

FÜNİKÜLER SİSTEMLER VE TÜRKİYE'DE KULLANIMI

Prof.Dr. C. Erdem İMRAK¹ ve Araş.Gör. Özlem SALMAN²

^{1,2} İTÜ. Makina Fakültesi, Gümüşsuyu 34437, İstanbul

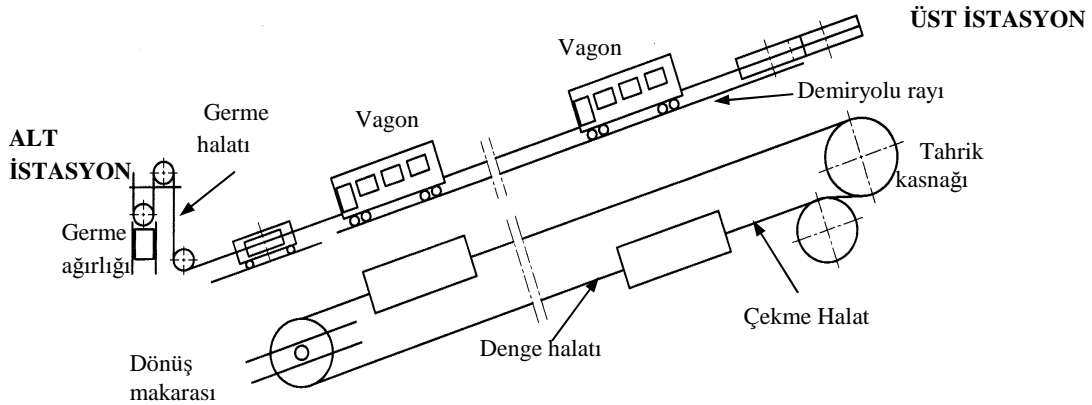
ÖZET

Füniküler sistemler özellikle şehir merkezlerinde yaygın olarak kullanılan yüksek taşıma kapasiteli transport sistemleridir. Genellikle aralarında büyük yükseklik farkı olan iki bölge arasında çalışır. Füniküler sistemler hem asansör hem de demiryolu teknolojilerinden oluşur. Bu çalışmada funiküler sistemler ve Türkiye'deki uygulamaları hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

1.GİRİŞ

Engebeli arazilerde, dağlarda kablo yardımıyla çekilen raylı sistemler için kullanılan “füniküler” sözcüğü Fransızca “funiculaire” sözcüğünden geliyor. Füniküler esas olarak demiryolları, eğimli bir arazide insan ve eşya taşımak için kurulmuş halatlarla birbirine bağlanmış ve ray üzerinde hareket edebilen transport sistemleridir.

Füniküler genellikle aralarında geniş bir seviye farkı olan bölgelerde hizmet veren ulaşım araçlarıdır. Prensip olarak funiküler, eğimli ya da yatay zemin üzerinde, iki istasyon arasında seyahat eden, bir motor tarafından çekilen bir çekme, bir de germe halatı ile birbirine bağlanan iki araçtan oluşan sistemler olarak düşünülebilir. Füniküler, üst istasyonda yer alan bir kasnağa sarılmış, çelik halat ile birbirine bağlanmış, en az iki araçtan oluşur (Şekil 1). Bu araçlar hat ortasında, her iki tarafta yer alan paralel raylar üzerinde hareket ederler. Araçlar, hat ortasında yan yana geçip, belirli bir mesafe kat ettikten sonra bu iki hat tek bir hatta birleşerek istasyonlara ulaşır. İnen trenin ağırlığı, eğimli yol üzerinde çıkan treni çekmeye yardımcı olur ve çıkan trende inen trenin hızının kontrolden çıkmasını engeller. Füniküler sistemler, yaygın kullanılan eğimli asansörlerle benzer teknik karakteristiğe sahiptir.



