 2 aktarma)

3.1.2 Kapasite

Kapasite, yolcular tarafından ulaşım sistemi türlerinin seçiminde dikkate alınan bir diğer etkidir. Bir hattın kapasitesi belirlenirken tren dizi sayısı, tren dizisi başına düşen yolcu sayısı ve sefer aralığı göz önünde bulundurulmaktadır.

Uygulanan itici gücün kuvveti, tren uzunluğu ve dizi başına maksimum yolcu sayısını belirlemektedir. Bunun yanı sıra tren uzunluğu belirlenirken nüfus yoğunluğu ve yolcu talebi gibi ölçütler dikkate alınmaktadır. Shinkansen hatları konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları işletmeciliğinde en yüksek yolcu kapasitesine sahiptir. Ülkemizde TCDD yüksek hızlı trenlerinde toplamda 419 yolcu kapasiteli olan setlerde 55 business, 354 ekonomi sınıf, 8 kafeterya ve 2 tekerlekli sandalye bölümü bulunmaktadır. Shanghaini Maglev treninin yolcu kapasitesi 574 iken Hyperloop Alpha bir kapsülde 28 yolcu bulunduracak şekilde tasarlanmaktadır. Sefer aralığı bir demiryolu hattının toplam kapasitesini belirlemede etkili olan diğer bir bileşendir. TGV ve Shinkansen hatları için sefer aralığı ortalama üç dakika, Shanghai Transrapid Maglev hattında ise sefer aralığı 15 dakikadır. Hyperloop Alpha raporunda sefer aralığı 2 dakika olarak düşünülmektedir. Ülkemizde ise en çok talep gören İstanbul-Ankara Yüksek Hızlı Tren hattı günde karşılıklı 16 sefer yapmaktadır, Çizelge 3.6'da ulaşım türlerinin kapasitesi ve Çizelge 3.7'de ulaşım türlerinin yıllık yolcu kapasitesi verilmektedir.

Çizelge 3.6 : Ulaşım türlerinin kapasitesi [20].

Ulaşım Türü	ICE	Shinkansen	TGV	Shanghai Maglev	Hyperloop
Model	ICE-03	SKS-E4	TGV-D	TR-08	Hyperloop Alpha
Tren Dizi Sayısı	8	16	12	6	1 Kapsül
Koltuk Kapasitesi	850	1634	1090	574	2
Sefer Aralığı	5	3	5	15	2
Tek Yönde Saatte Maksimum Yolcu Kapasitesi	10200	32680	13080	2296	840

Çizelge 3.7 : Ulaşım türlerinin yıllık yolcu kapasitesi.

Ulaşım Türü	Yüksek Hızlı Demiryolları	Maglev	Hyperloop
Araç Başına Yolcu Kapasitesi	1000 (CAHSR)	574	28
Tek Yönde Saatte Maksimum Yolcu Kapasitesi	1200	2296	840
Yıllık Yolcu Kapasitesi	140 Milyon	Bilinmiyor	15 Milyon

Çizelge 3.6’da ve Çizelge 3.7’de görülmektedir ki Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolu diğer iki ulaşım sistemine kıyasla daha yüksek kapasite imkânı sunmaktadır.

3.1.3 Diğer ulaşım sistemleri ile uyumluluk

Maglev ve Hyperloop ulaşım sistemleriyle karşılaştırıldığında konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları mevcut altyapıyı kullanma ve mevcut demiryolu hatlarıyla bağlantı kurma yeteneğine sahiptir. Yolcuların mevcut hatlara geçiş sağlayabilmesi seyahat sürelerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Hyperloop ve Maglev ulaşım sistemleri, kendine özgü ray sistemlerine sahiptirler. Bu sebeple mevcut diğer ulaşım modlarıyla uyumlu çalışmamaktadır. Hyperloop ve Maglev ulaşım türlerinin bu özelliği bir dezavantaj olarak kabul edilmektedir (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8 : Ulaşım türlerinin diğer modlarla uyumluluğu [23].

Ulaşım Sistemi	Yüksek Hızlı Demiryolları	Maglev	Hyperloop
Mevcut Ulaşım Sistemleri ile Uyumluluk	Mevcut demiryolu hatları ve diğer ulaşım modları ile uyumlu	Kendine özgü hat yapısı ve sistem gereksinimleri ile mevcut ulaşım sistemleri ile uyumlu değildir	Kendine özgü hat yapısı ve system gereksinimleri ile mevcut ulaşım sistemleri ile uyumlu değildir

3.1.4 Güvenlik, güvenilirlik, konfor

Geleneksel yüksek hızlı demiryolları, maglev ve hyperloop taşımacılık sistemlerinin güvenlik değerlendirmesi, yaygın olarak benimsenmeleri ve kamuoyu tarafından kabul görmeleri açısından kritik bir husustur. Yolcuların ulaşım modu seçiminde dikkate aldıkları diğer etkenler ise güvenilirlik ve konfordur.

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları dünya genelinde iyi oluşturulmuş güvenlik protokolleri, sıkı denetimli sinyalizasyon ve merkezi kontrol sistemleriyle güvenlik bakımından kendini kanıtlamış bir ulaşım sistemidir. Ayrıca gecikmeleri en aza indiren işletme programları ve kesintisiz hizmet sağlamalarıyla güvenilir bir ulaşım modu olduğu anlaşılmaktadır. Japonya Shinkansen hatları yüksek riske sahip deprem bölgelerinde, ortalama 1 dakikadan daha az gecikme süresiyle işletim sağlamaktadır. Yüksek hızlı trenler yumuşak sürüş deneyimi, ergonomik iç tasarımı, gelişmiş süspansiyon sistemleri ile yüksek hızlarda ve virajlarda sağladığı stabilite ile yolcular için konforlu bir seyahat sağlamaktadır. Genel olarak, geleneksel yüksek hızlı demiryolları güvenlik, güvenilirlik ve konfor sağladıkları için dünyanın birçok ülkesinde uzun mesafeli seyahatler için popüler bir seçimdir. Teknoloji ve altyapı bakımındaki sürekli gelişmeler bu hususları daha da iyileştirmektedir.

Maglev trenlerinde raylar trenin kılavuz yolu saracak şekilde tasarlanmaktadır. Kılavuz yol ile tren arasında kalan boşluk hassas kontrol sistemleri ile denetlenerek trenin raydan çıkma ihtimali ortadan kaldırılmaktadır. Shanghai Maglev hattının işletmeye açıldığından bugüne ölümlü kaza meydana gelmemiştir. Genel olarak, Maglev ulaşım sistemleri güvenlik, güvenilirlik ve konfor açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Tren ile ray arasındaki teması ortadan kaldırarak daha rahat, daha az gürültü ve daha fazla konfor sağlamaktadır. Manyetik kaldırma teknolojisinin bakımı zor olsa da, gelişmiş mühendislik ve sıkı güvenlik protokolleri Maglev sistemlerinin güvenilirliğini artırmaktadır.

Hyperloop ulaşım sisteminde ise, kapsüllerin düşük basınçlı tüpler içinde hareket edecek şekilde tasarlanması benzersiz güvenlik zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Tüplerin yapısal bütünlüğünü sağlamak ve ihtilalleri önlemek için ciddi önlemler alınması öngörülmektedir. Tüp ve kapsül tasarımının doğal afetlerden etkilenmeyecek şekilde tasarlanması düşünülmektedir. İnsan faktörünün de en aza indirilerek kaza

riskinin ortadan kaldırılması planlanmaktadır. Hyperloop ulaşım sisteminde ticari olarak işletilen bir hat bulunmadığından konfor ve güvenilirlik açısından veri bulunmamaktadır. Genel olarak, Hyperloop ulaşım sistemi uzun mesafeli seyahatlerde devrim yaratma konusunda umut vaat etse de, henüz geliştirme ve test aşamasındadır. Güvenlik, güvenilirlik ve konfor, Hyperloop projeleri üzerinde çalışan mühendisler ve tasarımcılar için temel odak alanları olmaya devam etmektedir. Çizelge 3.9’da sistemlerin güvenlik, güvenilirlik ve konfor açısından değerlendirilmesi verilmektedir.

Çizelge 3.9 : Ulaşım sistemlerinin güvenlik, güvenilirlik, konfor açısından değerlendirilmesi [23].

Ulaşım Sistemi	Yüksek Hızlı Demiryolları	Maglev	Hyperloop
Güvenlik	Güvenli	Güvenli	Bilinmiyor
Konfor	Konforlu ve zamanı verimli kullanılabilir	Uzun mesafeler için bilinmiyor anca muhtemelen YHD’ye benzer	Bilinmiyor
Güvenilirlik	Bur ve kar olaylarından etkilenir. Hava koşulları yolculuğu etkilediğinde geleneksel demiryolu ile ilave yolcu taşınabilmektedir.	Kılavuz yoldan ayrılmış olduğu için her türlü hava koşulunda çalışabilir	Olumsuz hava koşullarına karşı korunaklı

3.2 Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop Ulaşım Türlerinin Geometrik Standartları

Tren hareketi, hat geometrisine bağlılık göstermektedir. Hat geometrisi ile ilgili kavramlar arasında hat açıklığı, boyuna eğim, dever, yatay ve düşey kurp yarıçapları, geçiş eğrileri, en kesit genişliği gibi başlıkları yer almaktadır. Hat açıklığı demiryolu hattını oluşturan rayların iç kenarları arasındaki mesafedir. Dünyada yaygın olarak standart hat açıklığı 1435 mm kullanılmaktadır. Dever yatay kurbalarda taşıtların maruz kaldığı merkezkaç kuvvetinin etkisini azaltabilmek için uygulanan enine eğimdir. Demiryollarında dever iç ve dış raylar arasındaki yükseklik farkı olarak tanımlanmaktadır. Geçiş eğisi alıymandan kurbaya geçişin olumsuz etkilerini azaltmak ve daha fazla konfor sağlamak için kullanılan ilave yol elemanıdır. Demiryolu hattında yatay düzlemdeki eğrisel bölümlere yatay kurp, yol boykesitindeki

eğrisel bölümlere ise düşey kurp denilmektedir. Çizelge 3.10'da Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev ulaşım sistemleri için gerekli minimum yatay kurp yarıçapları verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev ulaşım sistemlerinin gerekli yatay kurp yarıçapları [24].

Hız(km/sa)	Yatay Kurp Yarıçapı (m)	
	Yüksek Hızlı Demiryolları	Maglev
200	1400	705
250	2250	1100
300	3200	1590
350	4000	2160
400	-	2825
450	-	3580

Hyperloop ulaşım sistemi için bu değerler kesin olarak bilinmemekle birlikte Elon Musk tarafından yayınlanan Hyperloop Alpha raporunda öngörülen yatay kurp yarıçapları Çizelge 3.11' de gösterilmektedir.

Çizelge 3.11 : Hyperloop Alpha raporunda öngörülen yatay kurp yarıçapları [15].

Hız (km/sa)	Hat	Yatay Kurp Yarıçapı (m)
480	Los Angelas-Grapevine South Hattı	3670
890	Los Angelas-Grapevine South Hattı	12550
1220	I-580/San Francisco Bay	23500

Hyperloop ulaşım sistemi içinse minimum düşey kurp yarıçapları ile ilgili kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Araçlar katı bir tüp içerisinde yer aldığından, Hyperloop ile herhangi bir yön değişikliği yapmak, özellikle de tüp içerisinde mahsur kalan araçların etrafından dolaşmak oldukça zordur. Tüp duvarıyla saatte 1200 km hızla çarpışmanın tolere edilemeyeceği açık olduğundan, ağırlık, enerji ve yönlendirme nedenleriyle aracın boyutu ciddi şekilde kısıtlanmaktadır. Ayrıca kılavuz yolun virajlarından veya eğimlerinden mümkün olduğunca kaçınmak gerekmektedir. Bir ICE veya bir Maglev treninin konfor seviyesinde kalmak için 1m/s²'lik yanal ivmenin aşılması gerekir, bu da Hyperloop'un 1200 km/s'lik maksimum hızında izin verilen düşey kurp yarıçapının 100 km'den fazla olması gerektiği anlamına gelmektedir.

Yüksek hızlı demiryolları ve Maglev ulaşım sistemlerinin minimum düşey kurp yarıçapları Çizelge 3.12'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.12 : Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev ulaşım sistemlerinin gerekli düşey kurp yarıçapları [24].

Ulaşım Sistemi	Yüksek Hızlı Demiryolları		Maglev	
Hız (km/sa)	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı
200	5200 m	6400 m	2600 m	5150 m
300	11700 m	14400 m	5790 m	11600 m
330	14200m	17400m	7000 m	14000 m
400	-	-	10300 m	20600 m
450	-	-	13000 m	26000 m

Tüm bu veriler ışığında Maglev ve Hyperloop sistemlerinin aynı hızda daha düşük kurp yarıçaplarına ihtiyaç duyduğu aynı kurp yarıçapında ise daha yüksek hızlara ulaşabildiği görülmektedir. Ayrıca Maglev trenleri %10 eğime çıkabilirken 300 km/saat hız için yarı yarıya daha küçük kurp yarıçapı kullanımına olanak sağlamaktadır. Bu durum konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları karşısında diğer iki ulaşım sistemine büyük avantaj sağlamaktadır.

Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryollarında kullanılan maksimum deveer 180 mm iken, Maglev sistemi için izin verilen devere değeri 12° yani yaklaşık 310 mm olarak belirlenmektedir. Bazı özel durumlarda 16° (410 mm)’ye kadar çıkmasına olanak sağlanmaktadır. Hyperloop ulaşım sistemi için bu değer kesin olarak bilinmemekle birlikte yapılan fizibilite çalışmalarında 12° yani yaklaşık 310 mm olarak kabul edilmektedir (Çizelge 3.13).

Çizelge 3.13 : Ulaşım sistemleri için gerekli maksimum devere değerleri [15, 23].

Ulaşım Sistemi	Yüksek Hızlı Demiryolları	Maglev	Hyperloop
Maksimum Devere (mm)	180	310	310

3.3 Maliyet

Maliyet, herhangi bir seçim yapılırken dikkate alınacak en önemli ölçütlerden biridir. Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, Maglev ve Hyperloop ulaşım sistemleri için toplam yatırım maliyeti, kullanılan teknolojiye, arazi gereksinimine, topografyaya, proje hızına bağlı olarak değişmektedir. Bunları inşa maliyeti, işletme ve bakım maliyeti olarak incelemek mümkündür.

İnşa maliyetleri hat altyapısının kurulumu ve geliştirilmesi için gereken unsurları içermektedir. Bu unsurlar arasında arazi satın alma, ray döşeme, tünel ve sanat yapıları

işleri, istasyon yapımı, elektrifikasyon ve sinyalizasyon sistemleri gibi etkenler yer almaktadır. Ayrıca, inşa maliyetleri coğrafi faktörler, proje ölçeği, teknolojisi seçimi gibi etkenlerden etkilenmektedir. İşletme maliyeti personel, yakıt, araç bakımı, altyapı kullanım ücretleri gibi unsurları içermektedir. İşletme maliyeti yasal düzenlemeler, özelleştirme politikaları ve hizmet kalitesi gibi etkenlerden etkilenmektedir. Özelleştirme politikaları işletme maliyetlerini etkileyerek yeni tekellerin oluşmasına ve hizmet kalitesinin düşmesine yol açabilmektedir. Demiryolu işletme maliyetlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi ve optimize edilmesi önem taşımaktadır. Bakım maliyetleri, hat altyapısı ve üstyapısının düzenli bakımını, hasar gören bileşenlerin onarımını ve değiştirilmesini içermektedir. Bu unsurlar demiryolu işletmeciliği için önemli maliyet kalemleridir.

3.3.1 İnşa maliyeti

İnşa maliyetlerini arazi ve planlama maliyeti, altyapı ve üstyapı inşa maliyetleri olarak incelemek mümkündür. Arazi ve planlama maliyetleri, arazi gereksinimi, fizibilite çalışmaları ve teknik tasarım gibi çeşitli faktörlerden etkilenir.

Arazi ve planlama maliyetleri, arazi gereksinimi, fizibilite çalışmaları, teknik tasarım gibi çok yönlü etkenleri kapsamaktadır. Bu maliyetler toplam yatırım tutarının yaklaşık %5-10 kadarlık bir kısmını oluşturmakla birlikte kamulaştırma maliyetinin yüksek olduğu projelerde büyük yer kaplamaktadır. Yüksek hızlı demiryolu yer tasarımının planlanması sırasında topografik koşullar, çevresel etki, mühendislik güvenilirliği, güvenlik ve yatırım geliri gibi etkenler dikkate alınmaktadır. Ayrıca, hat planlaması ve inşası, projenin genel maliyetini etkileyebilecek arazi yeniden düzenleme teknikleri de dahil olmak üzere istasyonların etrafındaki kentsel planlama ile yakından bağlantılıdır.

Demiryolu altyapısının inşası önemli bir yatırımdır ve bununla ilişkili maliyetler, demiryolu projelerinin planlanması ve yürütülmesinde çok önemli bir husustur. Demiryolu altyapısının inşası karmaşık ve pahalıdır. İlgili maliyetlerin genel proje bütçesi ve sürdürülebilirliği üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Demiryolu altyapı inşa maliyetleri, arazinin inşaata uygun hale getirilmesi ve platform inşa maliyetlerini içermektedir. Bu maliyetler genellikle proje bütçesinin yaklaşık %15-20'lik dilimini

oluşturmaktadır ancak arazinin durumuna göre gerekli görülen köprü, viyadük gibi sanat yapıları maliyeti %40-50 oranına kadar yükseltebilmektedir [1].

Üstyapı inşaat maliyetleri, demiryolu hattının stabilitesi, işlevselliği ve güvenliği için gerekli olan ray maliyeti, sinyalizasyon sistemleri, katener ve elektrifikasyon, demiryolu özel elemanlarının maliyeti gibi çok çeşitli bileşenleri, malzemeleri ve inşaat yöntemlerini kapsamaktadır. Bu maliyetler, demiryolu altyapısının genel yatırım maliyetlerinde önemli bir faktördür ve her biri yaklaşık olarak toplam maliyetin %5-10'luk bir kısmına denk gelmektedir. Demiryolu inşaat projelerinin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak için dikkatli bir değerlendirme ve optimizasyon gerektirmektedir.

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolu yapım maliyetleri dünya çapında değişmektedir. Çizelge 3.14'de dünya genelinde yapılan bazı yüksek hızlı demiryolu hatlarının ortalama yapım maliyetleri verilmektedir. Buradan yapım maliyetlerinin dünya genelinde projeden projeye değiştiği görülmektedir. Bu değişikliğin en önemli faktörü arazinin coğrafi özellikleridir. Bunun yanı sıra projelerin yapım yöntemleri ve proje özelinde ortaya çıkan özel gereksinimler nedeniyle de inşaat maliyetleri değişiklik gösterebilir.

Çizelge 3.14 : Bazı Yüksek Hızlı Demiryolları projelerinin inşaat maliyetleri [1].

