

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTANBUL METROSU'NDA REJENERATİF ENERJİNİN GERİ  
KAZANIMI İÇİN BİR ÇİZELGELEME ÇALIŞMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Orhan USTAOĞLU**

**Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği**

**Programı : Mühendislik Yönetimi**

**HAZİRAN 2009**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTANBUL METROSU'NDA REJENERATİF ENERJİNİN GERİ  
KAZANIMI İÇİN BİR ÇİZELGELEME ÇALIŞMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Orhan USTAOĞLU  
(507051219)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cengiz GÜNGÖR (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ramazan EVREN (İTÜ)  
Doç. Dr. Tijen ERTAY (İTÜ)**

**HAZİRAN 2009**



## **ÖNSÖZ**

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında destek ve katkısını esirgemeyen tez danışmanım sayın Doç. Dr. Cengiz Güngör'e, yardımını eksik etmeyen sevgili arkadaşım Hilal Akay'a, bu süreçteki her anıma ortak olan sevgili Dilek Karaođlan'a ve tüm okul hayatımda olduğu gibi bu süreçte de hep yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran 2009

Orhan Ustaoglu  
Elektronik Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |             |
|--|-------------|
| <b>KISALTMALAR</b> .....   | <b>vii</b>  |
| <b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....   | <b>ix</b>   |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....   | <b>xi</b>   |
| <b>ÖZET</b> .....  | <b>xiii</b> |
| <b>SUMMARY</b> .....   | <b>xv</b>   |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....  | <b>1</b>    |
| 1.1 Tezin Amacı .....  | 2           |
| 1.2 Literatür Özeti .....  | 2           |
| 1.2.1 Dünyada ve Türkiye’de enerji tasarrufu ve önemi.....             | 2           |
| 1.2.2 Raylı sistemlerde enerji tasarrufu .....                         | 3           |
| 1.2.3 Raylı sistemlerde enerji tasarrufunda kullanılan yöntemler ..... | 4           |
| 1.2.4 Rejeneratif frenleme.....  | 5           |
| 1.2.5 Çizelgeleme.....   | 6           |
| <b>2. İSTANBUL METROSU</b> .....                                       | <b>9</b>    |
| 2.1 İstanbul Metrosu Hattı.....  | 9           |
| 2.2 İstanbul Metrosu Araçları.....                                     | 10          |
| 2.3 İstanbul Metrosu Enerji Hattı .....                                | 12          |
| 2.4 İstanbul Metrosu Yolcu Dağılımı.....                               | 14          |
| 2.5 İstanbul Metrosu İşletmesi .....                                   | 16          |
| <b>3. RAILSİM</b> .....  | <b>19</b>   |
| 3.1 İstasyonlar Arası Geçiş Sürelerinin Belirlenmesi .....             | 22          |
| 3.1.1 AW1 yükü için belirlenen istasyon geçiş süreleri.....            | 23          |
| 3.1.2 AW2 yükü için belirlenen istasyon geçiş süreleri.....            | 24          |
| 3.1.3 AW3 yükü için belirlenen istasyon geçiş süreleri.....            | 25          |
| 3.2 Sefer Çizelgesi Hazırlanırken İzlenen Yöntem .....                 | 26          |
| <b>4. JAVA DİLİNDE SİMÜLASYONUN HAZIRLANMASI</b> .....                 | <b>29</b>   |
| 4.1 Java Programlama Dili ile Simülasyonun Yazılması .....             | 29          |
| 4.1.1 Tanımlamalar .....   | 29          |
| 4.1.1.1 Tren hareket süreci.....                                       | 29          |
| 4.1.1.2 Tur zamanı .....   | 30          |
| 4.1.1.3 Kullanılan zaman .....   | 30          |
| 4.1.1.4 Kaybolan zaman.....  | 30          |
| 4.1.1.5 İstasyon .....   | 30          |
| 4.1.1.6 Tren sayısı (n) .....  | 31          |
| 4.1.1.7 Simülasyon süresi .....  | 31          |
| 4.1.2 Kısıtlar.....  | 31          |
| 4.1.2.1 Tur zamanı .....   | 31          |
| 4.1.2.2 4.Levent – Levent arası tek yol işletmesi.....                 | 31          |
| 4.1.2.3 Minimum istasyon bekleme süreleri .....                        | 32          |
| 4.1.2.4 Kuyruk hattı manevrası .....                                   | 32          |
| 4.1.3 Optimizasyon .....   | 32          |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1.3.1 Durağan zamana göre optimizasyon .....                                | 32        |
| 4.1.3.2 İstasyon bekleme sürelerine göre optimizasyon.....                    | 33        |
| 4.1.4 Analiz .....  | 33        |
| 4.1.5 Programın çalışma şekli .....   | 33        |
| 4.1.6 Simülasyonlar.....  | 34        |
| 4.1.6.1 Tüm istasyon geçiş sürelerinin minimum değerlerine göre .....         | 34        |
| 4.1.6.2 Tüm istasyon geçişleri sabit 105 saniye durumuna göre.....            | 35        |
| 4.1.6.3 Tüm istasyon geçişleri sabit 110 saniye durumuna göre.....            | 35        |
| 4.1.6.4 Rastgele sürelerle deneme .....                                       | 36        |
| 4.1.6.5 Hızlanma ve frenleme sürelerinin değiştirilmesi .....                 | 38        |
| 4.1.7 Simülasyonla elde edilen en iyi sonucun enerji cinsinden kazanımı ..... | 42        |
| 4.1.7.1 Altı trenli işletmede km başına harcanan enerji miktarı .....         | 42        |
| 4.1.7.2 Beş trenli işletmede km başına enerji tüketimi .....                  | 42        |
| 4.1.7.3 Dört trenli işletmede km başına enerji tüketimi .....                 | 44        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>  | <b>47</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>EKLER.....</b>   | <b>51</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>  | <b>57</b> |



## **KISALTMALAR**

|              |   |
|--------------|---|
| <b>ATC</b>   | : Automatic Train Control                           |
| <b>TAS</b>   | : Trenler Arası Süre                                |
| <b>TMMOB</b> | : Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği         |
| <b>TPC</b>   | : Train Performanca Calculator                      |
| <b>UITP</b>  | : The International Association of Public Transport |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Çizelge 1.1 : Seçilmiş bazı ülkelere ait 2005 yılı enerji göstergeleri .....       | 3  |
| Çizelge 2.1 : İstanbul metrosu istasyon isimleri.....                              | 9  |
| Çizelge 2.2 : Hat 1 İstasyon konumları. ....                                       | 10 |
| Çizelge 2.3 : Hat 2 istasyon konumları.....  | 10 |
| Çizelge 2.4 : Hat1 yatay kurplar.....  | 11 |
| Çizelge 2.5 : Hat2 yatay kurplar.....  | 11 |
| Çizelge 2.6 : Alstom dokümanından araç yolcu dağılımı .....                        | 12 |
| Çizelge 2.7 : Tren karakteristiği. ....  | 13 |
| Çizelge 2.8 : 2008 yılı tüketilen enerji miktarları.....                           | 14 |
| Çizelge 2.9 : 2008 yılı taşınan yolcu sayıları.....                                | 14 |
| Çizelge 2.10 : 2008 yılı sefer sayıları. ....                                      | 15 |
| Çizelge 2.11 : Sefer başına ortalama yolcu sayısı. ....                            | 15 |
| Çizelge 2.12 : Hattaki tren sayısına göre tren aralığı değişimi.....               | 16 |
| Çizelge 2.13 : İstasyon yolcu indirme bindirme süreleri (pik saatte).....          | 16 |
| Çizelge 2.14 : İstasyon yolcu indirme bindirme süreleri (diğer saatlerde).....     | 16 |
| Çizelge 2.15 : Günlük işletme. ....  | 17 |
| Çizelge 3.1 : Araç başı 60 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.....     | 23 |
| Çizelge 3.2 : Araç başı 120 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.....    | 24 |
| Çizelge 3.3 : Araç başı 175 kişi ile minimum istasyon geçiş süreleri. ....         | 24 |
| Çizelge 3.4 : Araç başı 235 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.....    | 25 |
| Çizelge 3.5 : AW2 yükü için Alstom dokümanlarından elde edilen veriler.....        | 25 |
| Çizelge 3.6 : Araç başı 293 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.....    | 25 |
| Çizelge 3.7 : AW3 yükü için Alstom dokümanlarından elde edilen veriler.....        | 26 |
| Çizelge 4.1 : AW1 yük çalışma saatleri için istasyonlar arası geçiş süreleri. .... | 36 |
| Çizelge 4.2 : AW1 yük çalışma saatleri için istasyon bekleme süreleri.....         | 37 |
| Çizelge 4.3 : AW2 yük çalışma saatleri için istasyonlar arası geçiş süreleri. .... | 37 |
| Çizelge 4.4 : AW2 yük çalışma saatleri için istasyon bekleme süreleri.....         | 37 |
| Çizelge 4.5 : Simülasyon sonuçlarının toplu listesi.....                           | 40 |
| Çizelge 4.6 : Yapılan haftalık sefer sayıları ve enerji tüketimi. ....             | 45 |
| Çizelge A.1 : Hazırlanan programda istasyon geçiş sürelerinin programa girilmesi   | 55 |
| Çizelge A.2 : Simülasyon süresi ve tren sayısının seçim bölümü .....               | 56 |