Şekil 1. Bir funiküler sisteminin genel görünümü

2.FÜNİKÜLERİN TARİHÇESİ

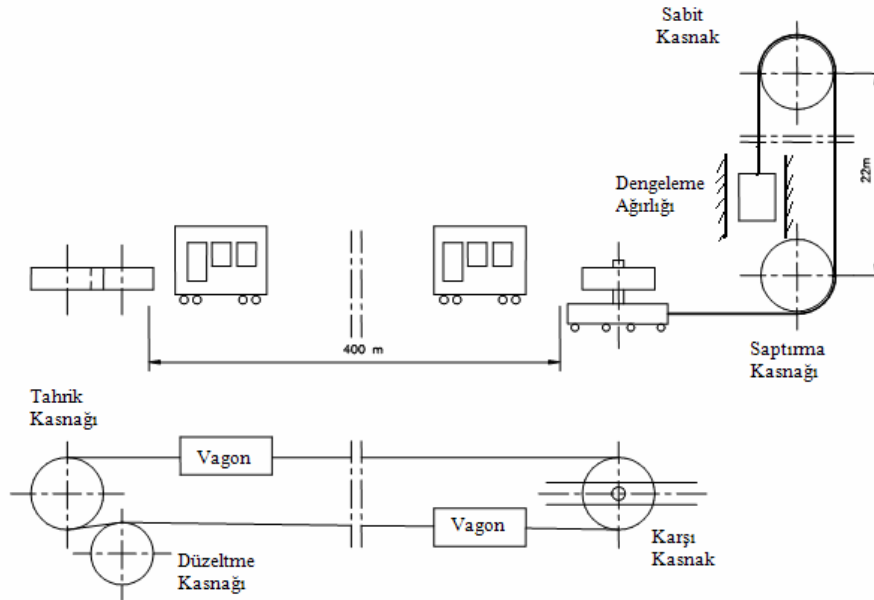
Füniküler uzun zamandır kullanılmakta olup, bilinen en eski funiküler 15. yüzyılın başlarında insanları ve eşyaları sarp yamaçlara çıkarmak için tasarlanmıştır. İlk funiküler Avusturya Salzburg'ta Hohensalzburg Kalesinde Kardinal Matthäus Lang tarafında 1515'te yapılmıştır. Bu yapıda insan veya hayvan gücü kullanılmıştır, raylar ise tahtadan yapılmıştır. Daha sonra İngiltere'nin Country Tyrone kentinde 1777 yılında su gücüyle çalışan, halatlar yardımıyla çekilen funiküler inşa edildi ve 1830'da kullanılmaya başlandı.

Stephenson ilk olarak 1825'te 1:50 eğime sahip bir yamaçta bir buhar makinasını fönüküler sisteme adapte etti. İlk insan taşıyan fönüküler 1861 yılında İtalya'nın Dusino kentinde, ikincisi ise 1862 yılında Lyons'ta inşa edildi. Dünyanın ilk kentsel fönüküleri "kablolu araç" adıyla 1873 yılında San Fransisco ABD'de yapılmıştır. İlk yer altı fönüküleri ise 1875 yılında İstanbul'da "Tünel" adıyla hizmete girmiştir. Tahrik o zamanlar buhar gücü ile sağlanmaktadır. Bu Londra Metrosu'ndan sonra dünyadaki ikinci metro kategorili araçtır. Avrupa'da ilk yer altı fönüküleri ise İsviçre'de 1877 yılında Lausanne'den Ouchy'ye kadar inşa edildi.

Fönüküler sistemde ABD'de çok ses getiren ilk elektrik tahrikli olanı Great Incline Funicular 1893 yılında kuruldu. Bu sistem 859 m ile 1067 m yükseklikleri arası taşıma yapmakta üç ayrı noktada eğimi değişmekte ve düşük eğimle başlayıp tepede yaklaşık %60 gibi bir eğime ulaşmaktadır. Bu fönüküler 1938'e kadar çalışmıştır [1-4].

3. FÜNİKÜLER MEKANİK TASARIMI

Şematik genel görünümü Şekil 2'de gösterilen 40 koltuk kapasiteli ve 60 yolcu alabilen 2 adet 20 ton ağırlığında kabini olan ve 4.5 m/s hızla 1.5 dak yolculuk süresine sahip 400 metre mesafede çalıştırılan bir yatay asansöre ait hesaplar verilmektedir [2,5,6].