Hat	Uzunluk (km)	Toplam Proje Maliyeti (Milyar \$)	Km Başına Maliyet (Milyon \$)
Tokyo-Osaka	570	0,92	1,6
Paris-Lyon	1000	2,03	2,06
Meinheim-Stuttgart	100	2,29	22,9
Paris-Baudrecourt	1080	4,37	4,05
Madrid-Barcelona	620	10,62	17,12
Milano-Bologna	185	10,73	58
Tokyo-Aomori	540	11,02	20,37
Beijing-Shanghai	1432	35,80	25

Maglev ulaşım sistemlerinin inşa maliyetleri, kullanılan özel teknoloji, projenin ölçeği ve coğrafi konum gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Maglev sistemlerinin inşası geleneksel demiryolu sistemlerine kıyasla teknolojinin gerektirdiği kendine özgü kılavuz yol, mevcut demiryolu altyapısı ile uyumlu çalışmaması ve tamamen yeni bir hat inşa edilmesi nedeniyle daha yüksek maliyetlere sahiptir. Ayrıca maliyetler, sabit mıknatıslı kızak, lineer endüksiyon motorları ve genel sistem tasarımı gibi çeşitli bileşenlerden ve hususlardan etkilenmektedir. Tren hattı boyunca döşenen sabit mıknatıslar, itme, kaldırma ve temassız güç aktarımı gibi sistemlerin maliyeti Maglev sisteminin toplam maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Çizelge 3.15’de dünya çapında ticari olarak işletilen Maglev hatlarının ortalama inşa maliyetleri verilmiştir. Shanghai ticari işletmeye açılan ilk hat olması nedeniyle en yüksek toplam maliyete sahip olduğu düşünülebilir.

Çizelge 3.15 : Dünya genelindeki Maglev hatlarının ortalama inşa maliyetleri [25].

Maglev Hat	Yıl	Ülke	Toplam Proje Maliyeti (\$)	Hat Uzunluğu (km)	Km Başına Maliyet (\$)
Shanghai	2004	Çin	1.580.000.000	30	52.666.666,667
Limino	2005	Japonya	922.000.000	8,8	104772.727,272
Incheon Havalimanı	2012	Güney Kore	342.000.000	6,1	56.065.573,770
Chuo Shinkansen	2016	Japonya	90.000.000.000	500	180.000.000
Baltimore Washington DC	2016	Amerika Birleşik Devletleri	12.000.000.000	65	184.615.384,615

Hyperloop inşa maliyetlerini kendine özgü yol hakkı, kapsül üretimi, istasyon yapım maliyetleri oluşturmaktadır. Hyperloop henüz ticari işletmeye geçmemiş kavramsal bir proje olduğundan burada önemli olan bir altyapı projesinin kavramsal tasarımı, nihai tasarımı, çevre planlaması ve arazi edinimini içeren toplam yatırım maliyeti, inşa maliyetlerinden daha fazla olmasıdır. Hyperloop Alpha raporunda bir hattın inşa edilmesi için gereken toplam maliyet 6 Milyon Dolar olarak belirtilmektedir. Virgin Hyperloop One tarafından Abu Dabi'den Dubai'ye önerilen yaklaşık 150 km'lik

Hyperloop hattı için tahmini maliyet yaklaşık 6,2 Milyar Dolar olarak açıklanmıştır. Önerilen Hyperloop hatları için öngörülen inşaat maliyetleri projeye ve coğrafi konuma göre değişmektedir. Hyperloop Alpha raporunda sistemin altyapı km başına düşen inşaat maliyetlerinin geleneksel yüksek hızlı demiryolları ve Maglev sisteminden önemli ölçüde daha düşük olduğu belirtilmiştir. Hyperloop hattında pylonlar üzerinde yükseltilmiş bir sistem inşa edilecek ve bu durumda sadece hava haklarının satın alınması doğrudan arazi ediniminden daha az maliyetli olmaktadır. Bu durum Hyperloop inşasının Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryollarından daha düşük maliyetli olabileceği fikrini ortaya koymaktadır. Ayrıca, sistemin mevcut otoyol geçiş hakkı üzerinde çalışabileceği varsayımı maliyetleri daha da düşürmektedir. Bunun yanı sıra, boru kılavuz yolunun çelik tekerlekli bir raylı sistemden daha hafif olacağı ve dolayısıyla yapımının daha az maliyetli olacağı anlaşılmaktadır. Çizelge 3.16’da bazı Hyperloop hatları için farklı şirketler tarafından yapılan fizibilite çalışmalarından elde edilen ortalama inşaat maliyetleri verilmiştir. Hyperloop ulaşım sisteminin inşaat maliyetleri Maglev ulaşım sistemi ile benzer olması beklenmektedir. Çizelge 3.16 incelendiğinde Hyperloop’un kilometre başına düşen ortalama inşaat maliyetlerinin Maglev’ e kıyasla çok daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.16 : Dünya genelindeki Hyperloop hatlarının ortalama inşaat maliyetleri [26].

Hyperloop Hat	Yıl	Hat Uzunluğu (km)	İstasyon Sayısı	Toplam Proje Maliyeti (Milyon \$)	Km Başına Maliyet (Milyon \$)
Los Angeles-San Francisco (Hyperloop Alpha)	2013	563	2	9750	17,3
Stockholm-Helsinki	2016	500	11	24700	49,4
Abu Dhabi- Dubai	2016	150	4	6240	41,6
Toronto-Windsor Koridoru	2017	350	-	10300	36,3
Noaca-Grate Lakes	2019	754	4	33020	43,8
Hyperloop	2020	500	2	28200	56,4

Üç sisteminde inşa maliyetleri incelendiğinde, Hyperloop Alpha raporunda diğer sistemlere göre km başına düşen inşa maliyetinin daha düşük olacağı öngörülse de yapılan fizibilite çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda Hyperloop'un Yüksek Hızlı Demiryollarından daha pahalı ancak Maglev hatlarından daha ucuza mal olacağı söylenebilir.

3.3.2 İşletme ve bakım maliyetleri

Demiryollarının işletme ve bakım maliyetleri, demiryolu yönetimi ve sürdürülebilirliğinin önemli bir unsurudur. Bu maliyetler, demiryolu altyapısı ve sistemlerinin bakımı, onarımı ve işletilmesi ile ilgili giderleri kapsamaktadır.

Altyapı işletme maliyetleri, elektrifikasyon, iletişim, güvenlik ve trafik yönetimi sistemleri ve hattın işlevselliğini korumak için gereken maliyetleri kapsamaktadır. Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolu hatlarının altyapı ve raylarının bakım maliyetleri, toplam bakım maliyetlerinin %40-65'ini oluştururken, sinyalizasyon maliyetleri %10-35'ini oluşturmaktadır. Tren işletim maliyeti, kullanılan enerji, lokomotif ve ekipman bakımı biletleme ve yönerim maliyetleri ise ulaşım hizmetlerinin sağlanabilmesi için gerekli olan diğer maliyet kalemleridir. Biletleme ve yönetim maliyetleri, bilet satışı ve istasyonlarda bilgi sistemleri kurmak için harcanan masraflardan oluşmaktadır ve işletmeciler şirketlere göre farklılıklar gösterebilmektedir [1].

Maglev sisteminde işletme ve bakım maliyetleri, hat ve ekipman bakım maliyetleri, enerji, yönetim ve personel maliyetlerini içermektedir. Maglev sistemlerinin bakım maliyetlerinin, düşük mekanik aşınma, düşük gürültü ve güçlü tırmanma kabiliyeti gibi avantajlar nedeniyle düşük olduğu bildirilmektedir. Maglev trenleri tekerlek olmadan askıda havada hareket ettiğinden, tekerlek ve rayların aşınma gibi hasarlar olmamaktadır. Düzenli bakıma ihtiyaç duymadıklarından Konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarına göre daha düşük bakım maliyeti bulunmaktadır. Ayrıca kullanılan sürücüsüz araçlar sayesinde personel kaynaklı işletme maliyetleri de azalmaktadır. Düşük bakım ve işletme maliyetleri Maglev sistemlerini verimli ve sürdürülebilir ulaşım için cazip bir seçenek haline getirmektedir.

Hyperloop Alpha raporunda öngörülen yolcu sayısı ve ücret tahsilatının 20 dolarlık bir ücretle günlük işletme maliyetlerini karşıladığı belirtilmiştir. Bunun dışında

Hyperloop ulaşım sisteminin işletme ve bakım maliyetleri ile ilgili herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Hyperloop'un en büyük işletme maliyeti olan enerjinin tamamen sistem üzerindeki kendi kendine yeten güneş panelleri tarafından karşılandığı varsayılmaktadır. Buradan yola çıkılarak enerji maliyetinin en aza indirgeneceği söylenebilir ancak hala dikkate alınması gereken günlük işletme ve bakım maliyetleri bulunmaktadır. Hyperloop teknolojisinde de araçların havada askıda gittiği düşünülürse aşınma ve yıpranma gibi hasarlar meydana gelmeyeceğinden bakım maliyetlerinin de düşük olacağı düşünülmektedir. Ayrıca vakumlanmış tüp içerisinde hareket edeceğinden olumsuz hava koşullarından oluşabilecek hasarlardan da etkilenmemektedir. Sistemin işleyişinin yüksek oranda otomatikleştirilmiş olması beklenmektedir. Böylece personel maliyetinin düşük olması düşünülmektedir. Ancak yine de ortaya çıkan sorunları ele almak için merkezi bir komuta merkezinden bazı insan kontrolü veya denetimi unsurlarına ihtiyaç olacaktır. Sistemin günlük işletimi asgari olarak sevkiyat, güvenlik ve bakımı içermektedir. Henüz işletmeye başlamış bir Hyperloop hattı bulunmadığından, işletme ve bakım maliyetleri tam olarak bilinmemektedir.

3.4 Enerji Tüketimi

Gün geçtikçe dünya genelinde küresel iklim değişikliğine oluşan bilinçlenme artmakta olup buna karşı çözüm politikaları ülkelere bağlı olarak değişmektedir. Sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmı ulaştırma sektöründen kaynaklanmaktadır. Bu nedenle ulaşım sektörünün enerji tüketimini azaltma çalışmaları devam etmektedir. Tren teknolojisi, istasyonlar arası mesafe, arazi yapısı enerji tüketimini etkileyen başlıca etkenlerdir. Trenlerin enerji tüketimi başlıca genellikle hızlanma, seyir ve yavaşlama evrelerinde, yuvarlama, aerodinamik, eğimi tırmanmak için harcanmaktadır. Maglev ve Hyperloop sistemlerinde ise aracı havaya kaldırmak için gerekli kuvvetlerin üstesinden gelmek için enerji harcanmaktadır. Bununla birlikte, trenlerdeki ekipmana güç sağlamak için de enerji tüketilmektedir. Özellikle hızlanma sırasında elektrik enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülmektedir. Dönüştürülen enerjinin bir kısmı, tren durmadan önce yavaşlama aşamasında rejeneratif frenleme ile geri kazanılmaktadır.

Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev ulaşım sistemleri enerji kaynağı olarak elektrik enerjisini kullanırlan Hyperloop sisteminde tüpler üzerine inşa edilen edilen güneş panelleriyle enerji sağlanmaktadır.

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları enerji yoğun yapılarıyla bilinmektedir ve ekonomik ve çevresel nedenlerle enerji tüketimlerini azaltmak çok önemlidir. Enerji verimli sürüş teknikleri, Aerodinamik sürtünmenin azaltılması, daha hafif tren üretilmesi, rejeneratif frenleme sistemlerinin kullanılması enerji tüketimini azaltmaya yönelik yapılan çalışmalardır. Öte yandan, Maglev ulaşım sistemlerinde trenin kılavuz yol ile temas halinde olmaması, yüksek verimliliğe sahip lineer motor ve düşük aerodinamik direnç sayesinde aynı çalışma hızında aynı seyahat mesafesi için tekerlek tabanlı raylı sistemlere kıyasla çok daha az spesifik enerji tüketimine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu da Maglev sistemlerinin enerji verimliliği açısından potansiyel bir avantaja sahip olduğunu göstermektedir. Maglev sisteminin konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarına göre %20-30 oranında daha az enerji tüketmektedir.

Buna karşılık Hyperloop ulaşım sisteminin ihtiyaç duyacağı tüm enerjiyi güneş enerjisinden karşılayacağı Hyperloop Alpha raporunda belirtilmektedir. Böylelikle Hyperloop sisteminin potansiyel olarak enerji tüketimini ve iklim değişikliğini önemli ölçüde azaltması öngörülmektedir. Ayrıca konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları ve Maglev'e göre daha az enerji tüketmesi düşünülmektedir. Bununla birlikte, Hyperloop'un enerji tüketimi ve diğer ulaşım sistemleriyle karşılaştırılması hakkında yayınlanmış sınırlı bilgi bulunmaktadır.

3.5 Çevresel Etkiler

Yüksek hızlı ulaşım teknolojileri çevreyi önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir ve bu etkilerin anlaşılması sürdürülebilir ulaşım gelişimi için çok önemli görülmektedir. Demiryolu ulaşım sistemleri, büyük ölçüde çevre dostu teknolojiler olarak bilinmektedir ve diğer ulaşım sistemlerine göre daha avantajlı görülmektedir. Burada incelenen yüksek hızlı ulaşım sistemlerinin çevresel etkileri çevresel etkileri arazi kullanımı, gürültü, titreşim ve manyetik alan etkisi olarak incelemek mümkündür.

3.5.1 Arazi kullanımı

Arazi kullanımı Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, Maglev ve Hyperloop sistemlerinin altyapısı, hatlar ve istasyonlar için ayrılan arazi alanını içermektedir. Hatların inşası için genellikle arazinin en büyük kısmı kullanılmaktadır. Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları gibi arazi ile eş düzey hatlar, hattın altında ve sinyal direklerinin yanında bulunan araziye tüketmektedir. Arazi kullanımının en aza indirilmesi çevreyi korumak için önemlidir.

Maglev ulaşım sisteminde genellikle kolonlar üzerinde yükseltilmiş hatlar kullanılmaktadır. Böylece yalnızca inşa edilen kolonların bulunduğu arazi kullanılmış olur. Hattın altında kalan arazi çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Bu durum Maglev sisteminin konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarına kıyasla daha az arazi kullandığını göstermektedir. Aynı durum teorik olarak Hyperloop ulaşım sistemi için de geçerlidir. Ancak ticari olarak işletmeye alınmış bir Hyperloop hattı olmadığından ne kadar arazi kullanımına sahip olacağı bilinmemektedir.

Ayrıca diğer iki ulaşım sisteminde aynı hızda izin verilen yatay kurba yarıçapları daha küçük, boyuna eğim ise konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarına göre daha büyüktür. Bu şekilde ulaşım sisteminin araziye daha kolay uyum sağlayacağı söylenebilir. Çizelge 3.17’de ulaşım sistemlerinin arazi kullanımları gösterilmektedir.

Çizelge 3.17 : Ulaşım sistemlerinin arazi kullanımı [27].

Ulaşım Sistemi	Yüksek Hızlı Demiryolları		Maglev		Hyperloop	
Arazi Tipi	Düz Alan	Engebeli Alan	Düz Alan	Engebeli Alan	Düz alan	Engebeli Alan
Ortalama Arazi Kullanımı (m ² /m)	26,2	43,5	22,2	24,4	Maglev ile benzer	

3.5.2 Gürültü

Gürültü sadece yolcuların maruz kaldığı bir sorun değildir. Hat güzergahının yakınında ikamet eden bireyler de gürültüye maruz kalmaktadır. Bu sorun gürültüye duyarlı alanlarda inşa edilen akustik duvarlar yardımı ile çözülmektedir. Konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları sisteminde gürültü tahrik sisteminden veya makineden, tekerlek- ray etkileşiminden, geçitler, makarlar ve kavşaklarda oluşan darbelerden, köprüler gibi dış kaynaklardan ve aerodinamik gürültülerden

kaynaklanmaktadır. Maglev ulaşım sisteminde trenin havada askıda hareket etmesiyle temas ortadan kalkmaktadır. Böylece temastan kaynaklanan mekanik gürültü oluşmamaktadır. Maglev trenleri aynı hızlarda konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarına kıyasla daha sessiz hareket etmektedir. Bu sayede Maglev sisteminin şehir içi hatlarda kullanımı avantajlıdır ancak 250 km/sa hızın üzerine çıkıldığında aerodinamik gürültü ortaya çıkmaktadır. Hyperloop'un, ulaşım sisteminde yolcu taşıyan kapsüllerin vakumlu bir tüp içinde çalışması nedeniyle herhangi bir nedenden kaynaklanan gürültü oluşmaması beklenmektedir. Virgin Hyperloop One şirketi tarafından 65 km/sa hızla yokuş aşağı hareket eden bir kamyonun gürültüsüyle 500 km/sa hızla giden kapsülün gürültüsünün aynı olacağı tahmin edilmektedir. Çizelge 3.18'de ulaşım sistemlerinin gürültü seviyeleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.18 : Ulaşım sistemlerinin gürültü seviyeleri [27].

Hız (km/saat)	Yüksek Hızlı Demiryolları (dB(A))	Maglev (dB(A))	Hyperloop (dB(A))
100	72	-	Bilinmiyor
160	79	70	Bilinmiyor
200	83	73	Bilinmiyor
250	88	78	Bilinmiyor
300	91	83	Bilinmiyor
400	-	91	Bilinmiyor

3.5.3 Titreşim

Konvansiyonel yüksek hızlı demiryollarında oluşan titreşimin büyük çoğunluğu ray-tekerlek etkileşiminden meydana gelmektedir. Maglev ulaşım sisteminde tren bu temas olmadan hareket ettiğinden burada daha düşük titreşim meydana gelmektedir. Hyperloop ulaşım sisteminde Maglev teknolojisine benzer şekilde kapsül temassız hareket edeceğinden titreşim seviyesinin daha az olması beklenmektedir.

3.5.4 Manyetik alan kuvveti

Maglev ulaşım sisteminde hareket manyetik alan kuvveti kullanılarak sağlanmaktadır. Tren ve kılavuz yol arasındaki boşlukta oluşan manyetik kuvvet yoğun ve konsantredir. Burada oluşan manyetik alan kuvveti yolcu, personel ve çevredeki insanların sağlığını etkileyecek sınırın altında kalmaktadır. Manyetik kuvvet 10 mm'lik boşluğun dışında etkisini kaybetmektedir. Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları ve Hyperloop için manyetik alan kuvvetinden söz etmek mümkün değildir.



4. YÜKSEK HIZLI İZLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin çok ölçütlü değerlendirilmesi, önemli bir karar verme sürecini içermektedir. Üç farklı sistem olan, Konvansiyonel Yüksek Hızlı Tren, Manyetik Levitasyon (Maglev) ve Hyperloop arasında bir seçim yapmak, her birinin avantajlarını ve dezavantajlarını dikkate almayı gerektirmektedir. Ancak, her sistem kendi uygulanabilirlik koşullarına sahip olmakla birlikte birinin diğerine tercih edilmesi, bir dizi farklı ölçüte dayanmaktadır.

Yüksek hızlı tren, uzun bir geçmişe sahip olması ve mevcut altyapıya kolayca entegre edilebilmesi gibi avantajlara sahiptir. Maglev teknolojisi ise mükemmel hız ve performans sunarken, inşaat maliyetleri genellikle daha yüksektir. Diğer yandan, hyperloop, düşük hava sürtünmesi ve yüksek hızlara olanak tanıyan vakum tüpleri gibi yenilikçi özellikler sunar, ancak teknolojinin henüz geliştirilme aşamasında olduğu ve altyapı gereksinimlerinin karmaşıklığı nedeniyle uygulanabilirliği belirsizdir. Bu sistemler arasında seçim yapmak için tek bir ölçütün kullanılması yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, çok ölçütlü değerlendirme yaklaşımı gerekmektedir. Maliyet, hız, kapasite, seyahat süresi ve çevresel etkiler gibi bir dizi faktörün dikkate alınması, objektif bir karar verme süreci sağlamaktadır. Bu şekilde, en uygun yüksek hızlı ulaşım sistemi seçilirken tüm önemli kriterler göz önünde bulundurulmuş olmaktadır.