## ŞEKİL LİSTESİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1 : Bir tam tur güzergahı.....                      | 10           |
| Şekil 3.1 : Programa dosyanın atılması.....                 | 20           |
| Şekil 3.2 : Tren seçilmesi.....                             | 20           |
| Şekil 3.3 : Sürüş Parametrelerinin Belirlenmesi.....        | 21           |
| Şekil 3.4 : Programda simülasyon.....                       | 22           |
| Şekil 3.5 : Üretilen rejeneratif enerji – zaman eğrisi..... | 22           |
| Şekil 3.6 : Genel hareket şeması.....                       | 26           |
| Şekil 3.7 : Hat boyu hız zaman grafiği.....                 | 27           |
| Şekil 4.1 : Hat-1 pik saat işletmesi enerji tüketimi.....   | 43           |
| Şekil 4.2 : Hat-2 pik saat işletmesi enerji tüketimi.....   | 43           |
| Şekil 4.3 : 5 trenli işletmede Hat1 enerji tüketimi.....    | 43           |
| Şekil 4.4 : 5 trenli işletmede Hat2 enerji tüketimi.....    | 44           |
| Şekil 4.5 : 4 trenli işletmede Hat2 enerji tüketimi.....    | 44           |
| Şekil 4.6 : 4 trenli işletmede Hat2 enerji tüketimi.....    | 45           |
| Şekil A.1 : Alstom aracı hız zaman grafiği.....             | 53           |
| Şekil A.2 : Alstom aracı ivme zaman grafiği.....            | 54           |



# İSTANBUL METROSU'NDA REJENERATİF ENERJİNİN GERİ KAZANIMI İÇİN BİR ÇİZELGELEME ÇALIŞMASI

## ÖZET

Bu çalışmada İstanbul Metrosu araçlarının frenleme esnasında ortaya çıkardığı rejeneratif enerjinin geri kazanımı için nasıl bir enerji kazancı elde edilebileceği araştırılmıştır. Rejeneratif enerji elektrodinamik frenleme yapan trenin ürettiği enerjii hatta alıcı durumunda bulunan diğer trenlere aktarması prensibine dayanmaktadır. Trenlerin hareket ve bekleme süreleri enerji kazancı en fazla olacak şekilde düzenlenmiştir. Çalışmada kullanılan İstanbul Metrosu hattı, her biri 7,25 km olan iki hat ve toplam 11 istasyondan oluşmaktadır. RailSim ve Java dilinde hazırlanan simülasyon programları ile İstanbul Metrosu hattında farklı sayıda trenler için çizelgeler oluşturulmuş, enerji kazancının en fazla olduğu durumlar bulunmuştur.

Çalışma için öncelikle demiryolu uygulamalarına yönelik hazırlanan bir simülasyon programı olan RailSim'e İstanbul Metrosu'nun hat geometrisi bilgileri aktarılmıştır. Ardından hatta çalışan trenlerin performans karakteristiğine dair teknik bilgiler programa girilmiş, programda uygun ortam oluşturulmuştur. Yapılan simülasyonlar ile istasyonlar arası geçiş sürelerine ilişkin veriler toplanmış ve tren hareket sürecindeki safhalar için gerekli zaman dilimleri belirlenmiştir. Bunlara ek olarak, İstanbul Metrosu yolcu hareketlerine göre ortalama istasyon bekleme süreleri işletme kayıtlarından temin edilmiş, çizelgeleme esnasında kullanılacak iki ana zaman verisi bu sayede elde edilmiştir. Çalışmada enerji tüketimine ilişkin veriler de yine Railsim programı ile sağlanmıştır.

Railsim'den elde edilen veriler doğrultusunda alternatif çizelge denemelerinin yapılabilmesi için Java dilinde bir simülasyon yazılımı hazırlanmıştır. Hazırlanan yazılımda tren hareket sürecini oluşturan hızlanma, sabit hız, frenleme ve istasyon bekleme sürelerinde değişiklikler yapılarak değişik koşul ve tren sayılarına ilişkin simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan yazılım sayesinde farklı senaryolarla trenler İstanbul Metrosu hattında koşurulmuş, hızlanma ve frenleme sürelerinin kesiştiği aralıklar belirlenmiş ve sonuç ortamına kazanılan toplam rejeneratif süre olarak aktarılmıştır. Yapılan simülasyonlarla, kullanılan ve kaybedilen rejeneratif enerji miktarları gözlenerek en uygun sonuca yaklaşılmaya çalışılmıştır.

Elde edilen verilere göre tren hareket sürecinde ve istasyon bekleme süresinde yapılacak değişikliklerle, rejeneratif enerjinin daha yüksek oranda kullanılabilmesi için iyileştirmelerin yapılabileceği görülmüştür. Yapılan çalışmada kilometre başına tüketilen enerji miktarında %12.9'luk bir azalma sağlanabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca hatta çalışan tren sayısı ile rejeneratif geri kazanımın doğru orantılı olarak değiştiği, istasyon bekleme sürelerinin artmasının geri dönüşümü olumsuz etkilediği ve trenler arasında sağlanacak senkronizasyonun rejeneratif enerjinin kullanımı için önemli olduğu çalışmada ortaya çıkan sonuçlar olmuştur.





## **A STUDY IN ISTANBUL METRO TO REGAIN REGENERATIVE ENERGY BY SCHEDULING**

### **SUMMARY**

The aim of this study is to investigate how regenerative energy regained as a result of braking of metro vehicles by scheduling. Regenerative energy is produced during the electrodynamic braking period of trains and transferring the produced energy from decelerated train to accelerated. With the use of simulation, waiting and moving time of the trains were arranged in order to save maximum energy. İstanbul Metro includes 2 lines. Each line is 7,25 kilometers length and there is a total of 11 stations on these lines. By using RailSim and a particular simulation program written in Java language, different schedules were evaluated for distinct numbers of trains in İstanbul Metro and the maximum energy saving situations were determined.

First of all, the line geometry and vehicle characteristic performance information were entered into the RailSim simulation programme, which is a special software for railway applications. Using the simulations, data were collected for the time taken to move from one station to another for the train moving period. The standard or mean dwell times were collected from the operation records and energy consumption information were also collected by Railsim.

A simulation programme was designed in Java language to test alternative schedule forms based on the previously found data. By changing the time periods of acceleration, constant speed, braking and dwell time which constitute train movement processes, many simulations were made in different conditions and with different train numbers. With the help of the constructed software the trains run on the İstanbul Metro Line, the intersection intervals of acceleration and braking periods are determined and the result is displayed as regained regenerative energy. By observing the gained and wasted regenerative energy, optimum results were aimed to be determined.

The results of the study indicate that energy can be saved by using regenerative energy as a result of changing the dwell time and the time between stations. Furthermore, it can be seen that the energy consumption can be decreased 12.9 % for each kilometer travelled. Another result of the study revealed that there is a positive correlation between regenerative braking time and the number of trains on the line. Finally, the increase in dwell time was found to have bad effects on regenerative regain and the synchronization between the trains is important for finding the optimum result.