Şekil 2. İki kabinli TÜNEL'in şematik görünümü

a) Tahrik edilen halatın hesabı

Bir halata gelen maksimum yük, yürüme ve ivmelenme direnci ile halat ağırlığından oluşmaktadır. Kabinler birbirini çekecek şekilde tertip edildiğinden, en kritik hal I. vagonun tam dolu II. vagonun ise boş olması halidir.

Yürüme direnci; Q_k , kabin ağırlığı, Q_y , yolcu ağırlığı, D , tekerlek çapı, d , aks çapı, f , yuvarlanma sürtünme moment kolu, μ , sürtünme katsayısı ve v , tekerlek emniyet katsayısı olmak üzere

$$W_{y1} = \frac{v \cdot (Q_k + Q_y)}{D} \cdot (\mu \cdot d + 2 \cdot f) , \quad (1)$$

ile ifade edilir. İvmelenme direnci ise, b , ortalama yol verme ivmesi olmak üzere

$$W_{i1} = v \cdot (Q_K + Q_y) \cdot \frac{b}{g} \quad , \quad (2)$$

dir. Bu durumda halata gelen maksimum çekme kuvveti:

$$S_{\max} = (W_{y1} - W_{y2}) + (W_{i1} - W_{i2}) + Q_H \quad , \quad (3)$$

olarak ifade edilir. Burada Q_H , halat ağırlığıdır. Halat emniyet katsayısı yaklaşık ($v_B = 40$) alınarak, çelik özlü halat seçilir.

b) Germe halatı hesabı

Halat yerden yukarıda olduğundan halat ağırlığı etkin olacaktır. Halata gelen maksimum yük :

$$S_{\max} = (Q_A + Q_H) \cdot \left(1 + \frac{b}{g}\right) \quad , \quad (4)$$

dür. Burada Q_A , germe ağırlığı, Q_H , halat ağırlığıdır.

c) Kasnakların seçimi ve hesabı

Füniküler sistemde farklı maksatlarla kullanılan halat kasnakları bulunmaktadır. Bunlarda tahrik kasnağı çapı $D_T = 100 \cdot d$ mm ile hesaplanır. Kasnak çapı kontrolü için $D_T \geq 500 \cdot \delta_{\max}$ şartı araştırılır. Düzeltme kasnağı çapı $D_D = 50 \cdot d$ ile hesaplanır. Hesaplarda yer alan d halat çapıdır. Karşı kasnak çapı $D_K = 100 \cdot d$ ile hesaplanır. Tahrik kasnağı çapı ile aynı kasnak çapı alınmıştır. Karşı kasnak yatay düzlemde hareketli araba üzerine yerleştirilmiştir.

Saptırma kasnağı, karşı kasnağın üzerinde olduğu araba mekanizmasına bağlı germe halatını saptırmada kullanılan kasnaktır ve $D_S = 50 \cdot d$ ile hesaplanır. Kasnak çapı kontrolü için $D_T \geq 500 \cdot \delta_{\max}$ şartı araştırılır.

Sabit makara seçimi ve hesabı $D_M = 50 \cdot d$ bağıntısı ile yapılır. Saptırma kasnağı ile sabit makara çapı eşit alınabilir.

d) Tahrik kabiliyeti

Tahrik kasnağında $\gamma = 40^\circ$ olan kama yiv kullanılmış ve halatın kasnak üzerindeki sarım açısı $\alpha = 250^\circ$ alındığına göre kritik hal için ,