4.1 Çok Ölçütlü Değerlendirme Yöntemi

Çalışmada Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop sistemlerinin literatürde bulunan verileri dikkate alınarak çok ölçütlü bir değerlendirmesi yapılacaktır. Çok ölçütlü değerlendirme yöntemleri, yüksek hızlı ulaşım sistemlerinin değerlendirilmesinde bilimsel ve objektif bir yaklaşım sunmaktadır. Öncelikle çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin uygulanması için

ölçütlerin ve bu ölçütlerin önem derecelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, ölçütlerin ve alt ölçütlerin önem derecelerinin belirlenmesinde araç olarak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılmaktadır.

AHP, çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden en sık kullanılanlar arasında bulunmaktadır. Karar verme sürecini yapılandırmak ve ölçütler arasındaki öncelikleri belirlemek için kullanılmaktadır. AHP, karar verme sürecindeki karmaşıklığı azaltmakta ve kriterlerin önem sırasını belirlemek için ölçeklendirme teknikleri kullanılmaktadır.

Birbirinden farklı kara tabanlı üç yüksek hızlı ulaşım sisteminin performanslarını karşılaştırmak için MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis) Yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntem, farklı ölçütlere sahip alternatiflerin performansını karşılaştırırken, kriter ağırlıklarını dikkate alarak objektif bir sıralama sağlamaktadır. MOORA yöntemi, her bir alternatifin her bir ölçüt altında elde ettiği performansı ölçerken, bu performansları birbirine oranlar ve standartlaştırır. Bu sayede, farklı ölçütlere sahip kriterler arasında karşılaştırma yapılabilir hale gelir. Özellikle, öznel olmayan yönsüz değerler kullanılması, uygulama kolaylığı, hesaplama süresinin azlığı, güvenilirlik oranının yüksek olması gibi özellikleriyle bu çalışma için etkili bir yöntem olarak kabul edilmiştir.

4.1.1 Analitik hiyerarşi süreci (Analytial Hierarchy Process-AHP)

İlk olarak Alpet ve Myers tarafından 1968 yılında ortaya konularak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Saaty tarafından 1977 yılında çok kriterli karar verme problemlerini çözmek için kullanılabilir bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Karmaşık problemlerin hiyerarşik bir yapı içinde ele alınarak çözülmesini sağlayan AHP, nicel ve nitel ölçütleri değerlendirerek grup veya bireyin tercihlerini, deneyimlerini, sezgilerini, bilgilerini, yargılarını ve düşüncelerini karar sürecine dahil edebilen bir Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemidir. Karar verici hem objektif hem de subjektif görüşlerini karar verme sürecine dahil edebilmektedir. Bu nedenle, bu durum karar vericilere kendi karar verme mekanizmalarını tanıma fırsatı sunmaktadır [29].

AHP, karmaşık problemlerin hiyerarşik bir modelde yapılandırılmasını içeren bir karar verme metodolojisidir. Karar kriterleri, öncelik ölçekleri türetmek için ikili karşılaştırmalar yoluyla karşılaştırılmaktadır [28]. AHP, çok kriterli karar verme

senaryolarında önceliklerin belirlenmesi için yönetim bilimi, yöneylem araştırması, çevre bilimi ve mühendislik gibi çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmaktadır.

AHP'de hiyerarşi en az üç seviyeden oluşmaktadır. Hiyerarşinin en üst seviyesinde bir hedef bulunmaktadır. Hedefin altında ana ölçütler, ana ölçütlerin altında ise alt ölçütler yer almaktadır. Hiyerarşinin en altında ise alternatifler bulunmaktadır. Ölçütlerin sayısı ve her birinin ayrıntılarının doğru tanımlanması ikili karşılaştırmaların tutarlı olabilmesi için önem taşımaktadır. AHP, çok sayıda alt ölçüt kullanılabilir. Ana ölçütler, alt ölçütler ortak özellikleri göz önünde bulundurularak gruplandırılmaktadır. Sonucun esnekliğini değerlendirmek için duyarlılık analizi kullanılmaktadır. Hiyerarşinin ve ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması subjektif olduğundan, konusunda uzman ve deneyimli karar vericilere ihtiyaç duyulmaktadır.

AHP'nin en önemli özellikleri arasında, uzman yargılarını ve tercihlerini karar verme sürecine dahil ederek alternatiflerin hem öznel hem de nesnel kriterlere göre değerlendirilmesini sağlaması yer almaktadır. Yöntem, hedefleri, kriterleri, alt kriterleri ve karar alternatiflerini içeren hiyerarşiler oluşturmayı içermekte ve karar analizine yapılandırılmış bir yaklaşımı kolaylaştırmaktadır. AHP, son birkaç on yıldır çok kriterli karar verme problemlerinin ele alınmasında basitliği, rasyonelliği ve etkinliği ile kabul görmektedir. AHP'nin esnekliği ve geniş uygulanabilirliği, karmaşık sorunları etkili bir şekilde ele almak için kapsamlı bir şekilde çalışılmasına ve diğer karar verme yaklaşımlarıyla entegre edilmesine yol açmaktadır.

AHP yönteminde ilk olarak problem tanımlanmaktadır. Alternatifler arasında karar verebilmek için ihtiyaç duyulan ölçütler ve ölçüt öncelikleri belirlenmektedir. Daha sonra hiyerarşik yapı oluşturulmaktadır. Hiyerarşik yapıda en üstte amaç, onun altında ise ana ölçütler ve alt ölçütler yer almaktadır. Karar seçenekleri ise hiyerarşinin en alt basamağında bulunmaktadır. Hiyerarşinin aşama sayısı problemin karmaşıklığı ve detay derecesine göre değişmektedir. Hiyerarşi oluştururken, aynı düzlemde bulunan seçenekler birbirinden tamamen ayrıdır. Üçüncü adımda ikili karşılaştırmalar matrisi oluşturulmaktadır. Karşılaştırma matrisi köşegen elemanı 1 olan karar matristir (4.1). 1'den 9'a kadar değerler alan bir önem derecesi ölçeği kullanılarak matrisler oluşturulmaktadır. Matrisler, önce temel ölçütler, varsa alt ölçütler ve son olarak tüm

ölçütlerin dikkate alınarak ölçütlere göre karar seçeneklerinin karşılaştırılmasını içermektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} = 1/a_{1n} & a_{n2} = 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Burada, a_{ij} , i-inci ölçüt ile j-inci ölçütün ikili karşılaştırma değerini temsil etmektedir. a_{ji} değeri $1/a_{ij}$ 'den elde edilmektedir. Buna karşılık olma özelliği adı verilmektedir. Alternatifler her bir ölçüte göre ayrı ayrı karşılaştırılmaktadır. Karar matrisleri Saaty tarafından önerilen 1-9 karşılaştırma ölçeği kullanılarak oluşturulmaktadır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Karşılaştırma ölçeği.

Önem	Tanım	Açıklama
1	Eşit öneme sahip	Her iki seçenekte eşit değerde öneme sahiptir
2	Zayıf ya da hafif	
3	Biraz önemli	Bir ölçüt diğerine göre biraz daha önemli sayılmıştır
4	Makul artı	
5	Fazla önemli	Bir ölçüt diğerine göre çok daha önemli sayılmıştır
6	Güçlü artı	
7	Çok fazla önemli	Ölçüt diğer ölçüte göre kesinlikle çok daha önemli sayılmıştır
8	Çok çok güçlü	
9	Son derece önemli	Bir ölçütün diğerine göre son derece önemli olduğu çeşitli bilgilere dayandırılmıştır

Daha sonra oluşturulan ikili karşılaştırma matrisindeki her eleman kendi sütun toplamına bölünerek normalize edilmektedir. Normalize edilmiş matrisin her bir sütun toplamı 1 olmaktadır. Normalizasyon işlemi için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (4.2).

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

Normalize edilmiş bir matrisin her bir satırının toplamının matrisin boyutuna bölünmesiyle matrisin ortalaması bulunmaktadır. Her bir ölçüt için hesaplanan önem ağırlıkları bu değerler olarak belirlenmektedir. Öncelik vektörü bu ağırlıklar tarafından oluşturularak hesaplanmaktadır. Öncelik vektörü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır (4.3).

$$w_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n a_{ij}' , i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

Bu sayede, ölçütlerin birbirlerine göre ne kadar önemli olduğunu gösteren yüzde önem dağılımları oluşturulmaktadır.

Sonraki adımda ikili karşılaştırmalar yapılarak öncelikler belirlendikten sonra karşılaştırma matrislerinin tutarlılığı hesaplanmaktadır. Bir A matrisinin tutarlı olup olmadığını belirlemek için, iki karşılaştırma yargısı sonucunda ortaya çıkan bir katsayının hesaplanması gerekmektedir. Katsayının hesaplanması, "Tutarlılık İndeksi (Consistency Index-CI)" olarak tanımlanmaktadır (4.4-4.8). Burada,

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.4)$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \quad (4.5)$$

olarak hesaplanmaktadır.

$$AXW = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} = 1/a_{1n} & a_{n2} = 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$d_i = \frac{x_i}{w_i} , i = 1, 2, \dots, n \quad (4.7)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (4.8)$$

Burada hesaplanan tutarlılık indeksini değerlendirebilmek için n alternatif sayısına bağlı olarak belirlenen “Rastgele İndeks (Random Index-RI)” değeri kullanılmaktadır. Çizelge 4.2’de RI değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.2 : Karşılaştırma matrislerinin boyutlarına göre RI değerleri.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

Tutarlılık İndeksi CI ve rastgele indeks RI hesaplandıktan sonra “Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio-CR)” aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır (4.9).

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad CR \leq 0.10 \quad (4.9)$$

Tutarlılık oranı 0.10’dan küçük olması karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğunu göstermektedir. Daha sonra tüm ölçütler için ikili karşılaştırma matrisi oluşturularak, alternatiflerin öncelik vektörü hesaplanmaktadır. Bu öncelik vektörü, ölçütlerin önemini belirten ağırlık vektörü olarak da tanımlanmaktadır. Tüm öncelikler matrisi, ölçütler için elde edilen öncelik vektörleri birleştirilerek oluşturulmaktadır. Sonuç vektörü, tüm öncelikler matrisi ile karar seçeneklerinin öncelik vektöründen toplanır ve çarpılır. Problemin çözümü için tercih edilmesi gereken karar seçeneği bu vektörde en yüksek ağırlığa sahiptir.

4.1.2 MOORA (multi-objective optimization on the basis of ratio analysis) yöntemi

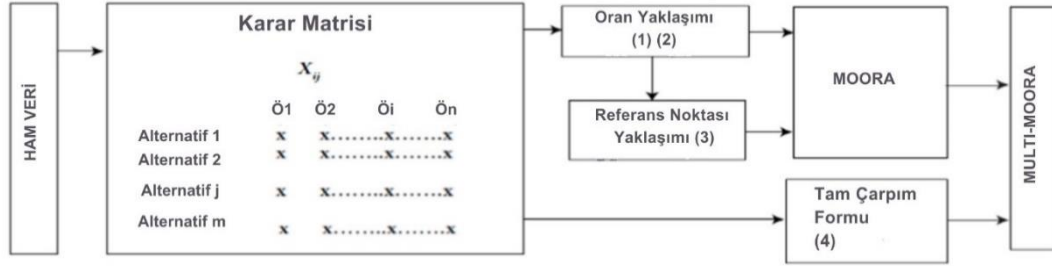
MOORA yöntemi 2006 yılında Willem Karel M. BRAUERS ve Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS tarafından geliştirilen orantısal analize dayalı bir Çok Ölçütlü Karar Verme yöntemidir.

Bu yöntem, bir dizi etken göz önünde bulundurularak karar verilmesi gereken durumlarda, karar vericilerin aynı anda birden fazla çelişkili ölçüte dayalı seçenekleri karşılaştırmasına olanak tanımaktadır. MOORA yönteminin diğer ÇÖKV yöntemleri arasında öne çıkan özellikleri arasında öznel ağırlıklı normalleştirme yerine öznel olmayan yönsüz değerler kullanılması, tüm amaçları değerlendirmeye alması aynı zamanda alternatifler ve amaçlar arasındaki tüm etkileşimleri aynı anda dikkate alması bulunmaktadır. Ayrıca uygulamasının daha basit olması, hesaplama süresinin azlığı, güvenilirlik oranının yüksek olması gibi özellikleriyle de öne çıkmaktadır. MOORA yöntemi nicel verilere uygulanmaktadır. İşlem basamaklarının farklılaşması ile çeşitli MOORA yöntemleri geliştirilmiştir.

- MOORA - Oran Yöntemi
- MOORA - Referans Noktası Yaklaşımı
- MOORA - Tam Çarpım Formu Yaklaşımı

MULTI-MOORA ise geliştirilen bu yöntemlerin sıralamalarını en son baskınlıklarına göre son bir değerlendirme yapan yöntemdir. Bu sayede MOORA yöntemini mevcut

Çok Amaçlı Karar Verme Metotları arasında dayanıklılık (robustness) açısından en üst noktaya taşınmaktadır [30].



Şekil 4.1 : MOORA yöntemi diyagramı.

4.1.3 MOORA-oran yöntemi

MOORA yöntemleri temel olarak MOORA-Oran yöntemi ile başlamaktadır. MOORA yöntemi farklı alternatiflerin çeşitli ölçütlere göre performansını gösteren bir karar matrisi ile başlamaktadır (4.10). Karar vericiler tarafından sürecin başında oluşturulan matris, karar matrisi olarak tanımlanmaktadır.

$$\begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{matrix} \quad (4.10)$$

Burada, satırlarda alternatifler, sütunlarda ise ölçütler sıralanmaktadır. x_{ij} ile gösterilen ifade, j. kritere göre i. alternatifin performans ölçüsü, m alternatif sayısı ve n ölçüt sayısı olarak ifade edilmektedir.

Sonraki adımda karar matrisi normalize edilmektedir. Burada amaç karar matrisinin boyutsuz hale getirilerek tüm elemanların karşılaştırılabilir olmasıdır. Normalleştirme işlemi bir alternatifin bir kriter üzerindeki performansının, o kritere ilişkin tüm alternatifleri temsil eden bir payda ile karşılaştırıldığı bir oran sistemi olarak tanımlanmaktadır. Normalleştirilmiş değerler aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır (4.11).

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,m \quad (4.11)$$

x_{ij}^* , [0, 1] aralığında boyutsuz bir sayıdır ve j-inci kritere göre i-inci alternatifinin normalleştirilmiş performansını temsil etmektedir. Karar matrisinin elemanlarının

ölçütlerin fayda veya faydasız ölçütleri olması dikkate alınmaksızın normalize edilmektedir.

Normalleştirilmiş değerler faydalı ölçüt değerleri ve faydalı olmayan ölçüt değerleri kendi içinde toplanarak faydalı olmayan ölçüt değerleri faydalı ölçüt değerlerinden çıkarılmaktadır (4.12).

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,m \quad (4.12)$$

Yukarıda belirtilen eşitlik ile tanımlanan ölçütlere göre her bir karar seçeneğinin performansı belirlenmektedir. Eşitlikte, g maksimize edilecek ölçüt sayısı, n-g minimize edilecek ölçüt sayısı, y_i^* , $i=1,2,\dots,n$, karar seçeneği i'nin tüm ölçütlere göre normalize edilmiş değerlerini ifade etmektedir. Azalan sırada sıralandığında, en yüksek değerlendirme değerine sahip olan en iyi alternatif olarak belirlenmektedir. Bu sıralama; ilk geliştirilen MOORA yöntemi olması sebebiyle, literatürde sadece 'MOORA' olarak da gösterilmektedir.

Yapılan araştırmalar, yöntemin karar vericiler, hedefler ile alternatifler arasındaki ilişkiler açısından oldukça sağlam olduğunu göstermektedir. Mevcut ÇÖKV yöntemlerinden daha güvenilirdir çünkü subjektif değildir ve en yeni ve kardinal verilere dayanmaktadır. Bu yöntem öznel olması ve en son verilere dayanması nedeniyle mevcut ÇÖKV yöntemlerine göre daha güvenilir bulunmaktadır.

4.1.4 MOORA-referans noktası yaklaşımı

MOORA referans noktası yaklaşımının MOORA-Oran yöntemine ek olarak her amaç için ayrı 'maksimal amaç referans noktaları' belirlenmektedir. Karar matrisinin normalleştirilmiş değerleri göz önüne alındığında, bir kriter değerinin belirlenen referans noktasından ri sapması ($ri-x_{ij}$) olarak elde edilmektedir. Referans noktaları, minimizasyon için min, maksimizasyon için max noktaları olarak belirlenmektedir. Tüm faydalı kriterler maksimum değerlere ulaştığında ve faydalı olmayan kriterler minimum değerlere ulaştığında, alternatif en iyi seçenek olmaktadır. Bununla birlikte, tüm faydalı kriterleri maksimum değerlere ve tüm faydalı olmayan kriterleri minimum değerlere sahip bir alternatif bulmak neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, faydalı kriterler için maksimum değerlere ulaşamayacağım ve faydalı olmayan kriterler için minimum değerlere ulaşamayacağım için sapmalar olmaktadır. Performans endeksi

(Pi), i-inci alternatif için dikkate alınan tüm faydalı ve faydasız kriterler için bu toplam sapmayı hesaplamak için aşağıda belirtilen yöntem kullanılarak oluşturulmaktadır (4.13).

$$P_i = \min_j(\max_i(r_j - x_{ij}^*)) \quad (4.13)$$

i= 1,2,...,n ölçütlerin sayısını

j=1,2,...,m alternatiflerin sayısını

x_{ij}^* , i-inci Ölçütün j-inci alternatifteki normalleştirilmiş değerini

r_j = j-inci alternatifin referans noktasını ifade etmektedir.

Oluşturulan yeni matriste Tchebycheff min-max metrik işlemi uygulanmakta ve her bir alternatifteki en yüksek değerler seçilerek Referans Noktası yaklaşımına göre sıralama yapılmış olmaktadır. Tüm faydalı ve faydasız ölçütler göz önünde bulundurulduğunda en düşük toplam sapmaya sahip olan alternati en iyi seçenek olmaktadır.

4.1.5 MOORA-tam çarpım formu yaklaşımı

MOORA (MULTIMOORA) yönteminin tam çarpımsal formunu karma formlardan ayırmak amacıyla aşağıdaki denklemi geliştirilmiştir (4.14-4.17).

$$U_j = \prod_{i=1}^n x_{ij} \quad (4.14)$$

$$U'_j = \frac{A_j}{B_j} \quad (4.15)$$

$$A_j = \prod_{g=1}^i x_{gi} \quad (4.16)$$

$$B_j = \prod_{k=i+1}^n x_{kj} \quad (4.17)$$

U_j ; alternatiflerin uygulanabilirliğini,

U'_j ; j-inci kriterin kullanılabilirliğini,

A_j ; maksimize edilmiş ölçütlerin sayısını,

B_j ; minimize edilmiş ölçütlerin sayısını,

$i=1,2,...,n$ ölçütlerin sayısını,

$j=1,2,...,m$ alternatiflerin sayısını ifade etmektedir.