## 1. GİRİŞ

Fosil yakıtların günden günden güne azalması ve sebep olduğu çevresel kirlenme enerjinin daha verimli kullanımını zorunlu hale getirirken; binalar, ev aletleri, sanayi, aydınlatma sistemleri, ulaştırma gibi bir çok farklı alanda da enerji tasarrufu çalışmalarını beraberinde getirmiştir.

Ulaştırma alanında otomotiv sektöründeki firmalar, araçların yakıt tüketimlerinde tasarrufa gideceklerine dair taahhütlerde bulunurken, yoğun enerjinin tüketildiği raylı sistemlerde de çeşitli enerji tasarrufu çalışmaları yapılmaktadır (Kavak, 2005). Bunlardan rejeneratif özelliğe sahip trenlerin frenleme esnasında sahip olduğu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmesi prensibine dayanan, rejeneratif enerjinin geri kazanımı konusundaki çalışmalar ile %40 lara varan enerji tasarrufunun sağlanabileceği Gunselmann (2005) tarafından belirtmiştir.

Bu çalışmada da çizelgeleme metodu kullanılarak rejeneratif enerjinin geri kazanımı için nasıl bir işletme yolu izlenmesi gerektiği belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma beş bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm literatür özeti kısmıdır. Bu bölümde raylı sistemlerde enerji tasarrufuna değinilerek rejeneratif enerji ve çizelgeleme hakkında literatürdeki çalışmalardan bahsedilmiştir.

İkinci bölümde çalışmanın yapıldığı hat olan İstanbul Metrosu tanıtılmıştır. İstanbul metrosuna ilişkin hat, yolcu, enerji tüketimi, araç karakteristikleri, işletme şekli hakkında bilgi verilerek çalışma için toplanan ve kullanılan veriler anlatılmıştır.

Üçüncü bölüm Railsim simülasyon programı ile yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. Railsim programının TPC (Train Performance Calculator) özelliği ile minimum istasyon geçiş süreleri bulunmuş, elde edilen grafiklerden tren hareket eğrilerine ilişkin gerçekçi veriler elde edilmiştir.

Dördüncü bölüm ise Java ile hazırlanan uygulama yazılımına ayrılmıştır. Değişik tren sayıları için değişik koşullarda yapılan simülasyonlarla rejeneratif enerjinin geri kullanım oranına ilişkin optimum sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Son bölüm olan Sonuç ve Öneriler kısmında ise elde edilen veriler yorumlanarak uygun rejeneratif enerji kazanımı için çizelgelemede dikkat edilmesi gereken noktalardan bahsedilmiştir.

## **1.1 Tezin Amacı**

Bu çalışmanın amacı İstanbul Metrosu araçlarında rejeneratif frenleme esnasında ortaya çıkan enerjinin hattaki diğer araçlar tarafından kullanım oranının, sefer çizelgesinde yapılacak düzenleme ile değişiminin gözlenmesi ve kullanım oranında artış sağlayacak uygun çizelgenin sağlanmasıdır.

## **1.2 Literatür Özeti**

### **1.2.1 Dünyada ve Türkiye’de enerji tasarrufu ve önemi**

En önemli enerji kaynağı olan fosil yakıtlar günden güne azalırken, yeni kaynak sayısının doğru orantılı olarak artmaması ve fosil yakıtların sebep olduğu çevresel problemler üretim, iletim ve tüketim hatlarında enerji tasarrufu çalışmalarını kaçınılmaz hale getirmiştir (Kavak, 2005). Bu yüzden, çevresel kirlilik ve enerji kısıtlamaları bizleri enerji tüketimi konusunda daha ekonomik yolları araştırmaya itmiştir (Hong, Lee, Kwak, 2007). Mizuta’ya (2003) göre de CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltarak küresel ısınmanın önüne geçmek, enerji tasarrufu çalışmalarının çıkış noktasıdır.

Enerji verimliliği alınan tedbirlerle enerjinin daha etkin kullanımı olarak tanımlanırken; enerji tasarrufu ise bu tedbirlerle her safhada tüketilen miktardaki azalmayı ifade etmektedir (Kavak, 2005). Enerji verimliliği tüketilen her birim enerjide daha fazla üretim daha fazla servis olarak tanımlanmaktadır (TMMOB, 2007). Üretimi ve sosyal ihtiyaçları etkilemeden, aynı iş için kullanılacak enerji miktarının azaltılması için çok değişik alanlarda yürütülen politika, proje ve çalışmalar ise enerji verimliliğinin kapsam alanını oluşturmaktadır (Kavak, 2005).

Türkiye birincil enerji kaynakları bakımından yaklaşık %74.5 oranında dışa bağımlı bir ülkedir. (TMMOB, 2007). Toplam enerji tüketimi ve enerji yoğunluğu oranları gibi enerji verimliliği göstergelerine göre dünya ortalamasının altında bulunan ülkemizde enerji verimliliği çalışmaları ve enerji tasarrufu daha da önem arz etmektedir (Kavak, 2005).

**Çizelge 1.1 : Seçilmiş bazı ülkelere ait 2005 yılı enerji göstergeleri (Kavak, 2005).**

| Bölge / Ülke | Nüfus<br>Milyon | GYİH<br>Milyar<br>US \$ | GSYİH<br>(Satın<br>Alma<br>Gücüne<br>Göre)<br>Milyar<br>US \$ | Toplam<br>Birincil<br>Enerji<br>Tüketimi<br>Milyon<br>TEP | Elektrik<br>Tüketimi<br>Twh | CO <sub>2</sub><br>Emisyonu<br>Milyon<br>Ton CO <sub>2</sub> | Kişi<br>Başına<br>Enerji<br>Tüketimi<br>TBET /<br>Nüfus | Enerji<br>Yoğunluğu<br>(GSYİH<br>Başına<br>Enerji<br>Tüketimi)<br>TEP / 000<br>US \$ | Enerji<br>Yoğunluğu<br>(Satın<br>Alma<br>Gücüne<br>Göre)<br>TEP / 000<br>US \$ | CO <sub>2</sub> /<br>TBET<br>(Ton<br>CO <sub>2</sub> /<br>TEP) |
|--------------|-----------------|-------------------------|---|---|-----------------------------|--|---|--|--|--|
| Dünya        | 6432            | 36281                   | 54618   | 11434   | 16695                       | 27136  | 1.78  | 0.32   | 0.21   | 2.37   |
| OECD         | 1172            | 28394                   | 30321   | 5548  | 9800                        | 12910  | 4.74  | 0.2  | 0.18   | 2.33   |
| Danimarka    | 5               | 171                     | 164   | 20  | 36                          | 47   | 4.42  | 0.11   | 0.12   | 2.42   |
| İtalya       | 63              | 1430                    | 1695  | 276   | 483                         | 388  | 4.4   | 0.19   | 0.16   | 1.41   |
| Fransa       | 59              | 1133                    | 1521  | 185   | 332                         | 454  | 3.16  | 0.16   | 0.12   | 2.45   |
| Yunanistan   | 11              | 180                     | 282   | 31  | 58                          | 96   | 2.7   | 0.17   | 0.11   | 3.09   |
| İran         | 68              | 133                     | 484   | 163   | 147                         | 407  | 2.38  | 1.23   | 0.34   | 2.51   |
| Bulgaristan  | 8               | 16                      | 62  | 20  | 32                          | 46   | 2.59  | 1.25   | 0.32   | 2.30   |
| Romanya      | 22              | 49                      | 174   | 38  | 51                          | 91   | 1.77  | 0.78   | 0.22   | 2.37   |
| Türkiye      | 72              | 246                     | 568   | 85  | 137                         | 218  | 1.18  | 0.35   | 0.15   | 2.57   |
| İngiltere    | 60              | 1626                    | 1699  | 234   | 377                         | 530  | 3.88  | 0.14   | 0.14   | 2.27   |
| Amerika      | 297             | 10997                   | 10997   | 2340  | 4046                        | 5817   | 7.89  | 0.21   | 0.21   | 2.49   |
| Çin          | 1304            | 1890                    | 7842  | 1717  | 2323                        | 5059   | 1.32  | 0.91   | 0.22   | 2.95   |
| Almanya      | 82              | 1962                    | 2169  | 345   | 586                         | 813  | 4.8   | 0.18   | 0.16   | 2.36   |
| Japonya      | 128             | 4994                    | 3474  | 531   | 1052                        | 1214   | 4.15  | 0.11   | 0.15   | 2.29   |

### 1.2.2 Raylı sistemlerde enerji tasarrufu

Enerji tasarrufu demiryolu otoritelerince de her zaman dikkate alınan konulardan birisi olmuştur (Jong & Chang 2005). Çünkü raylı sistemlerin işletmesinde çok yüksek miktarda enerji kullanılmaktadır ve son yıllarda Uluslararası Toplu Taşımacılar Birliği (UITP) ve Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) bu projelere önem vermiş, bir standardizasyon oluşturmayı hedeflemiştir (Açıkbaş & Alataş, 2006).