$$\frac{S_1}{S_2} \cdot C_1 \cdot C_2 \leq e^{\mu\alpha} \quad , \quad (5)$$

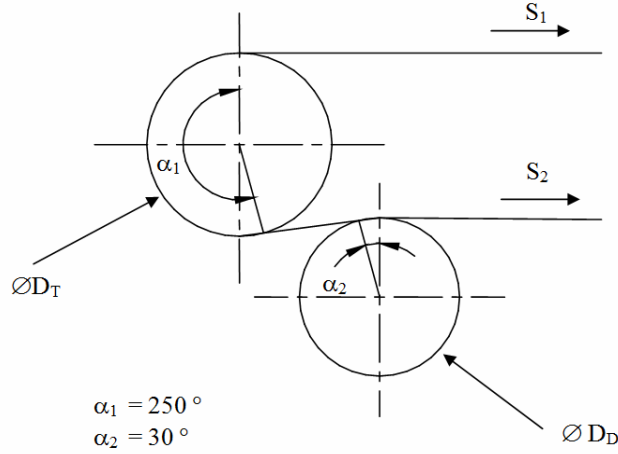
ile hesaplanır. Burada kabin anma hızı için $C_1 = 2$, kama yivi için $C_2 = 1.2$ dir. (5) ifadesinde yer alan kuvvetler Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir.

$$S_1 = W_{y1} + W_{i1} \quad \text{ve} \quad S_2 = W_{y2} + W_{i2} \quad .$$

Kasnak yivi üzerinde çalışan halatını yarattığı yüzey basıncı

$$p = \frac{S_1 - S_2}{D \cdot d} \cdot \frac{1}{\sin \gamma / 2} \quad , \quad (6)$$

bağıntısı ile hesaplanır.



Şekil 3. Tahrik kabiliyeti

e) Kabin tekerleği ve ray hesapları

Her kabinde 8 adet tekerlek kullanıldığı kabul edilirse, ray flambaj kontrolü için rayaya gelen kritik kuvvet :

$$P_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_X}{L^2} \quad , \quad (7)$$

dir. Burada I_X atalet momenti ve L , mesnetler arası mesafedir. Frenleme anında bir rayaya gelen kuvvet :

$$P_F = 25 \cdot (Q_K + Q_y) \quad (8)$$

dir. Bu durumda tek bir rayaya etkiyen toplam kuvvet :

$$P_R = 0.105 \cdot (P_F + G_R) \quad , \quad (9)$$

burada bir rayın kütlesi G_R dir. Eğilme gerilmesi kontrolü için çarpma kuvveti

$$P_C = 1.05 \cdot \frac{Q_K + Q_y}{2} \quad (10)$$

ile hesaplanır. Eğilme gerilmesi ise ray kesit alanı A olmak üzere $\sigma = P_C / A$ ile bulunur.

Rayda oluşacak sehim ise

$$e = \frac{P_C \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_X} \quad (11)$$

ile hesaplanmalıdır. Rayların patenlerden kurtulma mesafesi olarak ray cinsine göre $e_{em} = 5$ cm alındığından emniyetli olup olmadığı kontrol edilir [2].

4. DÜNYANIN İLK YER ALTI FÜNİKÜLERİ “TÜNEL”

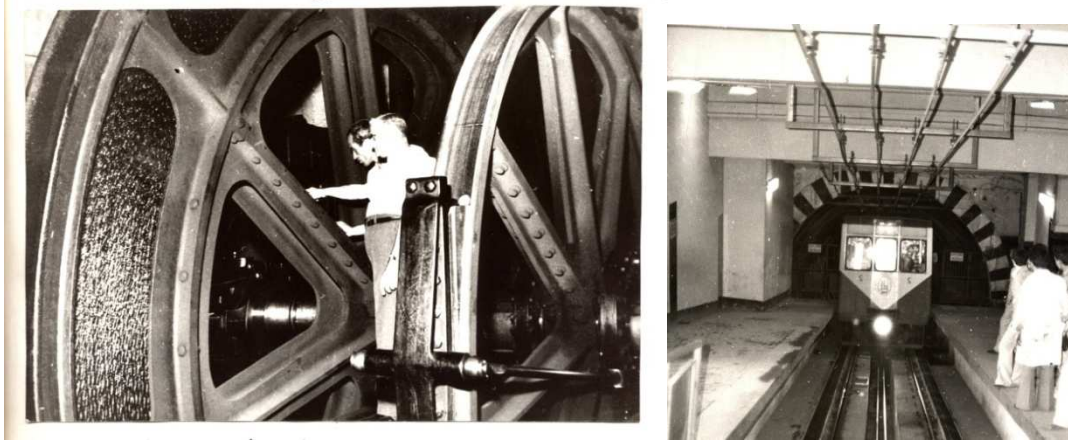
İstanbul’da yer alan füniküler, 1900’lü yılların en göze çarpan yeniliklerindedir. Eugene-Henri Gavand adlı bir Fransız mühendis 1867 yılında turistik bir gezi yapmak için İstanbul’a gelmiştir. Gavand bu gezisi sırasında, İstanbul’un iki önemli merkezi olan Galata ve Beyoğlu (Pera) arasında çok sayıda insanın gidip geldiğini gözlemlemiştir. Galata’nın önemli bir mali ve ticari merkez olmasının yanında Beyoğlu’da hareketli ve cazip bir eğlence yeridir. Gavand’ın tespitlerine göre bu iki hareketli merkez arasında günde ortalama 40.000 kişi gidip gelmektedir.