Bu eşitlikte fayda ölçütleri pay ve faydalı olmayan ölçütler payda olarak alınmaktadır. Buradan elde edilen sonuçlar en yüksek değerden en düşük değere doğru sıralanarak tam çarpım formu matrisi elde edilmektedir.

Brauers ve Zavadskas yaptığı çalışmalarda x_{ij} değerlerinden herhangi birinin 0 olması durumunda, karar matrisinde belirli bir kriterin bulunmadığını gösteren bir filtrelemeden vazgeçilmesi veya o kriterin karar matrisinden çıkarılmasını önermektedir.

4.2 Ölçütlerin Belirlenmesi

Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop gibi yüksek hızlı ulaşım sistemleri, günümüz toplumlarının dinamizmine ve ekonomik ilerlemesine katkı sağlayan temel altyapı unsurları arasında bulunmaktadır. Hangi sistem veya teknolojinin tercih edilmesi gerektiği konusunda karar vermek karmaşık bir süreçtir. Bu süreçte dikkate alınması gereken bir dizi önemli ölçüt bulunmaktadır. Ölçütler, karar verme sürecinde değerlendirilen ölçülebilir veya değerlendirilebilir özellikler veya faktörlerdir. Yüksek hızlı ulaşım sistemlerinin karşılaştırılması için belirlenen ölçütler, farklı sistemlerin performansını değerlendirmek ve karar verme sürecine rehberlik etmek için kullanılmaktadır. Bu ölçütler, karar vericiler tarafından belirlenen hedeflere ve önceliklere dayanabilmektedir. Bu ölçütlerin belirlenmesi, karar vericilere objektif bir değerlendirme yapma ve en uygun çözümü seçme konusunda yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada sistemlerin genel performans özellikleri, geometrik standartları, maliyet ve çevresel etkiler olmak üzere dört adet ana ölçüt belirlenmiştir. Şekil 4.2’de belirlenen ana ölçütler ve bunların alt ölçütleri gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Hiyerarşik yapı.

Üç ulaşım sistemi arasında etkili bir kıyaslama yapabilmek adına Hyperloop ulaşım sisteminin henüz ticari olarak işletilen bir hattı bulunmadığı göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle, literatürde her üç sistem için veri bulunan ölçütler dikkate alınarak ölçütler belirlenmektedir.

4.2.1 Genel performans özellikleri

Genel performans özellikleri ana ölçütü başlığı altında hız, seyahat süresi, kapasite, ivmelenme, sefer aralığı, iki istasyon arası mesafe, mevcut ulaşım sistemleri ile uyumluluk alt ölçütleri yer almaktadır. Yüksek hızlı ulaşım sistemleri arasından bir seçim yaparken, hız, seyahat süreleri, mevcut sistemler ile uyumluluk, kapasite özellikleri en önemli özellikler olarak değerlendirilmektedir. Bu sebeple genel performans özellikleri bu seçimde en önemli ana ölçüt olarak görülmektedir.

4.2.1.1 Hız

Hız alt ölçütü ile ortalama ticari hız esas olarak alınmaktadır. Hızın artması seyahat sürelerini kısatacaktır. Dolayısıyla yolcu talebini artıracakları öngörülmektedir. Yapılan test sürüşlerinde Yüksek Hızlı Demiryollarında yaklaşık 575 km/saat hızlara ulaşılmıştır. Avrupa’da proje hızı 350-300 km/saat, İşletme hızı yaklaşık 250-300 km/saat ve ortalama hız 200-250 km/saat aralığında değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada ortalama ticari hız konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları için 250 km/saat

olarak belirlenmiştir. Maglev ulaşım sisteminde ise test sürüşlerinde 630 km/saat'lik hızlara ulaşılmıştır. Çin'de ticari olarak işletilen Shangai Maglev treninde proje hızı 550 km/saat, maksimum işletme hızı 430 km/saat ve ortalama hız 290 km/saat'tir. Bu çalışmada ortalama ticari hız olarak 300 km/saat belirlenmiştir. Hyperloop sisteminde ticari olarak işletilen bir hat bulunmamaktadır. Hız konusunda geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Öngörülen proje hızı 1220 km/saat ve öngörülen ortalama hız 965 km/saat'tir. Bu çalışmada Hyperloop ulaşım sistemi için ticari ortalama hız literatürde yapılan diğer çalışmalar göz önünde bulundurularak 1000 km/saat olarak belirlenmiştir.

4.2.1.2 Hızlanma ivmesi

Hızlanma İvmesi alt ölçütü ile araçların hızlanma ivmelenmesi esas alınmaktadır. Bu alt ölçüt seyahat sürelerinin ve istasyonlar arası mesafelerin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada YHT için hızlanma ivmesi proje hızı ve Çizelge 3.2 baz alınarak 0,066 m/s² olarak belirlenmiştir. Maglev İnşaat ve İşletme Yönetmeliği referans alınarak Maglev sistemi için hızlanma ivmesi sabit 1,5 m/s² olarak kabul edilmektedir [22]. Hyperloop için normal hızlanma için konfor değeri -0,6 m/s² ile +1,2 m/s² arasında sınırlandırılmıştır [31].

4.2.1.3 Seyahat süresi

Seyahat süresi alt ölçütü şüphesiz bir ulaşım modunun tercih edilmesinde en önemli ölçütlerden biridir. Seyahat süresi, ortalama hıza, maksimum işletme hızına, hızlanma ve frenleme ivmelerine göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 4.3'de yaklaşık 500 km'lik bir mesafe için tahmini seyahat süreleri verilmektedir.

Çizelge 4.3 : 500 km'lik mesafe için üç sistemin seyahat süresi ve kapasite tahmini.

	Yüksek Hızlı Demiryolları (300 km/sa)	Maglev (500 km/sa)	Hyperloop (1200 km/sa)
Seyahat Süresi (dk)	107	66,3	37,2
Kapasite	40000	20000	1200
Çift yönde işletilen araç sayısı	46	140	88

Burada belirtilen seyahat sürelerine istasyondan istasyona olarak değerlendirilmiş ve yükleme ve boşalma dahil edilmiştir. Hyperloop için hızlanma ivmesi 1 m/s² ve hem

tren hem de Maglev için mesafenin en iyi durumda 90 saniye olduğu, Hyperloop için 2 dakika mesafe olduğu varsayılmaktadır. Çizelge 4.3 incelendiğinde Hyperloop ile önemli bir zaman tasarrufu sağlansa da taşıma kapasitesinin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir.

Bu çalışma kesin seyahat süreleri bilinmemektedir. Seyahat süresi alt ölçütü 1-9 karşılaştırma ölçeği kullanılarak Çizelge 4.3'e göre puanlanmıştır. Sırasıyla Yüksek Hızlı Tren, Maglev Ve Hyperloop ulaşım sistemlerine 9, 5, 1 puan verilmiştir.

4.2.1.4 Sefer aralığı

Sefer Aralığı alt ölçütü hattın toplam kapasitenin belirlemek için önemli bir diğer etkidir. Shinkansen hatları için en düşük sefer aralığı ortalama 3 dakika, TGV hatları içinse ortalama 5 dakikadır. Ülkemizde bulunan YHT hatları her 4 dakikada bir sefer yapılabilecek altyapıya sahip olup talebin düşük olması ve taşıt parkının az olması sebebiyle günde ortalama 50- 55 dakika sefer aralığıyla işletilmektedir. Çalışmada kullanılacak yüksek hızlı tren için sefer aralığı 5 dakika olarak belirlenmiştir. Sefer aralığı Shanghai Maglev hattında 15 dakikadır. Hyperloop ulaşım sistemi için ise bu değer 2 dakika olarak öngörülmektedir.

4.2.1.5 Kapasite

Kapasite alt ölçütü ile günlük tek yönde taşınabilecek maksimum yolcu sayısı esas alınmaktadır. Trenlerin yolcu kapasitesi aracın modeline göre değişiklik göstermekle birlikte tren dizisi sayısına göre artırılıp azaltılabilmektedir. Hatların 24 saat çalışacağı düşünülmüştür. Çizelge 4.4'de ulaşım sistemleri için sefer aralığı, araç kapasitesi ve günlük taşıyabileceği maksimum yolcu sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Ulaşım sistemlerinin sefer aralığı, araç kapasitesi, maksimum yolcu kapasitesi tahmini.

	Yüksek Hızlı Demiryolları	Maglev	Hyperloop
Sefer Aralığı (dk)	5	15	2
Araç Kapasitesi	1000	574	28
Tek Yönde Günlük Maksimum Yolcu Kapasitesi	228000	55104	20160

4.2.1.6 Mevcut ulaşım sistemleri ile uyumluluk

Mevcut ulaşım sistemleri ile uyumluluk önemli alt ölçütlerden bir diğeridir. Yolcuların mevcut hatlara geçiş sağlayabilmesi seyahat sürelerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bununla birlikte yeni inşa edilecek hat için mevcut altyapının kullanılabilir olması inşa maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryolları mevcut demiryolu hatları ve diğer ulaşım modları ile uyumludur. Maglev ve Hyperloop ulaşım sistemleri ise kendine has hat yapısı ve sistem gereksinimlerine ihtiyaç duymaktadır. Mevcut ulaşım sistemleri işe uyumlu değildir. Bu alt ölçüt için sayısal bir veri bulunmadığından sistemler Saaty tarafından önerilen 1-9 karşılaştırma ölçeği kullanılarak puanlanmıştır. Bu durumda tüm sistemlerle uyumlu olması ile YHD en faydalı, Maglev ve Hyperloop, YHD'ye kıyasla daha az faydalı olarak belirlenmiştir. Sırası ile Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop ulaşım sistemlerine 9, 1, 1 puan verilmiştir.

4.2.1.7 İki istasyon arası mesafe

İki istasyon arası mesafe alt ölçütü sistemin verimliliğini ve etkinliğini belirlemede önemli rol oynamaktadır. İstasyonlar arası mesafe arttıkça talep artmaktadır. Bu sebeple mesafenin az olması istenen bir durumdur. İki istasyon arasındaki mesafe birkaç faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler arasında trenlerin hızı, duraklama gereksinimleri, hat tipi, coğrafi koşullar ve yolcu talepleri gibi etkenler bulunmaktadır. Ancak genel olarak, yüksek hızlı demiryolu hatlarında istasyonlar arası mesafe Shinkansen hatlarında ortalama olarak 35-40 kilometreye izin verilmektedir. Daha kısa mesafelerde ise trenlerin hızlanma ve yavaşlama süreleri nedeniyle maliyet ve zaman açısından verimli olmayabilir. Bununla birlikte, istasyonların yerleşim yerlerine, turistik bölgelere veya önemli noktalara olan erişimi de göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle, her demiryolu hattı için minimum mesafe gereksinimleri farklılık gösterebilir.

Çin'de alternatif olarak orta-düşük hızlı Maglev hatları kent içi ulaşımında tercih edilmektedir. Changsha Havalimanı Maglev hattı toplamda 18,5 kilometre ve 3 istasyondan oluşmaktadır. Bir diğer düşük-orta hızlı Maglev hattı Beijing S1 hattı 10,2 km ve 8 istasyondan oluşmaktadır. Shanghai Maglev hattı başlangıç ve son olmak üzere 2 istasyondan oluşmaktadır ve iki istasyon arası mesafe 30 km'dir. Bu örnekler göstermektedir ki Maglev hatları Yüksek Hızlı Demiryollarına kıyasla iki istasyon

arasında daha düşük mesafelere imkan sunmaktadır. Maglev sistemlerinin hızlı hızlanma ve yavaşlama yetenekleri göz önünde bulundurulduğunda orta-yüksek hızlara ulaşılabilmesi için istasyonlar arası mesafenin ortalama olarak 30-50 kilometre olabileceği tahmin edilmektedir.

Hyperloop sistemi için yapılan farklı fizibilite çalışmalarında kapsüllerin hızlanma, yavaşlama ivmeleri, yolcu binme ve inme süreleri, operasyonel verimlilik, düzenleyici gereksinimler, sistem kapasitesi ve hat uzunluğu gibi farklı etkenler dikkate alınmaktadır. Hyperloop'un 50 km'lik kısa mesafelerde önemli bir süre avantajı sağlamayacağı yapılan çalışmalarda öngörülmektedir. Yüksek verime ulaşmak için Hyperloop istasyonları arası mesafenin 50 km'den fazla olması gerektiği söylenebilir. Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev ulaşım sistemleri için iki istasyon arası mesafe yaklaşık 30 km'dir.

Çizelge 4.5'de genel performans ölçütlerinin değerlendirilmesi gösterilmektedir.

Çizelge 4.5 : Genel performans ölçütünün değerlendirilmesi.

Alternatifler	Hız (km/sa)	Sefer Aralığı (dk)	Kapasite (yolu/gün)	Hızlanma İvmesi (M/S ²)	Seyahat Süresi Açısından Puanlama*	Mevcut Sistemler İle Uyumluluk Açısından Puanlama*	Istasyonlar Arası Mesafe (Km)
Yüksek Hızlı Demiryolları	250	5	288000	0,6625	9	9	30
Maglev	300	15	55104	1,5	5	1	30
Hyperloop	1000	2	20160	1,2	1	1	50

* Bu alt ölçüt için kesin sayısal bir veri bulunmadığından AHP yönteminde kullanılan Saaty 1-9 karşılaştırma ölçeğine göre puan verilmiştir.

4.2.2 Geometrik standartlar

Geometrik standartlar ana ölçütü başlığı altında yatay kurp yarıçapı, düşey kurp yarıçapı, boyuna eğim, en kesit genişliği alt ölçütleri yer almaktadır. Hat geometrisi trenin davranışı, seyahat konforu vb. açısından önemli bir faktördür.

Kurp yarıçaplarının büyük olması konforu artırmaktadır. Kurpların ve hız profillerinin doğru tasarlanması yolculuk süresi, yolcu konforu ve sermaye maliyetlerine göre koridorların optimize edilmesini sağlamaktadır. Kurp yarıçapları proje standartlarına ve tasarım hızına uygun olarak belirlenmektedir. İncelenen üç ulaşım türü arasında Hyperloop ve Maglev teknolojisi, aynı hızda daha küçük kurp yarıçaplarıyla hareket imkânı tanımaktadır.

4.2.2.1 Yatay kurp yarıçapı

Yatay kurp yarıçapı alt ölçütü ile izin verilen en küçük yatay kurp yarıçapı esas alınmaktadır.

Yüksek Hızlı Demiryolu hatlarında ülkemizde çoğunlukla uygulanan değer 3200 metredir. Ancak günümüz koşullarında teknolojinin gelişmesiyle daha yüksek hızlara ulaşılmış ve yatay kurp yarıçapları 4000-5000 metreye kadar ulaşmıştır. Hyperloop Alpha raporunda maksimum Hyperloop çalışma hızında tüp yapısının yolcular için rahat olması için minimum yatay kurp yarıçapının 23,5 km olması gerektiği öngörülmektedir. Çalışmada Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11'den gerekli minimum yatay kurp yarıçapları sırasıyla Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop için 4000 m, 3580 m, 23500 m olarak kabul edilmektedir.

4.2.2.2 Düşey kurp yarıçapı

Düşey kurp yarıçapı alt ölçütü ile izin verilen en küçük düşey kurp yarıçapı esas alınmaktadır.

Düşey kurpların yarıçapları 5000 m'den az olamaz. Bu çalışmada Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13 esas alınarak gerekli minimum düşey kurp yarıçapları sırasıyla Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop için 15000 m, 26000 m, 100 000 m olarak belirlenmiştir.

4.2.2.3 Dever

Dever alt ölçütü yüksek hızlara ulaşılması için önemli olan alt ölçütlerinden biridir. Deverin artması hızın artmasını ve daha konforlu yolculuk imkanı sağlamaktadır. Bu çalışmada Bu çalışmada Konvansiyonel Yüksek Hızlı Demiryollarında izin verilen maksimum dever miktarı 180 mm olarak alınmıştır. Maglev ve Hyperloop ulaşım sistemleri için izin verilen maksimum dever değeri 12° yani yaklaşık 310 mm olarak alınmıştır.

4.2.2.4 Maksimum boyuna eğim

Maksimum boyuna eğim alt ölçütü güzergahın topoğrafik koşullarından ötürü ihtiyaç duyulan düşey-boyuna eğimleri kapsamaktadır. Büyük eğimlerde gereken ve tüketilen enerji miktarı artmaktadır. Artan eğimle birlikte özellikle YHT için frenlenme ve hızlanma mesafesi de artmaktadır. Yüksek hızlara ulaşabilmek için izin verilen maksimum boyuna eğim önemli bir ölçüttür.

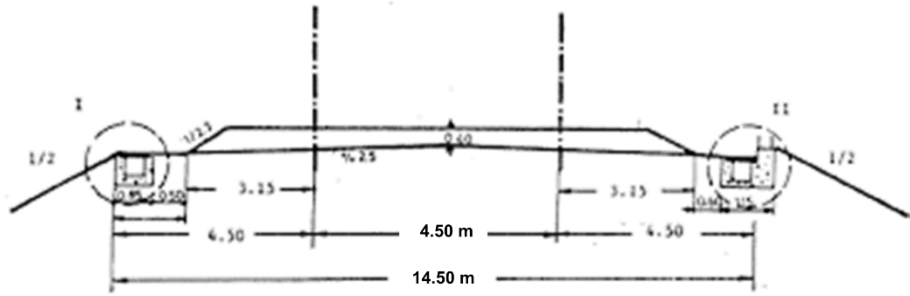
TSI'YA göre ana hatlar için tasarım aşamasında uygun koşullar sağlandığında izin verilen maksimum boyuna eğim %0,35'tir. Ancak 10 km ve üzeri mesafelerde eğim maksimum boyuna eğim %0,25 olmalıdır. Sürekli bir %0,35'lik eğimin uzunluğu 6 km'yi geçmemelidir. Bu değerler sadece yüksek hızda yolcu trafiğine izin verilen hatlar için geçerli olmakla birlikte genellikle %4'lük eğim kullanılmaktadır [32].

Maglev trenleri için ise maksimum boyuna eğim değeri %10 olarak kabul edilmektedir [22]. Hyperloop ulaşım sisteminin yükseltilmiş kolonlar üzerinde inşa edilmesi öngörülmektedir. Güzergah mümkün olan en az boyuna eğim ve maksimum viraj uzunluğu ile tasarlanmalıdır. Hyperloop sistemi için izin verilen maksimum boyuna eğim destek kolonlarının farklı boylarda üretilmesi ile azaltılabilmektedir. Hyperloop Alpha raporunda boyuna eğimin %6'dan fazla olması durumunda tünel kullanılması öngörülmektedir [15].