Raylı Sistem araçları genellikle elektriksel enerji ile çalıştığından direk olarak çevresel kirlenme oluşturmadığı düşünülse de tüketilen enerjinin çok yüksek miktarlarda olması bu alanda da ekonomik tüketim yollarının bulunmasını zorunlu hale getirmiştir (Hong, Lee, Kwak, 2007).

Raylı sistemlerde enerji tüketen sistemler, trenlerin tahrik gücü tüketimi ile yolcuların trene erişim yollarındaki ve istasyon tüketimlerini kapsayan yardımcı güç tüketimi olmak üzere iki ana sınıfta toplanırken yer altındaki tünellerde işletme yapılan metro hatlarında cer (tahrik) gücü ile yardımcı güç tüketimleri birbirine eşittir fakat tramvay gibi yer üstü hatlarında yardımcı güç tüketimi çok daha düşük düzeydedir (Açıkbaş, 2008).

### 1.2.3 Raylı sistemlerde enerji tasarrufunda kullanılan yöntemler

Raylı sistemlerde karşılaştığımız ilk büyük kapsamlı enerji tasarrufu, Alman firmalarının yaptığı elektrikli çeken araçlarda elektrodinamik frenleme esnasında üretilen elektriğin tavadaki rezistanslarda yakmak yerine, yolcu kompartımanlarında bulunan koltuk altı ısıtıcılarında kullanılmasıdır (Keleş, 2008).

Genel olarak şehir içi hizmet veren, 1-2 kilometrelik istasyonlar arası maksimum 80-100 km/h ile işleyen metro, hafif metro, tramvay gibi raylı sistemler araçlarının hareket süreçlerini üç safhaya ayırmak mümkündür, bunlar: yüksek güç isteyen hızlanma safhası, daha düşük güç isteyen durağan safha ve rejeneratif frenleme ile kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülebileceği frenleme safhasıdır (Chen, Lin & Liu, 2005).

Düşük rezistanslı enerji hatlarının oluşturulması, enerji verimli sürüş, hafif gövdeli araç imalatı, rejeneratif enerjinin geri kazanımı raylı sistemlerde enerji tasarrufu sağlamak için kullanılan yöntemlerden bazılarıdır (Hong, Lee & Kwak, 2007). Keleş'in (2008) değindiği üzere dinamik freninde üretilen regeneratif enerjinin hatta geri kullanılması, araç üzerinde monte edilen ultra-kapasitörlerde veya volanda (elektromekanik depolama) depolanması, enerji verimli araç sürülmesi (makinistlerin çeşitli cihazlar yardımı ile bilgilendirilmesi) , işletmede tren aralıkları ve tren karşılaşma yerlerinin ayarlanması (İşletmede headway planları yaparken, dinamik fren yapan aracın, blok içerisinde alıcı olacak ivmelenme anındaki aracın karşılaşma anlarını hesaplayarak planlama yapmak ile) büyük ölçüde enerji tasarrufları yapılmaktadır.

Bu yöntemlerden maksimum boşta sürüş tekniğinin ana prensibi iki istasyon arası belirli bir hıza kadar tren hızını yükselttikten sonra motorların kapatılması ile trenin sahip olduğu momentumla istasyona varmasıdır (Wong & Ho, 2004).

Maksimum boşta sürüş tekniği için sürücü kabinlerine uyarıcı sistem koyularak Hong Kong KCRC ve Singapur MRT sistemleri olarak çalışmalar yapılmış, Hong Kong KCRC ile %3 e varan kazanç elde edilmiştir (Wong & Ho, 2004).

Tomi (2003) de istasyon aralarındaki maksimum seyir hızını aşağı çekerek ve maksimum verimle boşta gitme sürelerini kullanarak %7 ile %20 arasında enerji tasarrufu sağlanabileceğini görmüştür.

Raylı sistemlerde tahrik sistemi için harcanan enerji miktarı: Hat geometrisi, araç karakteristikleri, cer gücü sistemi karakteristiği, işletme koşulları gibi parametrelere göre değişmektedir (Açıkbaş & Söylemez, 2008).

Bu parametreler dahilinde: katener sisteminin paralellenmesi, hattaki hız limitlerinin ayarlanması, tren sıklığının ayarlanması, rejeneratif güç kullanımının artırılması gibi yöntemlerle enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Açıkbaş & Söylemez, 2008).

Bir diğer tasarruf yöntemi olarak Caputo (2000) yaptığı çalışmada geliştirdiği yeni modellerle sadece araç ve güç parametrelerini kullanmamış, araç üzeri kapasitör, akümülatör gibi enerji depolama ekipmanları ile enerji tasarrufu yoluna gitmiş, ayrıca bu yöntemle hattın pik gerilimlerinden de koruma sağlamıştır.

Raylı sistemlerde enerji tasarrufuna yönelik yapılan bir diğer çalışmada da hat besleme gerilimi 750VDC yerine 1500V DC olması durumunda enerji tüketimi incelenmiş ve tüketimin %10 dolaylarında düştüğü görülmüştür (Açıkbaş & Söylemez, 2004)

İstanbul Ulaşım A.Ş. nin yaptırdığı bir incelemede de Anadolu Yakasında yapılacak Kadıköy Kartal metro hattın verileri kullanılarak 750V DC yerine 1500 V DC besleme gerilimi kullanılması durumunda 2025 yılı işletme şartlarında yıllık 12.5 milyon kwh lik bir enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir (İstanbul Ulaşım A.Ş., 2006)

Genel olarak Cer gücü tüketiminden tasarruf sağlama yöntemleri birkaç ana başlık altında sıralanırsa öne çıkanlar: Enerji kayıplarının azaltılması, rejeneratif enerji kullanım oranının artırılması ve sürüş tekniklerinde yapılacak iyileştirmelerdir (Açıkbaş, 2008).

#### **1.2.4 Rejeneratif frenleme**

Cer gücünün verimli kullanılması raylı sistemler için vazgeçilmez bir konudur ve uzun yıllardır cer motorlarının frenleme durumunda jeneratör olarak kullanıldığı araçlar raylı sistemlerde kullanılmaktadır (Bocharnikov, Tobias, Roberts, Hillmansen & Goodman, 2007). Rejeneratif özelliğe sahip trenler frenleme esnasında kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler ve bu enerjiyi hatta geri verirler (Okada, Koseki & Sone, 2003).

Raylı sistemlerde kullanılan enerjinin %40 a varan kısmının rejeneratif frenleme ile geri kazanılabileceği yapılan çalışmalarda da ortaya çıkmıştır (Gunselmann, 2005). Rejeneratif frenlemenin sağladığı tek fayda geri kazanılan enerji değildir. Yakılarak ısı enerjisine dönüşmesi engellenen elektrik enerjisi ile tünel ve istasyon havalandırma sistemi de çalışma frekanslarının düşürülmesiyle korunmuş olur (Adinolfi, Lamedica, Modesto, Prudenzi & Vimercati, 1998 ). Rejeneratif Frenlemenin (Dinamik Frenleme) bir diğer faydası da mekanik (sürtünme) freni ekipmanlarının aşınma periyodunu uzatmasıdır (Martin, 1999).