Fakat Yüksekaldırım bu yoğunluğu taşıyamamaktadır. Her şeyden önce bu caddede %24 gibi çok önemli sayılabilecek bir eğim mevcuttur. Caddenin genişliği ise ancak 6m'dir. Hatta yer yer 4 m'ye düşmektedir. Bu şartlarda yaya yürümek çok güç ve yorucu olmaktadır. Atla gidildiğinde ise çekilen zorluk yanında bir de düşme tehlikesini göze almak gerekmektedir [3].

Gavand'ın bulduğu çözüm şudur: Galata ile Beyoğlu arasında yapılacak asansör tipinde bir yer altı demiryolu (Tünel) ile insanları ve eşyaları taşımak mümkün olacaktır. Böylece halk için önemli bir kolaylık getirilmiş olacağı gibi kendisi de bu sayede kazanç elde etmiş olacaktır.

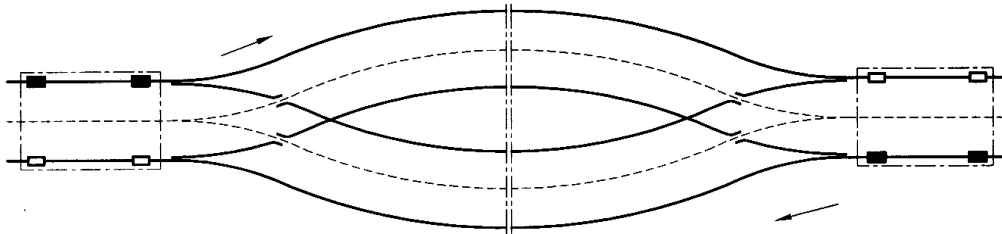
Tünel'in inşaatına 1871 yılında başlanmış 1875 yılında hizmete açılmıştır. Tünel ilk zamanlarda 150HP gücünde iki buhar makinası ile çalıştırılıyordu.

1968 yılında modern teknolojinin icaplarına uymak amacıyla tünelin yenilenmesine karar verilmiştir. Bu hususta tünel elektrikle çalışır hale getirilecek ve bunun yanında bazı iyileştirilmelere de gidilecektir. Bu çalışmalar 3 yıl sürmüştür. Galata istasyonuna da yeni bina yapılmıştır. Birkaç gün süren deneme seferleri boyunca vagonlarda kum torbaları taşındıktan sonra 9 Kasım 1971 tarihinden itibaren yolcu taşınmasına başlanmıştır. Şimdi ki sistemde, üst istasyonda yer alan makara Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Tünel makarasının resimsel görüntüsü