4.2.2.5 Enkesit genişliği

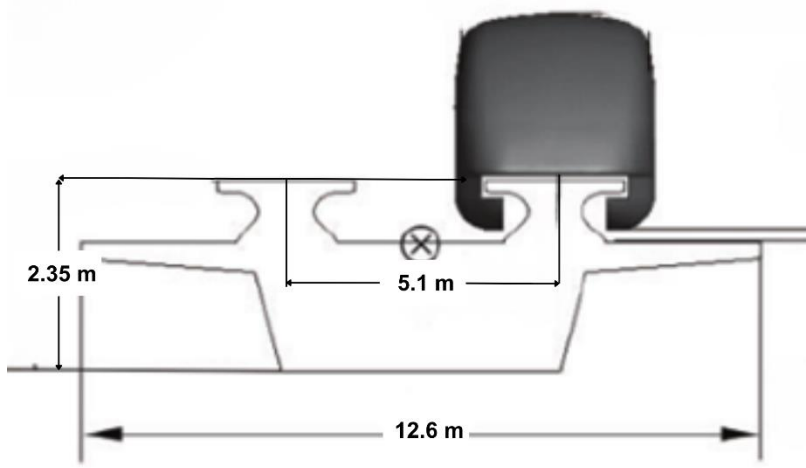
Enkesit genişliği alt ölçütü hattın inşa edildiği alana ve trenlerin güvenli geçişini sağlamak için gerekli olan mesafelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir

Yüksek hızlı demiryolları için enkesit genişliği 14,50 m'dir. Şekil 4.3'de Yüksek Hızlı Demiryollarının tipik enkesiti gösterilmektedir.



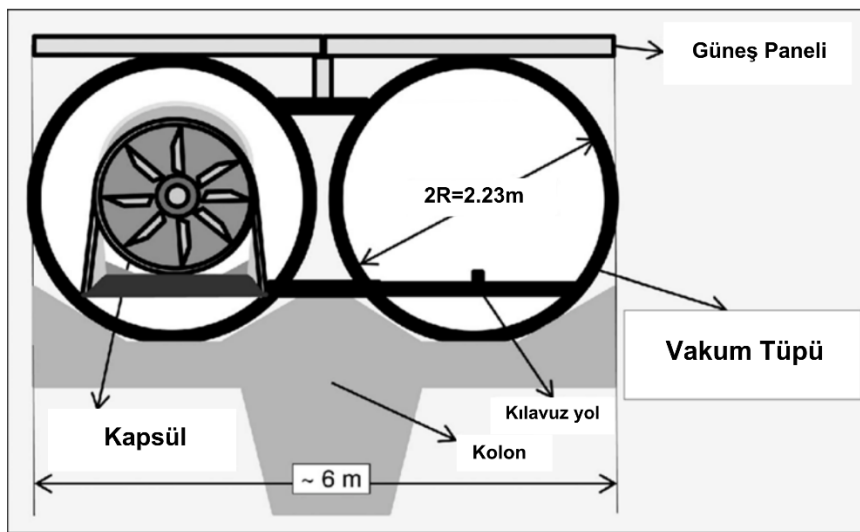
Şekil 4.3 : Yüksek Hızlı Demiryollarının tipik enkesiti.

Maglev hatlarında ise farklı tipte kılavuz yollar bulunmaktadır. Tipik Maglev enkesit genişliği 12,6 m ve hatlar arası açıklık 5.1 'dir. Şekil 4.4.'de bir Maglev hattının enkesiti gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Maglev hattının enkesiti.

Hyperloop Alpha raporunda sadece yolcu ve yolcu+araç taşımacılığı için iki ayrı tüp öngörülmektedir. Sadece yolcu taşımacılığı için tüpün enkesit alanı $3,91 \text{ m}^2$ ve tüpün iç çapı 2,23 m olacak ve tüpün duvar kalınlığı 20 ile 23 mm arasında olacaktır. Tüplerin üzerindeki yüzey, gerekli sistem enerjisini sağlamak için güneş panelleriyle kaplanacaktır. Bu, 563 km'den fazla tüp uzunluğu için 4,25 m genişliğinde olası bir alanı temsil etmektedir. Yolcu+ araç taşımacılığında ise tüpün enkesit alanı $8,55 \text{ m}^2$, tüpün iç çapı 3,30 m ve duvar kalınlığı 23 ile 25 mm arasındadır. Tüplerin üzerindeki yüzey, gerekli sistem enerjisini sağlamak için güneş panelleriyle kaplanacaktır. Bu, 563 km'den fazla tüp uzunluğu için 6,6 m genişliğinde olası bir alanı temsil etmektedir. Şekil 4.5'de Hyperloop yolcu hattının tahmini enkesiti gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Hyperloop yolcu kapsülünün tahmini enkesiti [15].

Aşağıda Çizelge 4.6’da geometrik standartlar ölçütlerinin değerlendirmesi gösterilmektedir.

Çizelge 4.6 : Geometrik standartlar ölçütünün değerlendirilmesi.

Alternatifler	Minimum Yatay Kurp Yarıçapı (m)	Minimum Düşey Kurp Yarıçapı (m)	Dever (mm)	Maksimum Boyuna Eğim	Enkesit Genişliği (m)
Yüksek Hızlı Demiryolları	4000	15000	180	%4	14,50
Maglev	3580	26000	310	%10	12,60
Hyperloop	23500	100000	310	%6	~6

4.2.3 Maliyet

Maliyet ana ölçütü herhangi bir ulaşım türünün seçilmesinde ve değerlendirilmesinde dikkate alınacak en önemli ölçütlerden biridir. İnşa maliyetleri, altyapı ve araçların işletme ve bakım maliyetleri alt ölçütleri bulunmaktadır.

4.2.3.1 İnşa maliyeti

İnşa maliyeti alt ölçütü ile kilometre başına düşen ortalama maliyet ele alınmaktadır. İnşa maliyeti, hattın ve istasyonların inşa maliyetleri, tren kontrol sistemi ve araçların satın alma maliyetlerini kapsamaktadır. Toplam inşa maliyeti, hatta kullanılan teknoloji, proje tasarım hızı, arazinin topoğrafyası, arazi satın alımı, hattın uzunluğu, ihtiyaç duyulan özel yapılar, yardımcı tesisleri gibi etkenlere göre değişmektedir.

Campos vd.’nin 45 konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları projesini incelediği çalışmada Avrupa genelinde yeni 1 km yeni yüksek hızlı demiryolu hattı inşa maliyeti 5-40 Milyon Dolar arasında değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada ortalama maliyet ise yaklaşık 17 Milyon Dolar olarak bulunmuştur.

2004 yılında işletmeye açılan Shanghai Maglev hattının kilometre başına maliyeti yaklaşık 53 Milyon Dolar iken, Japonya’da 2005 yılında işletmeye açılan Linimo Maglev hattı kilometre başına yaklaşık 105 Milyon Dolar’dır. 2017’de inşası tamamlanan Amerika’daki Baltimore hattı ise yaklaşık 185 Milyon Dolar’a mal olmuştur. Çizelge 3.15 incelendiğinde kilometre başına düşen Maglev inşa maliyetleri 53 ila 185 milyon Dolar arasında değiştiği görülmektedir. Buradan ortalama inşa maliyetinin yaklaşık 116 Milyon Dolar/km olarak kabul edilebilir.

Hyperloop Alpha raporunda belirtilen inşa maliyetleri, kılavuz hattın yapımı, istasyon yapım maliyetleri, kapsül üretimi dahil edilmektedir. Los Angeles- California hattı için sadece yolcu versiyonunda toplam 6 Milyar Dolar olan inşa maliyetinin kilometre başına düşen ortalama maliyeti 10,66 Milyon Dolar, yolcu+araç versiyonunda toplam 7,5 Milyar dolar olan inşa maliyetinin kilometre başına düşen maliyet 17,3 Milyon Dolar olarak öngörülmektedir. Bununla birlikte farklı firmalar tarafından yapılan fizibilite çalışmalarında kilometre başına düşen ortalama inşa maliyetlerinin 37-57 Milyon dolar arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Kilometre başına düşen ortalama inşa maliyeti Hyperloop için yaklaşık 50 Milyon Dolar olarak alınmıştır.

4.2.3.2 Altyapı bakım ve işletme maliyeti

Altyapı Bakım ve İşletme Maliyeti alt ölçütü ile kılavuz yolların, istasyonların, enerji temini, sinyalizasyon ve güvenlik sistemlerinin bakım maliyetlerini kapsamaktadır. Ayrıca günlük operasyonlar için tüketilen işgücü ve enerji maliyetlerini de içermektedir. Bu maliyetlerin bazıları sabittir ve teknik ve güvenlik standartlarına uygun olarak rutin olarak gerçekleştirilen operasyonlara bağlıdır.

Campos vd.'nin (2006; 2011) yaptığı çalışmada yüksek hızlı demiryolları için altyapı bakım ve işletme maliyetleri 2002 rakamlarıyla yıllık tek yönde kilometre başına 28000-33000 \$ arasında değişiklik göstermektedir. Çalışmada YHD'nin ortalama olarak altyapı bakım ve işletme maliyeti 30000\$/km olarak kabul edilmiştir [1].

Maglev hatları için kesin bir bilgi bulunmamakla birlikte yapılan çalışmalarda yıllık altyapı bakım ve işletme maliyetleri 172 000 \$/km olarak tahmin edilmektedir [33].

Hyperloop'un işletilen bir hattı bulunmamaktadır. Hyperloop TT tarafından yapılan Great Lake Fizibilite çalışmasında Hyperloop hattının kilometre başına yıllık işletme ve bakım maliyeti 2018 rakamlarıyla yaklaşık olarak 480000 \$ olarak tahmin edilmektedir. Bunun içinde hat altyapısı ve istasyonların bakım ve işletme maliyetleri, personel giderleri dahil edilmiştir [34].

4.2.3.3 Araç bakım ve işletme maliyeti

Araç Bakım ve İşletme Maliyeti alt ölçütü yıllık yolcu-km başına düşen araç bakım ve işletme maliyeti esas alınmaktadır.

Campos vd.'nin (2006; 2011) yaptığı çalışmada yüksek hızlı demiryolları için 2002 rakamlarıyla ortalama araç işletme ve bakım maliyeti 0,14 \$/yolcu-km belirtilmiştir [1].

Maglev sistemleri çok yüksek hızlarda neredeyse hiç bozulma olmadan çalışabilir ve bu nedenle düzenli yoğun bakım gerektiren ve artan hız ile katlanarak artan erozyona maruz kalan tekerlekli/raylı hızlı transit sistemlerine göre işletilmesi daha ekonomiktir. Maglev araçlarının için bu maliyet kesin olarak bilinmemekle birlikte ortalama olarak 0,019\$/yolcu-km olarak tahmin edilmektedir [35].

Hyperloop kapsüllerinin maliyetini kapsül başına 28 koltuk için, işletme döneminde ortalama 600 km/s'lik bir mesafede günde 15 saat çalışacak şekilde hesaplanmıştır. Buna göre aracın yıllık bakım maliyeti 0,0007 \$/yolcu-km ve işletme maliyeti 0,0010 \$/yolcu-km olmak üzere toplam araç bakım ve işletme maliyeti 0,0017 \$/yolcu-km'dir [34]. Çizelge 4.7 'de üç ulaşım sistemi için maliyet ölçütünün değerlendirilmesi gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 : Maliyet ölçütünün değerlendirilmesi.

Alternatifler	İnşa Maliyeti (milyon \$/km)	Altyapı Bakım ve İşletme Maliyeti (\$/km)	Araç Bakım ve İşletme Maliyeti (\$/yolcu-km)
Yüksek Hızlı Demiryolları	17	30000	0,14
Maglev	116	172000	0,019
Hyperloop	50	480000	0,017

4.2.4 Çevresel etkiler

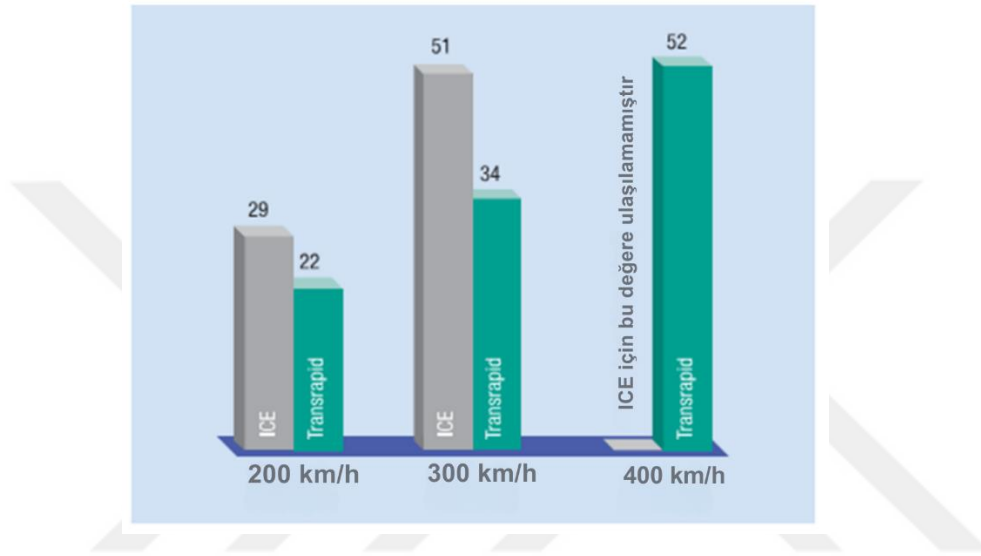
Çevresel etkiler ana ölçütü başlığı altında enerji tüketimi, CO2 emisyonları, gürültü, titreşim, elektriklenme şekli ve arazi kullanımı alt ölçütleri yer almaktadır.

4.2.4.1 Enerji tüketimi

Enerji tüketimi alt ölçütü ile bir aracın harcadığı enerji yolcu-km başına watt-saat (Wh/s-km) cinsinden ele alınmaktadır. Enerji tüketimi aracın hızına göre değişiklik göstermektedir.

Enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları, hat boyunca ara duraklar olmadan araçların işletilmesinden kaynaklanan değerleri kapsamaktadır. Enerji yüksek hızlı trenlerde

yuvarlanma ve aerodinamik direncin üstesinden gelmek ve eğimleri tırmanmak için tüketilirken, Maglev ve Hyperloop sistemlerinde araçları havaya kaldırmak için tüketilmektedir. Bununla birlikte araç içi ekipmana güç sağlamak için de tüketilmektedir. Hyperloop kapsülünde enerjinin bir kısmının yavaşlama aşamasında, tren durmadan önce rejeneratif frenleme yoluyla geri kazanılması öngörülmektedir. Aşağıda Şekil 4.6 'da Yüksek hızlı tren ve Maglev araçları için verilen ortalama enerji tüketimi değerleri esas alınmıştır.



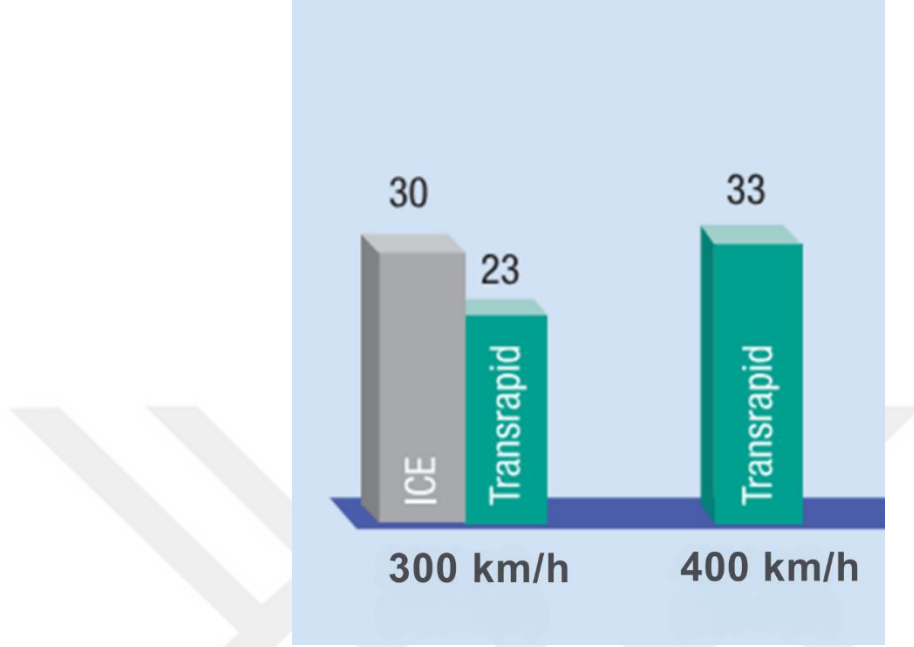
Şekil 4.6 : Yüksek hızlı tren ve Maglev aracının enerji tüketimi [36].

Hyperloop ulaşım sistemi içinse 2018 yılında M. Janic tarafından yapılan Enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarının tahmin edilmesi üzerine yapılan çalışmada bulunan değerler esas alınmıştır [37]. Buna göre bir hyperloop kapsülünün harcayacağı enerji 28,4 Wh/yolcu-km olarak tahmin edilmiştir. Bu tahmin yapılırken olumsuz hava koşulların ötürü hat boyunca yapılması planlanan güneş panellerinden değil ulusal elektrik sisteminden faydalanılacağı varsayımı göz önünde bulundurulmuştur.

4.2.4.2 CO₂ emisyonları

CO₂ emisyonları alt ölçütü ile araç tarafından yolcu-km başına tüketilen CO₂ emisyonları esas alınmaktadır. CO₂ emisyonu enerji tüketimine, enerjiyi üretmek için kullanılan yöntem ve hammaddelere ve enerjinin nasıl dağıtıldığına göre değişmektedir. Daha düşük enerji tüketimi daha düşük CO₂ emisyonu demektir. Şekil 4.7'de yüksek hızlı tren ve maglev araçları için CO₂ salımları verilmiştir. Hyperloop sisteminin tüm enerjisini üzerine kurulacak güneş panellerinden üreteceği

öngörülmektedir. Sadece operasyonlardan kaynaklanan emisyonlar dikkate alındığında Hyperloop'un diğer iki sisteme göre çok daha düşük, neredeyse sıfıra yakın CO₂ emisyonu üreteceği düşünülmektedir.



Şekil 4.7 : Yüksek hızlı tren ve Maglev aracının CO₂ emisyonları (gr/yolcu-km) [36].

Hyperloop için elimizde kesin bir veri bulunmadığından 1-9 karşılaştırma ölçeğine göre puan verilmiştir. Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop sırasıyla 7, 9, 1 şekilde puanlanmıştır.

4.2.4.3 Arazi kullanımı

Arazi kullanımı alt ölçütü ulaşım sisteminin türüne bağlıdır. Yüksek Hızlı Demiryollarında eşdüzey hatlar, hattın altında kalan arazi, yanında elektrikleme ve sinyalizasyon için gerekli ekipmanların bulunduğu arazi kullanılmaktadır. Maglev ve Hyperloop ise yükseltilmiş hatlardır. Yükseltilmiş hatlarda hattı destekleyen kolonların bulunduğu arazi kullanılmaktadır. Hattın altında kalan arazi ise başka amaçlar için kullanılmaya uygun görülmektedir. Ancak Hyperloop ulaşım sistemi için kolonlar arasında kalan alanın anlamlı şekilde kullanılıp kullanılmayacağı hakkında henüz kesinleşmiş bir bilgi bulunmamaktadır. Çizelge 3.17'den Yüksek Hızlı Demiryollarının ortalama arazi kullanımı düz bölgede 26,2 m²/m, dağlık bölgede 43,5 m²/m olarak, Maglev için ortalama arazi kullanımı düz bölgede 23,2 m²/m, dağlık

bölgede m²/m olarak alınmıştır. Hyperloop içi öngörülen arazi kullanımı Maglev ile benzer olduğunda Maglev değerleri hyperloop ulaşım sistemi için de kullanılmıştır.