Rejeneratif frenleme adı altında asıl vurgu yapılan nokta frenlemeye geçen aracın ürettiği enerjinin kendi iç direncinde yakılmadan önce bu esnada hattaki alıcı tren tarafından kullanılmasıdır (Foiadelli, Roscia & Zaninelli, 2006).

Fakat bu kullanım oranı gelişigüzel bir şekildedir ve hattaki tren sayısı, sıklığı ve konumuna bağlı olarak değişmektedir (Foiadelli, Roscia & Zaninelli, 2006). Bu yüzden, rejeneratif frenlemeden doğan enerjinin etkin bir biçimde kullanılabilmesi içinse uygun bir trafik planlamasına ihtiyaç vardır (Wong & Ho, 2004)

Günümüzde herhangi bir sürücünün başarabileceğinin çok daha iyisini gerçekleştirebilecek çeşitli sürüş öneri sistemleri bulunmaktadır ve genellikle zaman öncelikli olarak öneriler getiren bu sistemlerin enerji öncelikli olarak çalışmasını sağlayacak yeni teknikler üzerinde çalışılmaktadır (Açıkbaş, 2008).

Otomatik tren işletim sisteminin özelliği ve bu şekilde oluşturulabilecek sürüş teknikleri ile yüzde otuzun üzerinde enerji tasarrufu sağlanabilir (Albert, Levin, Vietrose & Wette, 1995).

### **1.2.5 Çizelgeleme**

Tren sefer aralıkları ve sıklıklar günlük sosyal ve ticari yaşantının ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde belirlenmektedir (Wong & Ho, 2004). Zaman çizelgelerinin genel prensibi ise istasyonlar arası minimum geçiş süreleri üzerine eklenen ve oluşabilecek gecikmelerin tolere edilmesine imkan sağlayacak yedek zaman aralıklarını kapsayacak şekilde oluşturulmaktadır (Açıkbaş, 2008). Bunun yanında istasyonlardaki bekleme süreleri de yolcu hizmet kalitesinin belirlenmesinde etken olan ana faktörlerden birisidir (Öncül, Aykaç, Bayraktar & Çelebi, 2008).



Sefer süreleri ve enerji tüketimi birbiri ile sıkı bir ilişki içinde olduğundan sefer saati planlaması yapılırken bu değişkenler dikkat edilen önemli parametrelerdendir ve bu bakış açısıyla rejeneratif frenlemenin verimli kullanımı ile maksimum boşta sürüş enerji verimliliği için kullanılan yaklaşımlardır (Wong & Ho, 2004).

TAS'ın 3 dakika ve altında olduğu hatlarda dinamik frenleme esnasında oluşan enerjinin yaklaşık %85 ila %95 kadarı hattaki diğer alıcı tenler tarafından kullanılmaktadır (Açıkbaş & Alataş, 2006). İstasyonlar arası minimum sefer süresine göre yapılan işletme (flat-out operation) şekli pik saatler için işletmecilere referans olmakta ve bu saatlerde işletmeyi rahatlatmaktadır (Wong & Ho, 2004). Tren işletmenin sıklığının daha düşük olduğu hatlarda ise ortaya çıkan rejeneratif enerjinin büyük kısmının fren rezistörlerinde yakılarak kaybedildiği belirtilmektedir (UITP, 2005).

Trenlerin duruş ve kalkış sürelerinde sağlanacak koordinasyon ile enerji tüketiminin aşağıya çekilmesinin yollarından birisi de trenlerin istasyon kalkış ve duruş zamanlarını denk getirilmesidir (Açıkbaş, 2008). Son yıllarda enerji verimli sürüş konusunda boşta gitme kontrolü, otomatik işletme yapılan hatlarda senkronize tren işletimi gibi değişik başlıklar altında değişik çalışmalar yapılmaktadır (UITP, 2005).

Takagi ve Sone 1996 yılında yaptıkları bir çalışmada sefer saatlerinde gerçekleştirilecek küçük oynamalarla %35 lere varan enerji kazancı sağlanabileceğini bulmuşlardır.

Paul ise (1999) yaptığı çalışmada tren sefer sürelerinde gerçekleştirilecek %5 lik bir uzama ile neredeyse %20 lik bir enerji kazancının elde edilebileceğini görmüştür. Aynı şekilde yapılan bir diğer çalışmada da %10 luk bir sefer süresi uzaması ile %10 luk bir enerji kazancı elde edilmiştir (Jong & Chang 2003).

Tren servislerinin çizelgelemede en yaygın kullanılan metodlar ise istasyon bekleme sürelerinde yapılan ayarlamalar üzerine kurulmuştur (Açıkbaş, 2008).

Sefer tarifeleri hazırlanırken herhangi bir arıza veya yolculardan kaynaklanabilecek ufak gecikmeler göz önünde bulundurularak "slack time" denilen ekstra zamanlar da sefer çizelgelerinin içine eklenir, "yedek zaman aralığı" ile istasyonlar arası bekleme kullanılarak enerji verimli sürüş için istenen süreler kullanılabilir (Açıkbaş & Söylemez, 2008).

Otomatik sürüşte frenleme ve tahrik kontrol ünitesi vasıtası ile trenin hızlanma frenleme süresi, boшта gitme süresi kontrol edilerek sürüş kontrolü sağlanabilmekte ve bilgisayar kontrolü ile yapılan bu işletmede manüel işleme göre daha enerji verimli sürüş biçimleri yakalanabilmektedir (Açıkbaş, 2008).

Trenlerin hızlanma ve frenleme eğrilerini kesiştirmek için oluşturulacak koordinasyon yanında hat geometrisi çerçevesinde yokuş inen ve yokuş çıkan trenlerin iniş ve çıkış aralıkları koordine edilerek de enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Gordon & Lehrer, 1998).

Sistem davranışı ve performans karakteristiklerinin belirlenmesinde simülasyonun en geçerli ve ucuz yol olduğu görülmüştür (Goodman, Siu & Ho, 1998).

Maksimum ivmesi  $0.9 - 1.1 \text{ m/s}^2$  ve maksimum hızı 80-100 km/h arasında değişen MRT sistemlerinde trenin maksimum hıza erişmesi için geçen süre motor karakteristiklerine göre yarım dakikalar civarında değişmektedir (Chen, Lin & Liu, 2005). Örnek olarak İstanbul metrosunda çalışan Alstom araçları için bu süre 39 saniye olarak bilinmektedir (İstanbul Metro System, 1996).

## 2. İSTANBUL METROSU

### 2.1 İstanbul Metrosu Hattı

Yapımına 1992 yılından başlanan İstanbul Metrosu 16 Eylül 2000 tarihinde hizmete girmiştir. Toplam hat uzunluğu 14.5 km olan metroda 11 adet de yolcu istasyonu bulunmaktadır. Günlük ortalama sefer sayısı 394 olan İstanbul Metrosu'nda günlük ortalama yolcu sayısı da 195000 olarak verilmektedir.

İstanbul Metrosu Hattı ile ilgili aşağıda verilen tüm bilgiler Alstom firması dokümanları ve İstanbul Ulaşım A.Ş. ilgili birimlerinin orijinal doküman ve personellerinden temin edilmiştir.

İstanbul metrosu iki ayrı hattan oluşmaktadır. Bu hatlar Hat-1 ve Hat-2 olarak isimlendirilir. Hat-1 Taksim – 4. Levent yönü için kullanılırken Hat-2 ise 4. Levent – Taksim istikameti için kullanılmaktadır. Hat-1 9+744 – 17+652 kilometreleri arasında bir uzunluğa sahipken, Hat-2 ise 9+756 - 17+662 kilometreleri arasındadır.

Hat-1 ve Hat-2 istasyon ve yatay kurp kilometrelerine ilişkin bilgiler çizelge 2.2, 2.3, 2.4 ve 2.5'te verilmiştir. Hatta ilişkin bu bilgiler Railsim programının veri dosyası için kullanılmıştır.