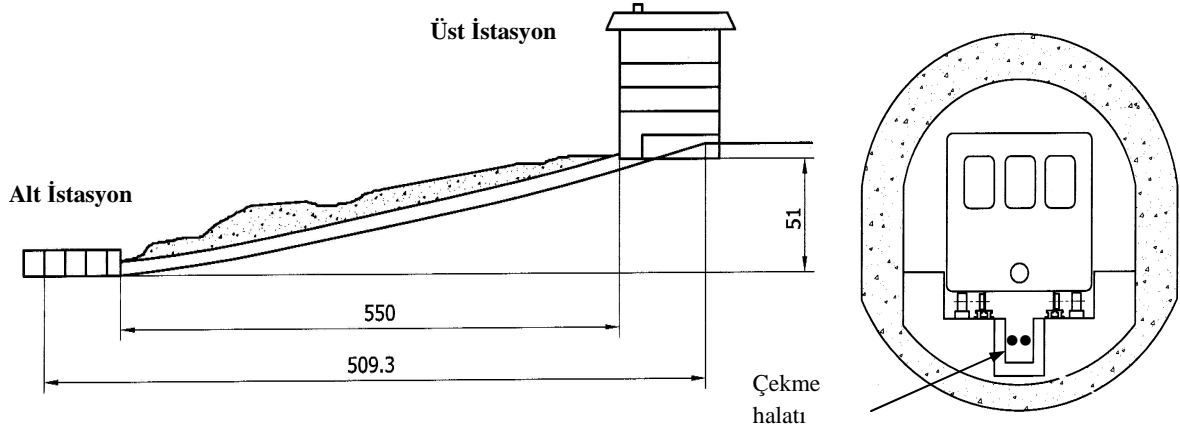
Tünelin boyu 555,80, çapı 6,70 yüksekliği 4,90 metredir. Tünelin içinden geçen demiryolunun uzunluğu ise 626 metredir. Demiryolu çift hat olarak yapılmıştır (Şekil 5). Raylar çelikten olup, metre başına 25 kg ağırlığındadır. İki ray arasındaki mesafe 1.5 metredir. Demiryolunun profili düz değildir [6].



Şekil 5. Rayların yapısı

Galata tarafının başlangıcında oldukça hafif bir rampa vardır. Bunun nedeni vagonların daha sonraki yokuşu aşabilmeleri için yeterli hızı kazanmalarını sağlayabilmektir. Bu şekliyle demiryolu hattı parabolik bir görüntü vermektedir. Galata yönünde metrede 10-20 mm arası bir eğim vardır. Bu eğim giderek artmakta ve metre başına 149 mm olarak en üst seviyesine çıkmaktadır. Bu seviye 90 m'lik bir mesafe boyunca Tünelin çıkışına kadar sabit kalmaktadır.

Daha sonra hafif bir azalma ile Beyoğlu istasyonuna metrede 139 mm'lik eğimle ulaşmaktadır. Galata'da demiryolunun deniz seviyesinden yüksekliği 1.15 metredir. Beyoğlu istasyonunda ise bu yükseklik 62.70 metredir (Şekil 6). İki istasyon arasındaki seviye farkının 61.55 metre olduğunu göz önünde bulundurulursa ortalama eğimin metrede 101mm olduğu anlaşılır. Demiryolu hattı parabolik olarak yapılırken iki amaç güdülmüştür. Birincisi tünelin üst seviyesi ile yukarıda bulunan evlerin temelleri arasında kalın bir toprak bulunmasını sağlamak, ikincisi ise Beyoğlu'ndaki yüksek eğim sayesinde, halatlar tarafından çekilen vagonların buhar gücünü kullanmaya gerek kalmadan harekete geçmelerini temin etmek.



Şekil 6. Tünel'in profili

Tünelin elektrikli yeni şekliyle teknik özellikleri şöyledir; gidiş uzunluğu 573 metre, hızı maksimum 8.33 m/s minimum 1.5m/s, vagon sayısı 2, yolcu kapasitesi 24 oturarak 146 ayakta toplam 170 yolcu, vagon boyu 16 metre, sefer süresi 90 saniye, bekleme süresi 3,5 dakika, çekici yuvarlak çelik halat kalınlığı 30 milimetredir.