4.2.4.4 Gürültü

Gürültü alt ölçütü ile her bir taşıtın yolculuk sırasında yaydığı gürültü miktarı ve çevreye olan etkisi değerlendirilmektedir. 200 km/saat'in altındaki hızlarda itme sisteminden ve tekerlek-ray etkileşiminden kaynaklı gürültü meydana gelmektedir. 250 km/saat'in üzerinde hızlarda ise aerodinamik gürültü ortaya çıkmaktadır. Çizelge 3.18 kullanılarak hızı 250 km/sa olan bir yüksek hızlı trenin 88 db (A), hızı 300 km/sa olan bir Maglev treninin ise 83 db (A) gürültü meydana getirdiği kabul edilmiştir. Hyperloop kapsülünün ise vakumlanmış bir tüpte hareket edeceği göz önünde bulundurularak hem kapsül içinde hem de dışarıda herhangi bir gürültü yaratmayacağı ön görülmektedir.

4.2.4.5 Elektriklenme şekli

Elektriklenme şekli alt ölçütü sera gazı emisyonlarını da etkileyen önemli bir faktördür. Bununla birlikte gittikçe artan enerji fiyatları işletme maliyetlerini de artırmaktadır. Üç hızlı ulaşım sisteminin de elektrik enerjisiyle çalıştığı bilinmektedir. Yüksek Hızlı Demiryolları ve Maglev trenleri genellikle ihtiyaç duyduğu kamusal elektrik kaynaklarını kullanmaktadır. Hyperloop'un ise hattın üzerine kurulacak güneş panelleri ile kendi elektriğini üreteceği öngörülmektedir. Olumsuz hava koşullarında ise bataryalara depolanan enerjinin kullanılması öngörülmektedir.

Bu veriler göz önünde bulundurulduğunda 1-9 karşılaştırma ölçeği kullanılarak Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop sistemlerine sırasıyla 7, 7, 9 puanları verilmiştir.

4.2.4.6 Titreşim

Titreşim alt ölçütü konforu etkileyen önemli bir faktördür. Bu alt ölçütten en çok etkilenen sistem yüksek hızlı demiryollarıdır. Diğer sistemlerde ray-tekerlek teması bulunmadığından daha düşük titreşim meydana gelmektedir. 1-9 karşılaştırma ölçeği kullanılarak Yüksek Hızlı Demiryolları, Maglev ve Hyperloop sistemlerine sırasıyla 9, 5, 1 puanları verilmiştir.

Çizelge 4.8’de üç ulaşım sistemi için çevresel etkiler ölçütünün değerlendirilmesi gösterilmektedir.

Çizelge 4.8 : Çevresel etkiler ölçütünün değerlendirilmesi.

Alternatifler	Enerji Tüketimi (wh/yolcu- km)	CO ₂ Emisyonları Açısından Puanlama*	Elektriklenme Şekli Açısından Puanlama*	Gürültü (dB(A))	Titreşim Açısından Puanlama*	Arazi Kullanımı (m ² /m)	
						Düz	Dağlık
Yüksek Hızlı Demiryolları	51	7	7	88	9	26	43
Maglev	52	9	7	83	5	23	24
Hyperloop	29	1	9	0	1	23	24

* Bu alt ölçüt için kesin sayısal bir veri bulunmadığından AHP yönteminde kullanılan Saaty 1-9 karşılaştırma ölçeğine göre puan verilmiştir.

4.3 Ağırlıkların Belirlenmesi

Ulaşım sistemlerinin değerlendirmesi yapılırken farklı seçenekler arasındaki önemli ölçütler dikkate alınarak karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Bu ölçütlerin bazıları nicel özelliklerken bazıları niteliksel özelliklerdir.

Çalışmada, ölçütlerin ve alt ölçütlerin önem derecelerinin belirlenmesinde araç olarak AHP yöntemi kullanılmaktadır. Yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin çok ölçütlü değerlendirilmesi için literatür derlenerek ulaşılan bilgiler ışığında genel performans özellikleri, geometrik standartlar, maliyet ve çevresel etkiler olmak üzere dört ana ölçüt belirlenmiştir.

Genel performans özellikleri, ulaşım sistemlerinin verimliliğini, güvenilirliğini ve kullanıcı memnuniyetini doğrudan etkileyen unsurlardır. Bu kriterler sistemin hız kapasitesi, seyahat süresi, hat kapasitesi, sefer aralığı, hızlanma ivmesi, mevcut ulaşım sistemleri ile uyumluluğunu, istasyonlar arası mesafe olmak üzere hem nicel hem de niteliksel ölçütleri içermektedir. Yüksek hızlı ulaşım sistemleri arasından bir seçim yaparken, hız, seyahat süreleri, mevcut sistemler ile uyumluluk, kapasite özellikleri en belirleyici özellikler olarak değerlendirilmektedir. Yüksek performanslı bir sistem, hızlı ve güvenli ulaşım imkanı sunarak hem yolcu hem de yük taşımacılığında rekabet avantajı sağlamaktadır. Dolayısıyla bu ana ölçüt sistemin başarılı bir şekilde işlemesi ve sürdürülebilirliği için en kritik unsurdur ve bu seçimde en önemli ana ölçüt olarak görülmektedir.

Bir diğerk önemli faktör olan ulaştırma yatırımlarının maliyetleri önemli ölçüde büyüktür. Maliyet ölçütü ulaşım sistemlerinin ekonomik sürdürülebilirliğı ve uygulanabilirliğı açısından büyük önem taşımaktadır. Projelerin toplam maliyetleri, ilk yatırım maliyetleri, işletme ve bakım giderlerinden oluşmaktadır. Maliyet analizi, ayrıca kamu ve özel sektör yatırımlarının çekilmesi açısından da kritik bir rol oynar. Yüksek maliyetler, projelerin hayata geçirilme sürecini zorlaştırabilirken, ekonomik açıdan optimize edilmiş maliyetler projelerin daha hızlı ve verimli bir şekilde tamamlanmasını sağlar. Ancak fizibilitesi doğru yapılmış bir yatırım uzun vadede ilk yatırım maliyetlerini karşılayabilir.

Geometrik standartlar, ulaşım sistemlerinin yeterliliğini ve güvenliğini sağlamak için belirlenen mühendislik kriterleridir. Bu standartlar, altyapının dayanıklılığını ve bakım ihtiyaçlarını da etkilerken yüksek hızlara güvenle ulaşmayı da sağlamaktadır. Geometrik standartlara uygunluk, hem yolcu güvenliğini hem de sistemin uzun ömürlülüğünü sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Son yıllarda ulaştırma sektörünün çevresel etkileriyle ilgili kaygılar gittikçe artmaktadır. Çevresel etkiler, yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin doğal çevre ve toplum üzerindeki etkilerini değerlendiren kriterlerdir. Bu kriterler, gürültü kirliliğı, hava kirliliğı, arazi kullanımı etkileri içerir. Sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirmek, çevresel etkilerin minimize edilmesini ve ekolojik dengeye zarar vermeyen projelerin hayata geçirilmesini gerektirir. Çevresel etkilerin dikkate alınması, toplumun kabulünü artırmakta ve projelerin çevre dostu ve sosyal olarak sorumlu bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, çevresel etkiler, projelerin sürdürülebilirliğı ve uzun vadeli başarısı için önemli bir kriterdir.

Bunlara bağılı olarak çalışmada öncelik sıralaması,

1. Genel performans özellikleri
2. Maliyet
3. Geometrik standart
4. Çevresel etkiler olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.9'da ana ölçütlerin ikili karşılaştırma matrisleri verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Ana ölçütlerin ikili karşılaştırma matrisi.

Ölçüt	Genel Performans Özellikleri	Geometrik Standartlar	Maliyet	Çevresel Etkiler
Genel Performans Özellikleri	1,00	1,80	1,29	2,25
Geometrik Standartlar	0,56	1,00	0,71	1,25
Maliyet	0,78	1,40	1,00	1,75
Çevresel Etkiler	0,44	0,80	0,57	1,00
TOPLAM	2,78	5,00	3,57	6,25

Karşılaştırma matrisi köşegen elemanı 1 olan matristir. Karşılaştırma matrisi yürütücü tarafından 1'den 9'a kadar değerler verilen bir önem derecesi ölçeği kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan ikili karşılaştırma matrisindeki her eleman kendi sütun toplamına bölünerek normalize edilmiştir. Çizelge 4.10'da normalize edilmiş karar matrisi verilmektedir.

Çizelge 4.10 : Normalize edilmiş karar matrisi.

Ölçüt	Genel Performans Özellikleri	Geometrik Standartlar	Maliyet	Çevresel Etkiler
Genel Performans Özellikleri	0,36	0,36	0,36	0,36
Geometrik Standartlar	0,20	0,20	0,20	0,20
Maliyet	0,28	0,28	0,28	0,28
Çevresel Etkiler	0,16	0,16	0,16	0,16
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	1,00

Normalize edilmiş bir matrisin her bir satırının toplamının matrisin boyutuna bölünmesiyle matrisin ortalaması bulunmaktadır. Her bir ölçüt için hesaplanan önem ağırlıkları bu değerler olarak belirlenmiştir. Sonraki adımda karşılaştırma matrislerinin tutarlılığı hesaplanmıştır. Çizelge 4.11.'de ölçütlerin önem ağırlıkları ve tutarlık hesabı verilmiştir.

Çizelge 4.11 : Ana ölçütlerin önem ağırlıkları ve tutarlılık hesabı.

Ölçüt	Öncelik matrisi	A* Öncelik matrisi	Eigen değeri	Λ_{maks}	CI	CR
Genel Performans Özellikleri	0,36	0,36	1			
Geometrik Standartlar	0,20	0,20	1	1	-1	-1,11111111
Maliyet	0,28	0,28	1			
Çevresel Etkiler	0,16	0,16	1			

Tutarlılık oranı 0.10'dan küçük olması karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğunu göstermektedir.

Daha sonra tüm alt ölçütler için ikili karşılaştırma matrisi yukarıda belirtilen şekilde oluşturulmuştur. Çizelge 4.12'de tüm alt ölçütlerin karşılaştırma matrisleri verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Alt ölçütlerin önem ağırlıkları ve tutarlılık hesabı.

Genel Performans Özellikleri	Hız	Sefer Aralığı	Kapasite	Hızlanma İvmesi	Seyahat Süresi	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	İstasyonlar Arası Mesafe
Hız	1,00	1,29	1,13	1,50	1,00	1,00	1,80
Sefer Aralığı	0,78	1,00	0,88	1,17	0,78	0,78	1,40
Kapasite	0,89	1,14	1,00	1,33	0,89	0,89	1,60
Hızlanma İvmesi	0,67	0,86	0,75	1,00	0,67	0,67	1,20
Seyahat Süresi	1,00	1,29	1,13	1,50	1,00	1,00	1,80
Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	1,00	1,29	1,13	1,50	1,00	1,00	1,80
İstasyonlar Arası Mesafe	0,56	0,71	0,63	0,83	0,56	0,56	1,00
TOPLAM	5,89	7,57	6,63	8,83	5,89	5,89	10,60

Geometrik Standartlar	Yatay Kurp Yarıçapı	Düşey Kurp Yarıçapı	Dever	Maksimum Boyuna Eğim	Enkesit Genişliği
Yatay Kurp Yarıçapı	1,00	1,40	1,17	0,78	1,75
Düşey Kurp Yarıçapı	0,71	1,00	0,83	0,56	1,25
Dever	0,86	1,20	1,00	0,67	1,50
Maksimum Boyuna Eğim	1,29	1,80	1,50	1,00	2,25
Enkesit Genişliği	0,57	0,80	0,67	0,44	1,00
TOPLAM	4,43	6,20	5,17	3,44	7,75

Maliyet	İnşa Maliyeti	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	Araç İşletme ve Bakım Maliyeti
İnşa Maliyeti	1,00	1,00	1,50
Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	1,00	1,00	1,50
Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	0,67	0,67	1,00
TOPLAM	2,67	2,67	4,00

Çevresel etkiler	Enerji Tüketimi	CO ₂ Emisyonları	Elektriklenme Şekli	Gürültü	Titreşim	Arazi Kullanımı
Enerji Tüketimi	1,00	1,00	1,13	1,29	1,80	1,50
CO ₂ Emisyonları	1,00	1,00	1,13	1,29	1,80	1,50
Elektriklenme Şekli	0,89	0,89	1,00	1,14	1,60	1,33
Gürültü	0,78	0,78	0,88	1,00	1,40	1,17
Titreşim	0,56	0,56	0,63	0,71	1,00	0,83
Arazi Kullanımı	0,67	0,67	0,75	0,86	1,20	1,00
TOPLAM	4,89	4,89	5,50	6,29	8,80	7,33

İşlem basamakları aynı şekilde yapılarak alt ölçütler için normalize karar matrisi oluşturulmuştur. Çizelge 4.13.'de alt ölçütler için oluşturulan normalize karar matrisleri verilmiştir.

Çizelge 4.13 : Alt ölçütlerin normalize karar matrisleri.

Genel Performans Özellikleri	Hız	Sefer Aralığı	Kapasite	Hızlanma İvmesi	Seyahat Süresi	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	İstasyonlar Arası Mesafe
Hız	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Sefer Aralığı	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Kapasite	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Hızlanma İvmesi	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Seyahat Süresi	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
İstasyonlar Arası Mesafe	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Geometrik Standartlar	Yatay Kurp Yarıçapı	Düşey Kurp Yarıçapı	Dever	Maksimum Boyuna Eğim	Enkesit Genişliği
Yatay Kurp Yarıçapı	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Düşey Kurp Yarıçapı	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Dever	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Maksimum Boyuna Eğim	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Enkesit Genişliği	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Maliyet	İnşa Maliyeti	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	Araç İşletme ve Bakım Maliyeti
İnşa Maliyeti	0,38	0,38	0,38
Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	0,38	0,38	0,38
Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	0,25	0,25	0,25
TOPLAM	1,00	1,00	1,00

Çevresel etkiler	Enerji Tüketimi	CO ₂ Emisyonları	Elektriklenme Şekli	Gürültü	Titreşim	Arazi Kullanımı
Enerji Tüketimi	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
CO ₂ Emisyonları	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Elektriklenme Şekli	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Gürültü	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Titreşim	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Arazi Kullanımı	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
TOPLAM	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Normalize edilmiş matrisler kullanılarak hesaplanan önem ağırlıkları ve tutarlılık hesabı Çizelge 4.14.'de verilmiştir.

Çizelge 4.14 : Alt ölçütlerin önem ağırlıkları ve tutarlılık hesabı.

Genel Performans Özellikleri	Öncelik matrisi	A* Öncelik Matrisi	Eigen Değeri	Amaks	CI	CR
Hız	0,17	0,169811321	1			
Sefer Aralığı	0,13	0,132075472	1			
Kapasite	0,15	0,150943396	1			
Hızlanma İvmesi	0,11	0,113207547	1			
Seyahat Süresi	0,17	0,169811321	1	1	-1	-0,142857143
Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	0,17	0,169811321	1			
İstasyonlar Arası Mesafe	0,09	0,094339623	1			
Geometrik Standartlar	Öncelik matrisi	A* Öncelik Matrisi	Eigen Değeri	Amaks	CI	CR
Yatay Kurp Yarıçapı	0,23	0,551508845	2,442396313			
Düşey Kurp Yarıçapı	0,16	0,430801249	2,670967742			
Dever	0,19	0,491155047	2,537634409	2,567	-0,6	-0,542974179
Maksimum Boyuna Eğim	0,29	0,672216441	2,315412186			
Enkesit Genişliği	0,13	0,370447451	2,870967742			
Maliyet	Öncelik matrisi	A* Öncelik Matrisi	Eigen Değeri	Amaks	CI	CR
İnşa Maliyeti	0,38	0,375	1			
Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	0,38	0,375	1	1	-1	-
Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	0,25	0,25	1			1,724137931
Çevresel Etkiler	Öncelik matrisi	A* Öncelik Matrisi	Eigen Değeri	Amaks	CI	CR
Enerji Tüketimi	0,20	0,204545455	1			
CO2 Emisyonları	0,20	0,204545455	1			
Elektriklenme Şekli	0,18	0,181818182	1	1	-1	-0,806451613
Gürültü	0,16	0,159090909	1			
Titreşim	0,11	0,113636364	1			
Arazi Kullanımı	0,14	0,136363636	1			

Hesaplanan alt ölçüt ağırlıkları ana ölçüt ağırlığı ile çarpılarak sonra ağırlıklar hesaplanmıştır. Çizelge 4.15’de ölçütlerin son ağırlıkları verilmiştir.

Çizelge 4.15 : Ölçütlerin son ağırlıkları.

Ana Ölçüt	Ana Ölçüt Ağırlığı	Alt Ölçüt	Alt Ölçüt Ağırlığı	Son Ağırlık	Sıralama
Genel Performans Özellikleri	0,36	Hız	0,17	0,0611	4
		Sefer aralığı	0,13	0,0475	9
		Kapasite	0,15	0,0543	8
		Hızlanma İvmesi	0,11	0,0408	11
		Seyahat Süresi	0,17	0,0611	4
	0,20	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	0,17	0,0611	4
		İstasyonlar Arası Mesafe	0,09	0,0340	13
		Yatay Kurp Yarıçapı	0,23	0,0452	10
		Düşey Kurp Yarıçapı	0,16	0,0323	16
		Dever	0,19	0,0387	12
Geometrik Standartlar		Maksimum Boyuna Eğim	0,29	0,0581	7
		Enkesit Genişliği	0,13	0,0258	18
		İnşa Maliyeti	0,38	0,1050	1
Maliyet	0,28	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	0,38	0,1050	1
		Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	0,25	0,0700	3
		Enerji Tüketimi	0,20	0,0327	14
		CO ₂ Emisyonları	0,20	0,0327	14
Çevresel Etkiler	0,16	Elektriklenme Şekli	0,18	0,0291	17
		Gürültü	0,16	0,0255	19
		Titreşim	0,11	0,0182	21
		Arazi Kullanımı	0,14	0,0218	20

Çizelge 4.15 incelendiğinde en önemli ana kriterin genel performans özellikleri olduğu görülmektedir. Genel performans özelliklerinin en yüksek ağırlığa sahip olmasının nedeni, bu ölçütün sistemin hız, kapasite ve güvenilirlik gibi temel performans göstergelerini içererek, yolcuların deneyimini ve taşımacılığın etkinliğini belirlemesidir. Bununla birlikte diğer ana ölçütler arasında çok büyük farklar bulunmamaktadır. Bu durum sistemlerin değerlendirilmesinde dengeli bir yaklaşımın benimsendiğini göstermektedir. Diğer ana ölçütler de önemli ağırlıklara sahiptir.