Her hatta altışar istasyon bulunmaktadır. Bu istasyonlar hat numarasına göre isimlendirilmiştir:

**Çizelge 2.1 : İstanbul metrosu istasyon isimleri.**

| İSTASYON İSİMLERİ |           |           |             |             |           |           |
|-------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| Hat1              | Taksim1   | Osmanbey1 | Şişli1      | Gayrettepe1 | Levent1   | 4.Levent1 |
| Hat2              | 4.Levent2 | Levent2   | Gayrettepe2 | Şişli2      | Osmanbey2 | Taksim    |

İstanbul Metrosunda 4.Levent – Levent arasında tek yol işletmeciliği yapılmaktadır. Bu yüzden trenler bu bölgede Hat-1 i kullanmaktadırlar. Hat-2 4.Levent – Levent

bölgesi İstanbul Metrosu araçlarının bakımlarının yapılp, arızalarının giderildiği İstanbul Metrosu Atölyesi'ne ayrılmıştır.

Taksim2 de yolcularını indiren tren de yön değiştirmek için Taksim Hat1 ve Taksim



Şekil 2.1 : Bir tam tur güzergahı.

Hat2 sonlarının arasında bulunan ve kuyruk hattı olarak isimlendirilen bölgede kuyruk hattı manevrasını yaparak Taksim1'e geçer.

Çizelge 2.2 : Hat 1 İstasyon konumları.

| HAT 1      |                |            |
|------------|----------------|------------|
| İstasyon   | Başlangıç (km) | Bitiş (km) |
| Taksim     | 9+913,6        | 10+093,6   |
| Osmanbey   | 11+541,3       | 11+721,3   |
| Şişli      | 13+061,5       | 13+241,5   |
| Gayrettepe | 14+712,8       | 14+892,8   |
| Levent     | 15+821,2       | 16+001,2   |
| 4.Levent   | 16+990         | 17+170     |

Çizelge 2.3 : Hat 2 istasyon konumları.

| HAT 2        |                |            |
|--------------|----------------|------------|
| İstasyon     | Başlangıç (km) | Bitiş (km) |
| Taksim       | 9+917,9        | 10+097,9   |
| Osmanbey     | 11+532,7       | 11+712,7   |
| Şişli        | 13+082,4       | 13+262,4   |
| Gayrettepe   | 14+746,5       | 14+926,5   |
| Levent       | 15+822,3       | 16+002,3   |
| 4.Levent     | 16+995,5       | 17+175,5   |
| PMA (Atölye) | 16+884         | 17+235,5   |

İstanbul Metrosu hat eğimi metro araçlarının müsaade edebildiği maksimum %4 lük değere göre belirlenmiştir. Bu değer hat üzerinde bölge bölge değişebilmektedir.

## 2.2 İstanbul Metrosu Araçları

İstanbul Metrosu'nda Fransız Alstom firmasının üretimi olan trenler kullanılmaktadır. Tren tanımı dört araçlık diziler için kullanılmaktadır. Şirket

**Çizelge 2.4 : Hat1 yatay kurplar.**

| <b>HAT 1</b>          |                       |                   |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| <b>Yatay Kurp</b>     | <b>Başlangıç (km)</b> | <b>Bitiş (km)</b> |
| R <sub>1</sub> =400   | 9+585                 | 9+809             |
| R <sub>2</sub> =400   | 10+400                | 10+472            |
| R <sub>3</sub> =399   | 10+823                | 10+899            |
| R <sub>4</sub> =500   | 11+182                | 11+290            |
| R <sub>5</sub> =420   | 12+284                | 12+610            |
| R <sub>6</sub> =500   | 13+424                | 13+640            |
| R <sub>7</sub> =500   | 14+507                | 14+568            |
| R <sub>8</sub> =399   | 15+048                | 15+582            |
| R <sub>9</sub> =1750  | 16+204                | 16+285            |
| R <sub>10</sub> =800  | 16+403                | 16+436            |
| R <sub>11</sub> =1035 | 16+631                | 16+903            |
| R <sub>12</sub> =700  | 17+578                | 17+852            |

**Çizelge 2.5 : Hat2 yatay kurplar.**

| <b>HAT 2</b>         |                       |                   |
|----------------------|-----------------------|-------------------|
| <b>Yatay Kurp</b>    | <b>Başlangıç (km)</b> | <b>Bitiş (km)</b> |
| R <sub>1</sub> =400  | 9+596                 | 9+831             |
| R <sub>2</sub> =400  | 10+410                | 10+472            |
| R <sub>3</sub> =400  | 10+856                | 10+924            |
| R <sub>4</sub> =500  | 11+180                | 11+288            |
| R <sub>5</sub> =452  | 12+276                | 12+631            |
| R <sub>6</sub> =531  | 13+446                | 13+681            |
| R <sub>7</sub> =400  | 14+589                | 14+658            |
| R <sub>8</sub> =399  | 15+065                | 15+599            |
| R <sub>9</sub> =1050 | 16+286                | 16+319            |
| R <sub>10</sub> =800 | 16+477                | 16+508            |
| R <sub>11</sub> =800 | 16+759                | 16+960            |
| R <sub>12</sub> =700 | 17+591                | 17+865            |

filosunda 8 adet Alstom treni yani 32 Alstom aracı bulunmaktadır. Bir trende ise üç farklı araç tipi bulunmaktadır. Bu araçlar:

- MC: Motorlu kabinli
- M: Motorlu
- T: Taşıyıcı araç

olarak isimlendirilir ve bu araçların MC – M – T – MC şeklinde dizilmeleri ile bir tren meydana gelmiş olur. Araçların birbirinden ayrılarak işletmede kullanılması mümkün değildir. Ancak iki tren birleşerek 8'li dizi olarak serviste kullanılabilir. Tek tek araçların ve komple bir trenin ağırlık ve taşıyabileceği maksimum yolcu sayılarına ilişkin tablo aşağıdaki gibidir. Burada AW0, AW1, AW2 ve AW3 şeklinde yük değerleri görülmektedir. Bu tanımlamalar genel bir kabul ile:

- AW0: Araç boş ağırlığı
- AW1: oturan yolcular + m<sup>2</sup> başına 4 kişi
- AW2: oturan yolcular + m<sup>2</sup> başına 6 kişi
- AW3: oturan yolcular + m<sup>2</sup> başına 8 kişi olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 2.6 : Alstom dokümanından araç yolcu dağılımı**

| Araç    | Yük Durumu | Yoğunluk<br>Kişi / m <sup>2</sup> | Yolcu Sayısı |        |        | Yük (1 kişi = 70 kg) |         |
|---------|------------|-----------------------------------|--------------|--------|--------|----------------------|---------|
|         |            |                                   | Oturan       | Ayakta | Toplam | AWi-<br>AW0          | AWi     |
| Mc      | Oturan     | /                                 | 54           | /      | 54     | 3,780                | 36,436  |
| AW0 =   | AW1        | 4                                 | 54           | 116    | 170    | 11,900               | 44,556  |
| 32,656  | AW2        | 6                                 | 54           | 174    | 228    | 15,960               | 48,616  |
| ± %5    | AW3        | 8                                 | 54           | 232    | 286    | 20,020               | 52,676  |
| T       | Oturan     | /                                 | 60           | /      | 60     | 4,200                | 27,095  |
| AW0 =   | AW1        | 4                                 | 60           | 120    | 180    | 12,600               | 35,495  |
| 22,895  | AW2        | 6                                 | 60           | 180    | 240    | 16,800               | 39,695  |
| ± %5    | AW3        | 8                                 | 60           | 240    | 300    | 21,000               | 43,895  |
| M       | Oturan     | /                                 | 60           | /      | 60     | 4,200                | 27,095  |
| AW0 =   | AW1        | 4                                 | 60           | 120    | 180    | 12,600               | 35,495  |
| 32,286  | AW2        | 6                                 | 60           | 180    | 240    | 16,800               | 39,695  |
| ± %5    | AW3        | 8                                 | 60           | 240    | 300    | 21,000               | 43,895  |
| McTMMc  | Oturan     | /                                 | 228          | /      | 228    | 15,960               | 136,453 |
| AW0 =   | AW1        | 4                                 | 228          | 472    | 700    | 49,000               | 169,493 |
| 120,493 | AW2        | 6                                 | 228          | 708    | 936    | 65,520               | 186,013 |
| ± %5    | AW3        | 8                                 | 228          | 944    | 1,172  | 82,040               | 202,533 |

Trenler maksimum 80 km/saat hıza ulaşabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Maksimum hızlanma ivmesi 1 m/s<sup>2</sup> iken maksimum yavaşlama ivmesi ise 1.1 m/s<sup>2</sup> dir. Bu verilere ilişkin grafikler şekil Ek A.1 ve Ek A.2 de görülmektedir.