4.1 Tünel ile ilgili teknik bilgiler

Enerji sistemi; sisteme dışarıdan gelen 10.000 volt alternatif akım makine dairesinde bulunan indirici trafoya gelir, 380 volt olarak trafodan çıkan enerji elektrik panosuna giriş yapar. Panoya gelen enerji yıldız üçgen şalteri vasıtası ile 380 V-375 kW gücündeki asenkron motoru çalıştırır. Asenkron motoru 220 V- 8 kW gücündeki alternatörü çevirir. Alternatörden üretilen gerilim elektronik kartlara gider, bu kartlarda doğru akıma çevrilen enerji 277 kW 440 volt ve 630 A kapasiteli Ward-Leonard sistemine gelir. Alternatif akımı doğru akım olarak alan sistem enerjiyi cer motoruna ileterek, bağlı redüktör ve volanı harekete geçirir.

Vagonlar; sistemde iki vagon bulunmakta olup, ağır yük taşıyıcı tipte havalı lastikli tekerleklerle teçhiz edilmiş, çift bujili ve çift dingillidir. Vagonlarda her iki dingilin bir ucunda araca istikamet veren kılavuz tekerlek bulunmakta diğer ucunda lastiklerin patlaması durumunda emniyet olarak kullanılan madeni tekerlek bulunmaktadır ve bu tekerleğe fren sistemi de monte edilmiştir. Araçta 8 adet lastik tekerlek bulunmakta olup, vagonun yükünü bu tekerlekler taşımaktadır.

Tünel yolu; lastik tekerleklerin gittiği beton plakalardan oluşan Lonjin isimli kısım, vagonların istikametini belirleyen ve iki rayın yan yana monte edildiği istikamet rayları, araçların çekildiği çelik halatların yönlendirildiği rulolar ve enerji sistemini taşıyan katener sistemden oluşur.

Lonjin; lastik tekerlekler lonjinlerin üzerinde seyretmekte olup, sistem portatif yol olarak dizayn edilmiştir. Yolu teşkil eden plakaların uzunluğu 300x26x10 cm ebadında beton plakalardan oluşmakta olup, bu plakalar yola saplamalarla monte edilmiş olup, gerektiğinde kısmi yenileme işlemi pratik olarak yapılabilir.

Çelik halatlar; vagonlar çelik halatlar yardımıyla çekilerek iki nokta arasında gidip gelmektedir. Halatların çapı 30mm olup, bu çap 104 adet çelik telin örülmesi ile oluşmaktadır.

Kablo germe merkezi; kablolarla gerek hava şartlarından gerekse malzeme yorulmasından ötürü meydana gelebilecek uzama ve kısaltmalar, Karaköy istasyonu sonunda bulunan ve ağırlık sistemi ile kabloyu geren “Kontrpuan merkezi” bulunmaktadır. Bu merkezde kablonun kopması veya aşırı uzaması sonucu switch’ler tarafından aracı frenlenerek muhtemel bir kaza bertaraf edilir, kablo germe işlemi merkezde bulunan 34 ton ağırlıktaki bloklarla gerçekleştirilmektedir.

Kılavuz tekerlekler; dingile takılan kılavuz tekerlekler yol boyunca çift hat olarak ve yan yana döşenen iki rayın ortasından gidip gelmek sureti ile aracın güzergahtan çıkmasını önlemektedir.

4.2 Güvenlik ekipmanları

Hava Freni: araçlarda bulunan 4 kılavuz 4 yedek metal tekerlekleri hava basıncı ile bağlayan balata frenidir. Bu fren çok etkili olup, bir araçta bulunan 8 tekerleği bağlamak suretiyle etkisini gösterir.

Elektrik Freni: hizmet freni olarak kullanılmakta olup, aracın istasyonda durmasını sağlamaktadır.

İmdat Freni: arabanın kapı üstlerinde ve herhangi bir olay karşısında yolcuların kullanması için, dizayn edilen fren olup, bu fren makina dairesinde bulunan (çekme) tahrik halatı volanını durdurarak etkisini gösterir. Ayrıca halatın kopması durumunda aracı acilen durdurmak için, kullanılan acil şaro kontağı freni mevcut olup, bu fren arabanın altında bir ucu kabloya diğer ucu kontağa bağlı fren sistemidir.