Her ne kadar en önemli kriter genel performans özellikleri olsa da, son ağırlıklara bakıldığında maliyet faktörünün alt ölçütlerinin en yüksek ağırlıklara sahip olduğu görülmektedir. Üç ulaşım sisteminin değerlendirilmesi yapılırken inşa maliyeti ve işletme, bakım maliyetleri en önemli ölçütlerdir. Yüksek hızlı izli ulaşım sistemleri büyük yatırımlar gerektirdiği için, maliyetlerin dikkatli bir şekilde yönetilmesi,

projelerin finansal fizibilitesini ve uzun vadeli başarısını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Maliyet alt ölçütlerinin ardından, hız, seyahat süresi ve mevcut sistemler ile uyumluluk alt ölçütleri gelmektedir. Bu alt ölçütler sistemin hız kapasitesini, yolcu konforunu ve operasyonel verimliliği doğrudan etkilediği için önemlidir. Yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin rekabet edebilirliği ve tercih edilme oranı, büyük ölçüde bu performans ölçütlerine bağlıdır. Öte yandan, arazi kullanımı, titreşim ve enkesit genişliği gibi alt ölçütler, son ağırlıklarda en az öneme sahip ölçütler olarak belirlenmiştir. Bu kriterlerin daha düşük ağırlığa sahip olması, projelerin öncelikli olarak teknik performans, maliyet ve çevresel sürdürülebilirlik gibi daha büyük etki yaratan faktörlere odaklandığını göstermektedir. Arazi kullanımı ve titreşim gibi çevresel etkiler, projelerin ekolojik dengeyi koruma ve sosyal kabulü sağlama açısından önemli olmakla birlikte, ekonomik ve performans kriterleri kadar öncelikli değildir.

Yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin değerlendirilmesinde genel performans özelliklerinin en yüksek öneme sahip olması, sistemin kullanıcı odaklı ve verimli olmasını sağlarken, maliyet kriterlerinin yüksek ağırlıkları, projelerin ekonomik sürdürülebilirliğini ve finansal başarısını garanti altına almayı amaçlamaktadır. Bu dengeli yaklaşım, projelerin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan optimize edilmesine olanak tanır.

4.4 Karar Matrisinin Oluşturulması

Yüksek hızlı izli ulaşım sistemlerinin değerlendirilmesi için çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden biri olan MOORA yönteminin işlem basamakları kullanılacaktır. MOORA yöntemi farklı alternatiflerin çeşitli ölçütlere göre performansını gösteren bir karar matrisi ile başlamaktadır. Çizelge 4.16'da verilen karar matrisi bölüm 4.2. Ölçütlerin Belirlenmesi başlığı altında belirlenen ölçüt değerlerinden oluşturulmuştur.

Çizelge 4.16 : Karar matrisi.

Genel Performans Özellikleri								Geometrik Standartlar				
Ağırlıklar	Max 0,0611	Min 0,0475	Max 0,0543	Max 0,0408	Min 0,0611	Max 0,0340	Min 0,0452	Max 0,0323	Max 0,0387	Max 0,0581	Max 0,0258	Min 0,1050
Alternatifler	Hız (km/sa)	Sefer Aralığı (dk)	Kapasite (yolcu/gün)	Hızlanma İvmesi (m/s ²)	Seyahat Süresi Açısından Puanlama	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk Açısından Puanlama	İstasyonlar Arası Mesafe (km)	Yatay Kurp Yarıçapı (m)	Düşey Kurp Yarıçapı (m)	Dever (mm)	Maksimum Boyuna Eğim (%)	Enkesit Genişliği (m)
Yüksek Hızlı Demiryolları	250	5	288000	0,66	9	9	30	4000	15000	180	4	14,4
Maglev	300	15	55104	1,5	5	1	30	3580	26000	310	10	12,6
Hyperloop	1000	2	20160	1,2	1	1	50	23500	100000	310	6	6
Kareler Top. Karekökü	1073,5455	15,9374	293916,4446	2,0312	10,3441	9,1104	65,5744	24105,3189	104407,8541	473,9198	12,3288	20,0529

Maliyet					Çevresel Etkiler					
Ağırlıklar	Min 0,1050	Min 0,1050	Min 0,0700	Min 0,0327	Min 0,0327	Max 0,0291	Min 0,0255	Min 0,0182	Min 0,0109	Min 0,0109
Alternatifler	İnşa Maliyeti (Milyon \$/km-yıl)	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/km-yıl)	Araç İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yolcu- km-yıl)	Enerji Tüketimi (Wh/ yolcu-km)	CO ₂ Emisyonu Açısından Puanlama	Elektriklenme Şekli Açısından Puanlama	Gürültü (db(A))	Titreşim Açısından Puanlama	Arazi Kullanımı (m ² /m)	
Yüksek Hızlı Demiryolları	17	30000	0,12	51	7	7	88	9	26,2	43,5
Maglev	116	172000	0,019	52	9	7	83	5	23,2	24,4
Hyperloop	50	480000	0,0017	29	1	9	0	1	23,2	24,4
Kareler Top. Karekökü	127,4559	510768,0491	0,1215	78,3964	11,4455	13,3791	120,9669	10,3441	41,9871	55,5245

Karar matrisinin boyutsuz hale getirilerek tüm elemanların karşılaştırılabilir olması amacıyla matris normalize edilmiştir. Her bir alternatifin değeri, her sütundaki değerlerin kareleri toplamının kareköküne bölünerek normalize karar matrisi elde edilmiştir. Oluşturulan normalize karar matrisi Çizelge 4.17.'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.17 : Normalize karar matrisi.

Genel Performans Özellikleri						Geometrik Standartlar						
Ağırlıklar	Max 0,0611	Min 0,0475	Max 0,0543	Max 0,0408	Min 0,0611	Max 0,0340	Min 0,0452	Max 0,0323	Max 0,0387	Max 0,0581	Max 0,0258	Min 0,1050
Alternatifler	Hız	Sefer Aralığı	Kapasite	Hızlanma İvmesi	Seyahat Süresi	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	İstasyonlar Arası Mesafe	Yatay Kurp Yarıçapı	Düşey Kurp Yarıçapı	Dever	Maksimum Boyuna Eğim	Enkesit Genişliği
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,2329	0,3137	0,9799	0,3249	0,8701	0,9879	0,4575	0,1659	0,1437	0,3798	0,3244	0,7181
Maglev	0,2794	0,9412	0,1875	0,7385	0,4834	0,1098	0,4575	0,1485	0,2490	0,6541	0,8111	0,6283
Hyperloop	0,9315	0,1255	0,0686	0,5908	0,0967	0,1098	0,7625	0,9749	0,9578	0,6541	0,4867	0,2992

Maliyet				Çevresel Etkiler						
Ağırlıklar	Min 0,1050	Min 0,1050	Min 0,0700	Min 0,0327	Min 0,0327	Max 0,0291	Min 0,0255	Min 0,0182	Min 0,0109	Min 0,0109
Alternatifler	İnşa Maliyeti	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	Enerji Tüketimi	CO2 Emisyonu	Elektriklenme Şekli	Gürültü	Titreşim	Düz Bölge	Dağlık Bölge
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,1334	0,0587	0,9876	0,6505	0,6116	0,5232	0,7275	0,8701	0,6240	0,7834
Maglev	0,9101	0,3367	0,1564	0,6633	0,7863	0,5232	0,6861	0,4834	0,5526	0,4394
Hyperloop	0,3923	0,9398	0,0140	0,3699	0,0874	0,6727	0,0000	0,0967	0,5526	0,4394

Karar matrisinin elemanlarının ölçütlerin fayda veya faydasız ölçütleri olması dikkate alınmaksızın normalize edilmektedir. Normalize edilen matriste her değer, AHP yöntemi ile hesaplanan ölçüt ağırlığı ile çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilmiştir.

Çizelge 4.18.'de ağırlıklı normalize karar matrisi verilmektedir.

Çizelge 4.18 : Ağırlıklı normalize karar matrisi.

Genel Performans Özellikleri						Geometrik Standartlar						
Ağırlıklar	Max 0,0611	Min 0,0475	Max 0,0543	Max 0,0408	Min 0,0611	Max 0,0340	Min 0,0452	Max 0,0323	Max 0,0387	Max 0,0581	Max 0,0258	Min 0,1050
Alternatifler	Hız	Sefer Aralığı	Kapasite	Hızlanma İvmesi	Seyahat Süresi	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	İstasyonlar Arası Mesafe	Yatay Kurp Yarıçapı	Düşey Kurp Yarıçapı	Değer	Maksimum Boyuna Eğim	Enkesit Genişliği
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,0142	0,0149	0,0532	0,0132	0,0532	0,0336	0,0207	0,0054	0,0056	0,0221	0,0084	0,0754
Maglev	0,0171	0,0448	0,0102	0,0301	0,0295	0,0037	0,0207	0,0048	0,0096	0,0380	0,0209	0,0660
Hyperloop	0,0569	0,0060	0,0037	0,0241	0,0059	0,0037	0,0344	0,0314	0,0371	0,0380	0,0126	0,0314

Maliyet					Çevresel Etkiler					
Ağırlıklar	Min 0,1050	Min 0,1050	Min 0,0700	Min 0,0327	Min 0,0327	Max 0,0291	Min 0,0255	Min 0,0182	Min 0,0109	Min 0,0109
Alternatifler	İnşa Maliyeti	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	Enerji Tüketimi	CO ₂ Emisyonu	Elektriklenme Şekli	Gürültü	Titreşim	Düz Bölge	Dağlık Bölge
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,0140	0,0062	0,0691	0,0213	0,0200	0,0152	0,0185	0,0158	0,0068	0,0085
Maglev	0,0956	0,0354	0,0109	0,0217	0,0257	0,0152	0,0175	0,0088	0,0060	0,0048
Hyperloop	0,0412	0,0987	0,0010	0,0121	0,0029	0,0196	0,0000	0,0018	0,0060	0,0048

4.5 MOORA-Oran Yöntemi

Elde edilen ağırlıklı normalize karar matrisinde fayda ölçütleri max ve faydalı olmayan ölçütleri min olarak belirtilmiştir. Faydalı ölçüt değerleri ve faydalı olmayan ölçüt değerleri kendi içinde toplanarak faydalı olmayan ölçüt değerleri faydalı ölçüt değerlerinden çıkarılmıştır. Elde edilen değerler de azalan sırada sıralandığında, en yüksek değerlendirme değerine sahip olan alternatif MOORA-Oran yöntemine göre en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.19’da MOORA-Oran yöntemine göre alternatiflerin sıralaması gösterilmektedir.

Çizelge 4.19 : MOORA-oran yöntemine göre alternatiflerin sıralaması.

Alternatifler	y_i^*	Sıralama
Yüksek Hızlı Demiryolları	-0,1736	2
Maglev	-0,2377	3
Hyperloop	-0,0190	1

Elde edilen sonuçlara göre Hyperloop diğer iki alternatife göre en uygun olarak seçilmiştir. Hyperloop yüksek altyapı maliyetlerine, mevcut sistemler ile uyumlu olmamasına rağmen yapılan değerlendirmede özellikle hız, seyahat süresi, araç işletme ve bakım maliyetleri ve minimum çevresel etkileri açısından üstün performans gösterdiği için ilk sırada yer aldığı söylenebilir. Yüksek Hızlı Demiryolları, kapasite ve mevcut sistemlerle uyumluluk gibi önemli kriterlerde yüksek puan aldığı için ikinci sırada yer almıştır. Maglev ise yüksek maliyetler ve mevcut sistemlerle düşük uyumluluk nedeniyle son sırada kalmıştır.

4.6 MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı

MOORA referans noktası yaklaşımında MOORA-Oran yöntemine ek olarak her amaç için ayrı ‘maksimal amaç referans noktaları’ belirlenir. Ağırlıklı normalize karar matrisinde bir referans noktası (r_i) belirlenmiştir. Referans noktası, minimizasyon için min, maksimizasyon için max noktaları olarak belirlenmektedir. Her bir alternatifin o ölçütteki değeri belirlenen referans noktasından çıkarılarak mutlak değeri alınmıştır. Çizelge 4.20.’de ağırlıklı normalize karar matrisinde belirlenen referans noktaları ve referans noktasına uzaklıklar gösterilmiştir.

Çizelge 4.20 : Ağırlıklı normalize karar matrisi ve referans noktalarına uzaklık.

Genel Performans Özellikleri							Geometrik Standartlar					
Ağırlıklar	Max 0,0611	Min 0,0475	Max 0,0543	Max 0,0408	Min 0,0611	Max 0,0340	Min 0,0452	Max 0,0323	Max 0,0387	Max 0,0581	Max 0,0258	Min 0,1050
Alternatifler	Hız	Sefer Aralığı	Kapasite	Hızlanma İvmesi	Seyahat Süresi	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	İstasyonlar Arası Mesafe	Yatay Kurp Yarıçapı	Düşey Kurp Yarıçapı	Dever	Maksimum Boyuna Eğim	Enkesit Genişliği
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,0142	0,0149	0,0532	0,0132	0,0532	0,0336	0,0207	0,0054	0,0056	0,0221	0,0084	0,0754
Maglev	0,0171	0,0448	0,0102	0,0301	0,0295	0,0037	0,0207	0,0048	0,0096	0,0380	0,0209	0,0660
Hyperloop	0,0569	0,0060	0,0037	0,0241	0,0059	0,0037	0,0344	0,0314	0,0371	0,0380	0,0126	0,0314
ri	0,0569	0,0060	0,0532	0,0301	0,0059	0,0336	0,0207	0,0314	0,0371	0,0380	0,0209	0,0314

Maliyet					Çevresel Etkiler					
Ağırlıklar	Min 0,1050	Min 0,1050	Min 0,0700	Min 0,0327	Min 0,0327	Max 0,0291	Min 0,0255	Min 0,0182	Min 0,0109	Min 0,0109
Alternatifler	İnşa Maliyeti	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	Enerji Tüketimi	CO ₂ Emisyonu	Elektriklenme Şekli	Gürültü	Titreşim	Düz Bölge	Dağlık Bölge
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,0140	0,0062	0,0691	0,0213	0,0200	0,0152	0,0185	0,0158	0,0068	0,0085
Maglev	0,0956	0,0354	0,0109	0,0217	0,0257	0,0152	0,0175	0,0088	0,0060	0,0048
Hyperloop	0,0412	0,0987	0,0010	0,0121	0,0029	0,0196	0,0000	0,0018	0,0060	0,0048
ri	0,0140	0,0062	0,0010	0,0121	0,0029	0,0196	0,0000	0,0018	0,0060	0,0048

Çizelge 4.20 (devam) : Ağırlıklı normalize karar matrisi ve referans noktalarına uzaklık.

Genel Performans Özellikleri						Geometrik Standartlar						
Ağırlıklar	Max 0,0611	Min 0,0475	Max 0,0543	Max 0,0408	Min 0,0611	Max 0,0340	Min 0,0452	Max 0,0323	Max 0,0387	Max 0,0581	Max 0,0258	Min 0,1050
Alternatifler	Hız	Sefer Aralığı	Kapasite	Hızlanma İvmesi	Seyahat Süresi	Mevcut Sistemlerle Uyumluluk	İstasyonlar Arası Mesafe	Yatay Kurp Yarıçapı	Düşey Kurp Yarıçapı	Dever	Maksimum Boyuna Eğim	Enkesit Genişliği
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,0427	0,0090	0,0000	0,0169	0,0473	0,0000	0,0000	0,0261	0,0315	0,0159	0,0126	0,0440
Maglev	0,0399	0,0388	0,0431	0,0000	0,0236	0,0298	0,0000	0,0267	0,0274	0,0022	0,0000	0,0346
Hyperloop	0,0000	0,0000	0,0495	0,0060	0,0000	0,0011	0,0138	0,0000	0,0000	0,0022	0,0084	0,0000

Maliyet					Çevresel Etkiler					
Ağırlıklar	Min 0,1050	Min 0,1050	Min 0,0700	Min 0,0327	Min 0,0327	Max 0,0291	Min 0,0255	Min 0,0182	Min 0,0109	Min 0,0109
Alternatifler	İnşa Maliyeti	Altyapı İşletme ve Bakım Maliyeti	Araç İşletme ve Bakım Maliyeti	Enerji Tüketimi	CO ₂ Emisyonu	Elektriklenme Şekli	Gürültü	Titreşim	Arazi Kullanımı Düz Bölge	Dağlık Bölge
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,0000	0,0000	0,0682	0,0092	0,0172	0,0043	0,0185	0,0141	0,0008	0,0038
Maglev	0,0816	0,0292	0,0100	0,0096	0,0229	0,0043	0,0175	0,0070	0,0000	0,0000
Hyperloop	0,0272	0,0925	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Oluşturulan yeni matriste Tchebycheff min-max metrik işlemi uygulanmıştır. Her bir alternatifteki en yüksek değerler seçilmiştir. Tüm faydalı ve faydalı olmayan ölçütler göz önünde bulundurulduğunda en düşük toplam sapmaya sahip olan alternatif en iyi seçenek olarak seçilmiştir. Çizelge 4.21.'de alternatiflerin MOORA-referans noktası yaklaşımına göre yapılan sıralaması gösterilmektedir.

Çizelge 4.21 : MOORA-referans noktası yaklaşımına göre alternatiflerin sıralaması.

Alternatifler	Maksimum	Sıralama
Yüksek Hızlı Demiryolları	0,0682	1
Maglev	0,0816	2
Hyperloop	0,0925	3

MOORA-referans noktası yaklaşımına göre yapılan sıralama, alternatiflerin her bir kriter açısından ne kadar optimal olduğunu göstermektedir. Yüksek hızlı demiryollarının ilk sırada yer alması yolcu kapasitesi, mevcut sistemler ile uyumluluğu ve özellikle inşa maliyeti açısından sağladığı avantaj bu sonucu desteklemektedir. İkinci sırada yer alan Maglev, Yüksek Hızlı Demiryolları'na göre biraz daha düşük performans göstermektedir. Maglev teknolojisi, yüksek hız ve gelişmiş performans özellikleri sunmasına rağmen, inşa ve işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle bu sıralamada ikinci sırada yer almıştır. Yüksek yatırım maliyetleri ve bakım gereksinimleri, Maglev'in referans noktası yaklaşımına göre optimal çözüme biraz daha uzak kalmasına neden olmuştur. Son sırada yer alan Hyperloop, yenilikçi ve yüksek hızda seyahat imkanı sunan bir sistem olmasına rağmen, henüz gelişim aşamasında olması ve yüksek maliyetleri nedeniyle bu sıralamada en alt sırada yer almıştır. Ayrıca, çevresel etkiler ve teknik standartlar açısından belirsizlikler içermesi, bu alternatifin daha düşük puanlar almasına yol açmıştır.

4.7 MOORA-Tam Çarpım Formu

MOORA- Tam çarpım formunda karar matrisinde fayda ölçütleri ve fayda olmayan ölçütler kendi içlerinde çarpılır. Fayda ölçütleri çarpımı faydalı olmayan ölçütler çarpımına bölünür. Buradan elde edilen sonuçlar en yüksek değerden en düşük değere doğru sıralanmıştır. Çizelge 4.22.'de alternatiflerin MOORA-tam çarpım formu yaklaşımına göre sıralaması verilmiştir.

Çizelge 4.22 : MOORA-referans noktası yaklaşımına göre alternatiflerin sıralaması.