Bu şekilde AW2 yükü ile %3 lük eğime kadar olan bölgelerde tren 80 km/saat hıza 39.8 saniyede ulaşabilmektedir. Yolcu konforu etkin birimi olan jerk değeri de maksimum 1 m/s<sup>3</sup> tür. Bu değerler ile tren yükü, tren hareket eğrilerinin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Tren karakteristiğine ilişkin kimi bilgiler çizelge 2.7’de görülmektedir.

### 2.3 İstanbul Metrosu Enerji Hattı

İstanbul Metrosu tüm sistem olarak iki ayrı TEAŞ noktasından beslenmektedir. Bu

**Çizelge 2.7 : Tren karakteristiği.**

| Araç özelliği                      | Değer                |
|------------------------------------|----------------------|
| Başlangıç İvmesi (36 km/h a kadar) | 1.0 m/s <sup>2</sup> |
| 80 km/h a ulaşma süresi            | 39.8 sn              |
| Adezyon seviyesi                   | %15                  |
| Frenleme İvmesi                    | 1.1 m/s <sup>2</sup> |
| Jerk değeri                        | 1.0 m/s <sup>3</sup> |
| Rezidüal İvme (80 km/h ta)         | 0.2 m/s <sup>2</sup> |

noktalardan gelen 34.5 kV luk besleme 750 V DC gerilime dönüştürülerek hat boyunca üçüncü ray denilen sistemi vasıtası ile taşınarak araçlara iletilir.

İstanbul Metrosu hattı enerji bakımından üç bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler Zone1, Zone 2 ve Zone3 olarak isimlendirilmiştir. Zone'ların kesiştikleri kısımlar arasında kalan bölgeye ise kupon bölgesi denilmektedir. Tüm zonelar bu kupon bölgeleri ile birbirlerine bağlanmışlardır. Bu açıdan tüm hat kısa devredir. Bu yapılacak çalışmada bize şu faydayı sağlamaktadır. Taksim1 istasyonuna doğru frenlemeye geçen bir aracın üreteceği rejeneratif enerjisi, 4.Levent1 istasyonundan kalkışa geçen bir diğer tren kullanabilecektir. Rejeneratif enerjinin hatta bir trenden diğerine aktarılması ise şu şekilde olmaktadır. Frenlemeye geçen tren enerji üretmektedir.

Tren öncelik olarak ürettiği enerjiyi hatta geri vermeyi isteyecektir fakat bunun gerçekleşmesi için hattın bu enerjiyi talep etmesi gerekir. Bu da basit elektrik kuralı gereğince hat geriliminin araç geriliminden düşük olması ile olabilir. Hat geriliminin araç geriliminden düşük olması için aynı anda aynı hatta hızlanan yay enerji talep eden bir başka trenin olması ile mümkündür. Eğer bu şartlar salanabiliyorsa üretilen rejeneratif enerji hatta geri verilerek bir başka tren tarafından bu enerjinin kullanılması sağlanır. Eğer aynı anda hatta bu enerjiyi talep eden başka bir tren bulunmazsa üretilen enerji frenlemeye geçen aracın fren rezistörlerinde yakılarak ısıya dönüşür ve kaybolur.

2008 yılında metro araçlarında km başına harcanan enerji miktarları aşağıdadır.

**Çizelge 2.8 : 2008 yılı tüketilen enerji miktarları.**

| DÖNEM           | ENERJİ BİLGİLERİ         |                  |                                     |
|-----------------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|
|                 | ELEKTRİK SARFIYATI (kwh) | Toplam Kilometre | 1 Trenin Ortalama Tüketimi (kwh/km) |
| <b>Oca.08</b>   | 1.691.424,00             | 84.892,00        | 7,7705                              |
| <b>Şub.08</b>   | 1.682.532,00             | 80.133,00        | 8,1887                              |
| <b>Mar.08</b>   | 1.694.640,00             | 84.495,00        | 7,8219                              |
| <b>Nis.08</b>   | 1.609.752,00             | 83.144,00        | 7,5508                              |
| <b>May.08</b>   | 1.495.627,00             | 84.526,00        | 6,9008                              |
| <b>Haz.08</b>   | 1.662.030,00             | 82.169,00        | 7,885                               |
| <b>Tem.08</b>   | 1.987.164,00             | 79.249,00        | 9,7792                              |
| <b>Ağu.08</b>   | 2.035.560,00             | 81.217,00        | 9,7747                              |
| <b>Eyl.08</b>   | 1.578.252,00             | 81.855,00        | 7,5196                              |
| <b>Eki.08</b>   | 2.062.848,00             | 84.230,00        | 9,5514                              |
| <b>Kas.08</b>   | 1.643.676,00             | 81.657,00        | 7,8503                              |
| <b>Ara.08</b>   | 2.013.432,00             | 79.906,00        | 9,827                               |
| <b>Ortalama</b> |                          |                  | 8,368325                            |

## 2.4 İstanbul Metrosu Yolcu Dağılımı

İstanbul metrosunda 2008 yılında aylara göre taşınan yolcu sayıları aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 2.9 : 2008 yılı taşınan yolcu sayıları.**

| DÖNEM           | YOLCU SAYILARI |           |           |            |
|-----------------|----------------|-----------|-----------|------------|
|                 | Hafta içi      | Cumartesi | Pazar     | Toplam     |
| <b>Oca.08</b>   | 4.007.333      | 763.544   | 379.520   | 5.150.397  |
| <b>Şub.08</b>   | 4.123.037      | 627.193   | 391.219   | 5.141.449  |
| <b>Mar.08</b>   | 4.100.032      | 817.847   | 507.398   | 5.425.277  |
| <b>Nis.08</b>   | 4.071.164      | 550.991   | 375.400   | 4.997.555  |
| <b>May.08</b>   | 3.863.668      | 759.660   | 377.182   | 5.000.510  |
| <b>Haz.08</b>   | 3.756.554      | 510.389   | 441.218   | 4.708.161  |
| <b>Tem.08</b>   | 3.794.620      | 470.447   | 331.658   | 4.596.725  |
| <b>Ağu.08</b>   | 3.135.632      | 531.459   | 370.093   | 4.037.184  |
| <b>Eyl.08</b>   | 3.336.541      | 550.745   | 330.337   | 4.217.623  |
| <b>Eki.08</b>   | 4.102.924      | 582.563   | 366.371   | 5.051.858  |
| <b>Kas.08</b>   | 3.077.808      | 445.849   | 302.961   | 3.826.618  |
| <b>Ara.08</b>   | 3.918.137      | 532.746   | 354.636   | 4.805.519  |
| <b>Ortalama</b> | 3.773.954      | 595.286   | 377.333   | 4.746.573  |
| <b>Toplam</b>   | 45.287.450     | 7.143.433 | 4.527.993 | 56.958.876 |

Bu veriler toplam turnikeden geçiş sayılarıdır. Bu değerlerin yapılan toplam sefer sayılarına bölünmesiye sefer başına düşen yolcu sayısı bulunmuştur. Bu şekilde



ortalama olarak trenlerin kaç kişi ile seferlerini gerçekleştirdiği belirlenmeye çalışılmıştır. Bu değer sefer sürelerinin planlanmasında bir etkidir. Çünkü bu şekilde sefer minimum süreleri ve TAS (Trenler Arası Süre) planlanmaktadır.