5. KABATAŞ-TAKSİM FÜNİKÜLER SİSTEMİ

Taksim ile Kabataş arasındaki raylı sistemin özelliklerinin belirlenmesinde en önemli etken, hattın oldukça eğimli bir arazide yer alacak olmasından dolayı maksimum eğim değerleri olmuştur. Bu çerçevede, hat için en uygun sistemi belirleyebilmek amacıyla, öncelikle eğimin sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hattın önerilen ortalama eğimi yaklaşık %22 civarındadır. Çeşitli raylı sistem türleri arasında yapılan karşılaştırmada, bu kadar yüksek bir eğimde çalışabilecek en güvenli ve yatırım ve bakım maliyeti açısından en ekonomik sistemin füniküler sistem olduğu görülmüştür.

5.1 Hattın Özellikleri ve Araçların Kapasitesi

Tesis edilen füniküler sistemin gereksinimleri göz önünde bulundurularak, hat özelliklerinin (maksimum hız, yanaşma/manevra hızı, vs.) optimum şekilde belirlenmesi gerekti. Bu parametrelerden yola çıkarak araç kapasitesi tespit edilmiştir.

Sistemin maksimum hızı 10 m/s ve buna göre saatteki hız 36 km/s'dir. Diğer hat karakteristikleri ve araç özellikleri aşağıdaki Çizelge 1’de özetlenmektedir.

Hat Karakteristikleri ve Araç Kapasitesi	
Maksimum hız (m/s)	10
Hızlanma İvmesi (m/s ²)	0.32
Terminal girişinde sünme hızı	0.5
Seyahat süresi(s)	110
Yavaşlama İvmesi (m/s ²)	0.32
Tahmini durma süresi (s)	69
Maximum eğim	%22
Toplam Uzunluk (m)	640
Trenin katedeceği yol uzunluğu	595
İstasyon boyu (m)	75
Yolculuk Süresi (s)	110
Durma ve İnme-Binme Süresi	69
Toplam Sefer Süresi (s)	179
Saatteki Sefer Sayısı	20
Yolculuk Talebi	7500
Araç Kapasitesi	375

Araç Özellikleri	
Maksimum hız (m/s)	10
Maksimum Yükte Kapasite (yolcu/m ²)	5
Araç Başına Koltuk Sayısı	48
Oturan Yolcular için Gereken Alan	14
Ayaktaki Yolcu Sayısı	327
Ayaktaki Yolcular için gereken Alan (m ²)	65
Yolcular için Gereken Toplam Alan (m ²)	79
Sürücü Kabini için Gereken Alan (m ²)	2
Toplam Alan (m ²)	81
Araçın İç Genişliği (m)	2.8
Araçın Dış Genişliği (m)	2.9
Araçın Uzunluğu (m)	34.55
Araçın Boş Ağırlığı (kg)	40,000
Yolcuların ve Sürücünün Ağırlığı (kg)	66,250
Maksimum Ağırlık (kg)	84,625

Çizelge 1. Kabataş-Taksim funiküler sistemin teknik özellikleri

6. SONUÇ

Bu çalışmada, şehir içinde yüksek taşıma kapasitesine sahip, funiküler sistemler ve Türkiye’de ki uygulamaları ele alınmıştır. Kısa mesafe az durak sayılarında yüksek taşıma kapasitesi sunan bu sistemler insan hareketliliğinde önemli bir alternatiftir. Çalışma prensibi bakımından klasik asansör sistemlerinin bir benzeridir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1**, http://en.wikipedia.org/wiki/Funicular#History_2
- [2] **İmrak, C.E., Gerdemeli, I.**, 2000. *Asansörler ve Yürüyen Merdivenler*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [3] **Schneigert, Z.**, 1966. *Aerial Ropeways and Funicular Railways*. Pergamon Press, Oxford.
- [4] **Strakosch, G.R.**, 1982. *Vertical Transportation: Elevators and Escalators*. John Wiley&Sons, New York.
- [5] **Engin, V.**, 2000. *TÜNEL*, Simurg yayınları, İstanbul.
- [6] **İmrak, C.E., Özkirim, M.**, 2002. Funicular Systems and an Early Application in Istanbul *Elevator Technology 12, Proc. of ELEVCON 2002*. Editör A. Lusting. IAEE Publ., Milano, s. 151-160.