Alternatifler	Maksimum	Minimum	Max/Min	Sıralama
Yüksek Hızlı Demiryolları	1293304320000000000000	383381920604390000	337,3409779	2
Maglev	50085469324800000000	1181584706926740000	42,38838657	3
Hyperloop	9516890880000000000000	401872	2,36814E+15	1

MOORA-Tam çarpım formuna göre yapılan sıralamada Hyperloop birinci sırada yer almaktadır. Hyperloop'un özellikle hız, kurp yarıçapları gibi ölçütlerinde diğer alternatiflere göre çok daha yüksek performans gösterdiğini, aynı zamanda seyahat süresi, çevresel etkiler gibi ölçütlerde düşük minimum değerlere sahiptir. Bu durum, Hyperloop'un en iyi alternatif olarak değerlendirilmesini sağlamıştır. Yüksek Hızlı Demiryolları, ikinci sırada yer almaktadır. Max/Min oranı, Hyperloop'a kıyasla çok daha düşüktür, ancak Maglev'e göre daha yüksektir. Bu, Yüksek Hızlı Demiryolları'nın genel performans özellikleri ve maliyet etkinliği açısından dengeli bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Ancak, bakım ve işletme maliyetlerindeki yüksek minimum değerler nedeniyle Hyperloop'un gerisinde kalmıştır. Maglev ise yüksek yatırım maliyetleri ve işletme maliyetleri sebebiyle son sırada yer almaktadır.

4.8 MULTIMOORA

MULTIMOORA yöntemi ile MOORA yönteminin farklı yaklaşımlarını bir araya getirerek nihai bir sıralama yapılmıştır. Bu yöntem, alternatiflerin değerlendirilmesinde daha kapsamlı ve dengeli bir bakış açısı sunmaktadır. Her bir yöntemin sonuçlarına baktığımızda, farklı sıralamaların ortaya çıktığı görülmektedir. Çizelge 4.23.'de MULTIMOORA sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.23 : MULTIMOORA sonuçları.

Alternatifler	Oran Yöntemi	Referans Noktası Yaklaşımı	Tam Çarpım Formu	MULTIMOORA
Yüksek Hızlı Demiryolları	2	1	2	2
Maglev	3	2	3	3
Hyperloop	1	3	1	1

MULTIMOORA yöntemi, alternatiflerin değerlendirilmesinde daha kapsamlı ve dengeli bir bakış açısı sunmaktadır. Bu kapsamlı değerlendirme sonucunda Hyperloop, genel performans ve ölçüt değerlendirmelerinde en yüksek puanı alarak birinci sırada yer almıştır. Bu, Hyperloop'un yenilikçi teknolojisi, yüksek performans potansiyeli ve

genel avantajları sayesinde diğ er alternatiflere göre daha üstün bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Hyperloop, genel performansı, geometrik standartlar ve çevresel etkileri açısından  ne çıktığı için MULTIMOORA yönteminde birinci sırada yer almıştır. Yüksek Hızlı Demiryolları, dengeli performansı ve maliyet etkinliği nedeniyle ikinci sırada yer alırken, Maglev yüksek maliyetler ve bazı ölçütlerdeki düşük performansı nedeniyle üçüncü sırada yer almıştır. MOORA yöntemlerinin her biri farklı ölçüt ve hesaplama yöntemlerine odaklandığından, her yöntemde farklı sonuçlar ortaya çıkmış, ancak MULTIMOORA yöntemi bu farklılıkları birleştirerek nihai sıralamayı oluşturmuştur.





5. SONUÇ

Dünya çapında artan hızlı kentleşme süreci ile ulaşım modlarına olan talep artmıştır. Bu artış ulaştırma sektöründe, karayolu ve havayolu ulaşım modlarında trafik sıkışıklığının oluşmasına ve mevcut hatların bu trafik sıkışıklığını kaldıramaz duruma getirmiştir. Bunun yanı sıra gelişen kentlerde yaşayanların daha ekonomik, hızlı, konforlu ve güvenli şekilde ulaşım ihtiyacı da yüksek hızlı ulaşım sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Daha yüksek hızlara ulaşmak için yapılan bilimsel araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmalar, önce yüksek yolcu kapasitesi, hızlı ve konforlu yolculuk imkanıyla dünya çapında işletilen konvansiyonel yüksek hızlı demiryolları, sonra Japonya ve Almanya'nın Maglev trenlerini ve son olarak da 2013 yılında Elon Musk tarafından beşinci ulaşım modu olarak tanıtılan Hyperloop teknolojisini ortaya çıkarmıştır. Üç ulaşım sisteminin birbirinden farklı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Üç alternatifin birbirinden farklı özelliklerini değerlendirip hangi sistemin daha avantajlı olduğuna karar verebilmek için çok ölçütlü bir değerlendirme yapılması gerekmektedir.

Çalışmada genel performans özellikleri, geometrik standartlar, maliyet ve çevresel etkiler olmak üzere dört ana ölçüt ve hız, sefer aralığı, kapasite, hızlanma ivmesi, seyahat süresi, mevcut sistemler ile uyumluluk, istasyonlar arası mesafe, minimum yatay kurp yarıçapı, minimum düşey kurp yarıçapı, deyer, maksimum boyuna eğim, enkesit genişliği, inşa maliyeti, altyapı işletme ve bakım maliyeti, araç işletme ve bakım maliyeti, enerji tüketimi, sera gazı emisyonu, elektrikleşme şekli, gürültü, titreşim, arazi kullanımı olmak üzere toplam 21 alt ölçüte yer verilmiştir. Belirlenen ölçütler çok ölçütlü değer verme yöntemlerinden AHP yöntemi ile ölçütlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen kriter ağırlıklarında en önemli ana kriter genel performans özellikleri olarak belirlenmesine rağmen maliyet ana kriterinin inşa maliyeti, altyapı işletme ve bakım maliyeti en önemli alt kriterler olmuştur. Arazi kullanımı, titreşim ve enkesit genişliği ise en az öneme sahip alt kriterler olarak belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen kriterlere göre alternatifler ÇÖKV yöntemlerinden olan MOORA

yönteminin farklı adımları olan oran yöntemi, referans noktası yaklaşımı ve tam çarpım formu ile değerlendirilmiştir.

MOORA-Oran yöntemi, her bir alternatifin her bir ölçütteki performansını normalleştirmektedir ve ardından her bir ölçütün ağırlığına göre çarpılarak toplamaktadır. Bu yöntem, alternatiflerin her bir ölçütteki performanslarını dikkate alarak genel bir performans puanı elde edilmektedir. Oran yöntemi, tüm ölçütlerin ve alternatiflerin ağırlıklı ortalamalarını dikkate alarak sıralama yapmaktadır. MOORA-Oran yöntemine göre Hyperloop, yüksek hız, düşük seyahat süresi, geometrik standartları ve düşük çevresel etkileri ile çok yüksek puan alarak birinci olmuştur. İkinci sırada yer alan Yüksek hızlı demiryolları ise sağladığı yüksek performans özellikleri ve düşük inşaa maliyetlerine rağmen yüksek bakım ve işletme maliyetleri ile hyperloop kadar üstün değildir. Maglev yüksek performans özelliklerine rağmen, yüksek maliyetleri ve çevresel etkiler performansı ile son sırada yer almaktadır. MOORA-Oran yöntemi ile belirlenene sıralama aşağıdaki gibidir.

1. Hyperloop
2. Yüksek Hızlı Demiryolları
3. Maglev

MOORA- Referans Noktası Yaklaşımı her bir ölçüt için belirlenen referans değerlere göre alternatiflerin performanslarını değerlendirmektedir. Bu yöntem ile alternatiflerin referans değerlere olan yakınlıkları dikkate alınır. Referans noktası yaklaşımına göre Yüksek hızlı demiryolları belirlenen referans değerlere en yakın performansı göstermektedir. Böylece birinci sırada yer almıştır. İkinci sırada Maglev yer almaktadır. Son sırada ise yüksek hız avantajına rağmen pek çok ölçütte referans değerlerden uzak kalmıştır.

MOORA-Tam çarpım formu, alternatiflerin her bir ölçütteki performanslarının çarpımlarını kullanarak değerlendirmektedir. Bu yöntem, alternatiflerin performans farklılıklarını daha belirgin hale getirerek minimum değerlere karşı hassasiyet göstermektedir. Hyperloop yüksek performans değerlerine ve düşük minimum değerlere sahiptir. Bu durumda birinci sıraya yerleşmiştir. Yüksek hızlı demiryolları ise performans ve maliyet ölçütlerinde dengeli değerlere sahip olduğundan ikinci sırada yer almıştır. Maglev yüksek maliyetleri ve düşük performans değerleri ile son sırada yer almaktadır.

Her bir yöntemde farklı sıralamanın oluşması yöntemlerin farklı yaklaşımları olması ile açıklanabilir.

Son adımda MULTIMOORA yöntemi ile bir araya getirilerek nihai sıralama yapılmıştır. MULTIMOORA yöntemi, üç farklı MOORA yönteminin sonuçlarını birleştirerek daha dengeli ve kapsamlı bir sıralama sunmaktadır. Bu kapsamlı değerlendirme sonucunda Hyperloop, değerlendirmelerde en yüksek puanı alarak birinci sırada yer almıştır. Hyperloop'un yenilikçi teknolojisi, yüksek hız kapasitesi, kısa seyahat süresi ve düşük çevresel etkileri, onu diğer alternatiflerden üstün kılan başlıca faktörlerdir. Hyperloop'un avantajları, özellikle hız ve seyahat süresi konularında öne çıkarken, çevresel etkiler açısından da diğer alternatiflere göre daha düşük bir etki yaratmaktadır. Bu, Hyperloop'un ileriye dönük sürdürülebilir bir ulaşım sistemi olma potansiyelini vurgular.

Yüksek hızlı demiryolları ise dengeli performansı ve düşük inşaa maliyeti etkinliği ile ikinci sırada yer almıştır. Yüksek hızlı demiryollarının mevcut altyapıya uyum sağlayabilme yeteneği ve daha düşük altyapı bakım maliyetleri, bu ulaşım sistemini ekonomik açıdan cazip kılmaktadır. Ayrıca, yüksek hızlı demiryolları teknolojisinin halihazırda yaygın olarak kullanılması ve güvenilirlik açısından kendini kanıtlamış olması, karar vericiler için önemli bir tercih sebebi olabilir.

Maglev, yüksek inşaa maliyetleri ve düşük çevresel etkiler performansı nedeniyle üçüncü sırada yer almıştır. Maglev teknolojisi, manyetik kaldırma ve itme kuvvetleri ile yüksek hızlara ulaşabilen yenilikçi bir sistem olmasına rağmen, inşaa ve altyapı maliyetlerinin yüksek olması, bu alternatifin diğerlerine göre daha az tercih edilmesine neden olmuştur. Ayrıca, Maglev sistemlerinin çevresel etkileri, özellikle enerji tüketimi ve sera gazı emisyonu açısından değerlendirildiğinde, daha az avantajlı bir konumda yer almaktadır.

MOORA yöntemlerinin her biri farklı kriter ve hesaplama yöntemlerine odaklandığından, her yöntemde farklı sonuçlar ortaya çıkmış, ancak MULTIMOORA yöntemi bu farklılıkları birleştirerek nihai sıralamayı oluşturmuştur. Bu, çok kriterli karar verme süreçlerinde farklı yöntemlerin bir arada kullanılmasının, daha dengeli ve kapsamlı sonuçlar elde edilmesini sağladığını göstermektedir.

Hyperloop, yüksek bakım maliyetlerine ve mevcut sistemlerle uyumlu olmamasına rağmen yapılan değerlendirmede sağladığı hız, seyahat süresi ve minimum çevresel etkileriyle en iyi performansa sahip seçenek olarak görülmektedir. Ancak Hyperloop ulaşım sisteminin hala teorik bir teknoloji olması ve henüz aktif bir işletmesinin bulunmaması unutulmamalıdır. Bu, teknolojinin pratikte uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği konusunda belirsizlikler yaratmaktadır.

Bu çalışmanın, karar vericilerin projelerini planlarken hangi alternatifin daha avantajlı olacağını belirlemelerine yardımcı olması amaçlanmıştır. Belirli bir güzergâh için bu veriler göz önünde bulundurularak fizibilite çalışmaları yapılabilir. Uzun mesafeli hatlarda istasyon sayıları, hat kapasitesi, yolcu talebi, gerekli araç sayıları gibi kriterler eklenerek çalışmanın kapsamı genişletilebilir. Bu ek kriterler, daha detaylı bir değerlendirme sağlayarak, projenin maliyet etkinliği, sürdürülebilirliği ve genel performansının daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **Campos, J., De Rus G., Barron, I.** (2009). Economic Analysis of High Speed Rail in Europe, BBVA Foundation, İspanya.
- [2] **Url-1** <<https://tr.wikipedia.org/wiki?curid=3168505>>, erişim tarihi 6.11.2023.
- [3] **Ömürbek, N., & Özcan, A.** (2016) . BIST'de İşlem Gören Sigorta Şirketlerinin MULTIMOORA Yöntemiyle Performans Ölçümü. *International Journal of Business, Economics and Management Perspectives*, 64-75.
- [4] **Url-2** <<https://uic.org/passenger/highspeed/article/high-speed-rail-histor>>, erişim tarihi 08.12.2018.
- [5] **Url-3** <<https://www.cnnturk.com/turkiye/hizli-tren-seferlerine-basladi>>, erişim tarihi 14.07.2020.
- [6] **T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı** (2017). *Ulaşan ve Erişen Türkiye*.
- [7] **Liu, Z., Long, Z., Li, X.** (2015). Maglev Trains Key Underlying Technologies. (pp.1-24). Berlin/Heidelberg: Springer.
- [8] **Yadav, M., Mehta, N., Gupta, Aman., Chaudhary, A., Mahindru, D.** (2013). Review of Magnetic Levitation (MAGLEV): A Technology to Propel Vehicles with Magnets. Erişim: 22.07.2024, adres: <https://globaljournals.org/GJRE_Volume13/6-Review-of-Magnetic-Levitation.pdf>
- [9] **Solak, K.** (2011). *Raylı Sistem Alternatifleri İle Manyetik Yastık Üzerinde Hareket Eden Trenlerin (Maglev) Çok Ölçütlü Değerlendirme Yöntemi ile Karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [10] **Lee, H., Kim, K.** (2006). Review of Maglev Train Technologies. *IEEE Transactions On Magnetics*, (Vol.42, No.7).
- [11] **Url-4** <<https://maglevinnovation.weebly.com/future-implications.html>>, erişim tarihi 31.01.2019.
- [12] **Url-5** < <https://hyperloop-one.com> >, erişim tarihi 04.02.2019.
- [13] **McClean, N.** (2016). *Comparative Analysis of Hyperloop against High Speed Rail for Commuting between Sydney, Canberra and Melbourne*. (Master Degree Thesis), The University of Queensland, Faculty of Engineering, Architecture, and Information Technology, Australia.
- [14] **Ambika, S., Sindura, Shree., Devika, Singh., Bharath, M.N.** (2018). The Train of Future-Hyperloop. *Journal of Mechanical Robotics*, (Vol.3, Issue.3, pp.24-30).
- [15] **Musk, E.** (2013). Hyperloop Alpha Design Proposal.

- [16] **Shrivastav, K., Pandey, S.** (2017). Hyperloop- Future of Transport. *Gyancity Journal of Engineering and Technology*, (Vol.3, No.2, pp 1-8).
- [17] **Massachusetts Institute of Technology.** (2017). Hyperloop Final Report.
- [18] **Url-7** <<http://www.eurail.com/en/get-inspired/trains-europe/high-speed-trains/tgv>>, erişim tarihi 19.12.2018.
- [19] **Shanghai Maglev Manual**(2015). Erişim tarihi 31.01.2019, adres: <http://steamcdn.akamaihd.net/steam/apps/376933/manuals/Shanghai_Maglev_Manual_English.pdf?t=1460539219>.
- [20] **Liu, R., Yi, D.** (2004). Comparing Operating Characteristics of High-Speed Rail and Maglev Systems: Case Study of Beijing-Shanghai Corridor. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, pp.19-27.
- [21] **S. Yıldırım** (2021), “Yüksek hızlı tren hatlarında sinyalizasyon blok mesafelerinin hesaplanması,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 14-25. doi: 10.47072/demiryolu.869933
- [22] **Yaghoubi, Barazi, Aoliaei** (2012). Maglev, *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), ISBN: 978-953-51-0448-3, InTech, Available from: <<http://www.intechopen.com/books/infrastructure-design-signalling-and-security-in-railway/maglev>> , Son erişim tarihi: 22.07.2024
- [23] **Yavuz MN, Öztürk Z.** (2021). Comparison Of Conventional High Speed Railway, Maglev And Hyperloop Transportation Systems. *International Advanced Researches and Engineering Journal* 05(01): 113-122, 2021
- [24] **Witt, M., Herzberg, S.**, Technical-economical System Comparison of High Speed Railway Systems. Erişim: 22.07.2024, adres: <http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2004/topic1/IMT_CP_M2004_T1_11.pdf>
- [25] **Dona, S., Singh, A.** (2017). The Workings of Maglev: A New Way to Travel. Erişim:22.07.2024, Adres: <https://www.researchgate.net/publication/317953705_The_Workings_of_Maglev_A_New_Way_to_Travel>
- [26] **AECOM** (2020). Preliminary Feasibility of Hyperloop Technology RFP-T8080-180829. Transport Canada.
- [27] **Chao, W., Kang, W.** (2010). A Study on Environmental Impact of High Speed Maglev Traffic Engineering. Erişim: 22.07.2024, adres: <https://www.researchgate.net/publication/238517699_A_Study_on_Environmental_Impact_of_High_Speed_Maglev_Traffic_Engineering>.
- [28] **Saaty, T.L.** (2008) Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1, 83. doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
- [29] **Url-7** <<http://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=83421&forceview=1>> , erişim: 19.12.2018.

- [30] **Ersöz, Atav** (2011). Çok Kriterli Karar Verme Problemlerinde Moora Yöntemi. Erişim: 22.07.2024, adres: <https://www.researchgate.net/publication/315834079_Cok_Kriterli_Karar_Verme_Problemlerinde_MOORA_Yontemi>
- [31] **Guerrieri M.** (2022). Hyperloop, Helirail, Transrapid And High-Speed Rail Systems. Technical Characteristics and Cost-Benefit Analyses. doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100824.
- [32] **Ekim O.**(2007), *Yüksek Hızlı Demiryolları İçin Geometrik Özellikler Ve Altyapı* (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- [33] **Dona S., Singh A.** (2017). The Workings Of Maglev: A New Way To Travel.
- [34] **Hyperloop Transport Tehnologys** (2020), Great Lake Hyperloop Feasibility Study. Erişim: 22.07.2024, adres: < <https://www.hyperlooptt.com/projects/feasibility-study>>
- [35] **Nuworsoo C.** (2009). Preliminaries to a Feasibility Analysis of the Maglev Proposal of The Southern California Association of Governments for the Region. Erişim: 22.07.2024, adres: <https://www.researchgate.net/publication/43157630_Preliminaries_to_a_Feasibility_Analysis_of_the_Maglev_Proposal_of_The_Southern_California_Association_of_Governments_for_the_Region>
- [36] **Siemens** (2001). Shanghai Maglev Transrapid Technology. Erişim: 22.07.2024, adres: <<https://www.ft.dk/samling/20061/almdel/tm/bilag/361/363482.pdf>>
- [37] **Janic, M.** (2018). Multicriteria Evaluation Of The High Speed Rail,Transrapid Maglev And Hyperloop Systems. *Transportation Systemsand Technology*, 4(4), 5–31.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Damla ALTINCI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Gelişim Üniversitesi Üniversite, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Aralık 2020-Ekim 2021, BRF Mekanik Tesisat Mühendislik ve Taahhüt Hizmetleri A.Ş.' de inşaat mühendisi olarak çalıştı.
- Ekim 2021- Temmuz 2024, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi'nde İnşaat Mühendisi/Araştırma Görevlisi olarak çalıştı.