**Çizelge 2.10 : 2008 yılı sefer sayıları.**

| DÖNEM           | Sefer Sayısı |           |        |         |
|-----------------|--------------|-----------|--------|---------|
|                 | Hafta içi    | Cumartesi | Pazar  | Toplam  |
| <b>Oca.08</b>   | 8.920        | 1.420     | 1.097  | 11.437  |
| <b>Şub.08</b>   | 8.261        | 1.425     | 1.096  | 10.782  |
| <b>Mar.08</b>   | 8.424        | 1.966     | 1.860  | 12.250  |
| <b>Nis.08</b>   | 8.598        | 1.425     | 1.117  | 11.140  |
| <b>May.08</b>   | 8.618        | 1.787     | 1.096  | 11.501  |
| <b>Haz.08</b>   | 8.246        | 1.424     | 1.392  | 11.062  |
| <b>Tem.08</b>   | 7.833        | 1.424     | 1.105  | 10.362  |
| <b>Ağu.08</b>   | 7.829        | 1.757     | 1.092  | 10.678  |
| <b>Eyl.08</b>   | 8.774        | 1.562     | 1.488  | 11.824  |
| <b>Eki.08</b>   | 8.442        | 1.416     | 1.078  | 10.936  |
| <b>Kas.08</b>   | 7.839        | 1.780     | 1.490  | 11.109  |
| <b>Ara.08</b>   | 8.491        | 1.422     | 1.095  | 11.008  |
| <b>Ortalama</b> | 8.356        | 1.567     | 1.251  | 11.174  |
| <b>Toplam</b>   | 100.275      | 18.808    | 15.006 | 134.089 |

Sefer Başına Düşen Yolcu Sayısı = Toplam Yolcu Sayısı / Sefer Sayısı

2008 yılında taşınan toplam yolcu sayısı 56.958.876 dır. Yapılan toplam sefer sayısı ise (tek yönde) aşağıdaki tablodaki gibidir.

Sefer Başı Ortalama Yolcu Sayısı = 56.958.876 / 134.089

= 425 kişi bulunmuştur.

Sefer başı ortalama yolcu sayısı hafta içi, cumartesi ve pazar günleri için de ayrı ayrı bulunmak istenirse, bu günlerde sırasıyla aylık ortalama 8356, 1567 ve 1251 sefer yapılmaktadır. Buna göre aşağıdaki tablo oluşmaktadır.

**Çizelge 2.11 : Sefer başına ortalama yolcu sayısı.**

| Hafta içi | Cumartesi | Pazar |
|-----------|-----------|-------|
| 452       | 380       | 301   |

İstanbul Metrosu'nda pik saat olarak tanımlanan ve en yoğun yolcunun taşındığı 07:30 – 09:30 saatleri ile akşam 17:00 – 20:15 saatleri arasındır. Bu saatlerde taşınan

yolcu sayıları günün diğer saatlerine göre çok daha fazladır ve toplamda günlük taşınan yolcu sayısının %40'ını oluşturmaktadır. Buna göre:

$$\begin{aligned} \text{Pik Saatlerde Sefer Başına Taşınan Yolcu Sayısı} &= 3.773.954 * 0,6 / 3079 \\ &= 735 \end{aligned}$$

olarak bulunmaktadır. Bu değer de toplamda AW1 ve AW2 yükleri arasında yer almaktadır. İstasyonlar arası geçiş süreleri bulunurken pik saatlerde AW2 yükü, diğer saatlerde ise AW1 yükü ile çalışıldığı düşünülecektir. Buna göre 6 tren çalıştığı durumlarda trenler AW2 yükü ile çalışırken; serviste 5, 4 ve 3 trenin çalıştığı aralıklar AW1 yüküne göre hesaplamaya alınacaktır.

## 2.5 İstanbul Metrosu İşletmesi

İstanbul Metrosu'nda TAS yolcu yoğunluğuna göre 4.5, 5.5, 7.5, 9 ve 12 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süreler toplam tur zamanı olan 26-28 dakikanın hatta çalışan tren sayısına bölünmesiyle elde edilmiştir.

**Çizelge 2.12 : Hattaki tren sayısına göre tren aralığı değişimi.**

|                     |    |   |     |     |     |
|---------------------|----|---|-----|-----|-----|
| Hattaki Tren Sayısı | 2  | 3 | 4   | 5   | 6   |
| TAS(dk)             | 12 | 9 | 7.5 | 5.5 | 4.5 |

İstasyon bekleme süresi olarak bilinen ve istasyonlarda yolcu indirip bindirmek için harcanan süre ise 30 saniyeler civarındadır. Bu sürenin kesin bir değeri yoktur. Trenin gecikme veya hızlı gitme durumuna göre azaltılıp arttırılabilir. İstasyonlardaki yolcu yoğunluklarına göre ortalama değerler şu şekildedir.

**Çizelge 2.13 : İstasyon yolcu indirme bindirme süreleri (pik saatte).**

|                 |                   |                |                   |                 |                    |
|-----------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| <b>Taksim 1</b> | <b>Osmanbey 1</b> | <b>Şişli 1</b> | <b>G.tepe 1</b>   | <b>Levent 1</b> | <b>4. Levent 1</b> |
| 50              | 25                | 30             | 15                | 15              | 35                 |
| <b>Levent 2</b> | <b>G.tepe 2</b>   | <b>Şişli 2</b> | <b>Osmanbey 2</b> | <b>Taksim 2</b> |                    |
| 15              | 15                | 30             | 25                | 50              |                    |

**Çizelge 2.14 : İstasyon yolcu indirme bindirme süreleri (diğer saatlerde).**

|                 |                   |                |                   |                 |                    |
|-----------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| <b>Taksim 1</b> | <b>Osmanbey 1</b> | <b>Şişli 1</b> | <b>G.tepe 1</b>   | <b>Levent 1</b> | <b>4. Levent 1</b> |
| 50              | 20                | 25             | 10                | 10              | 75                 |
| <b>Levent 2</b> | <b>G.tepe 2</b>   | <b>Şişli 2</b> | <b>Osmanbey 2</b> | <b>Taksim 2</b> |                    |
| 10              | 10                | 25             | 20                | 50              |                    |

İşletmede zaman kısıtına neden olan iki faktör ise: Taksim’de gerçekleştirilen kuyruk hattı manevrası ile 4. Levent-Levent arası tek yol işletmeciliğidir. Kuyruk hattı manevrası (Trenin Taksim2 den kalkıpTaksim1 e gelmesi için geçen süre) yaklaşık 3 dakika civarındadır. Bu süre manevrayı yapan makinistin seri davranmasıyla 2.5 dakikaya indirilebilir. Ama genelde sabit, 3 dakikalık bir süredir.

Günlük tren planı ise şu şekilde işlemektedir. Sabah 05:45’te süpürücü tren olarak isimlendirilen iki trenden birisi Hat-1 diğeri de Hat-2 den olmak üzere 4. Levent yönüne hareket ederler. Bu trenlerden birisi 4.Levent’te kalırken diğeri tren Taksim’e geri döner ve taksim ve 4.Levent’ten iki tren karşılıklı olarak 06:15 te hareket ederek yolculu seferlere başlarlar. Bundan sonra tren arttırımı ve azaltımı şu şekilde işler:

**Çizelge 2.15 : Günlük işletme.**

| Saat  | Manevra                              |
|-------|--------------------------------------|
| 06:24 | Taksim'den 3. tren servise katılır.  |
| 07:14 | Taksim'den 4. tren servise katılır.  |
| 07:22 | Taksim'den 5. tren servise katılır.  |
| 07:31 | Taksim'den 6. tren servise katılır.  |
| 09:30 | Taksim'de 6. tren servisten çekilir. |
| 17:00 | Taksim'den 6. tren servise katılır.  |
| 20:15 | Taksim'de 6. tren servisten çekilir. |
| 21:15 | Taksim'de 5. tren servisten çekilir. |
| 22:35 | Taksim'de 4. tren servisten çekilir. |
| 00:52 | Taksim'de 3. tren servisten çekilir. |



### 3. RAILSİM

RailSim demiryolu araçları için özel olarak hazırlanmış bir simülayon programıdır. Bu çalışmada Railsim programının TPC (Train Performance Calculator) özelliğinden faydalanılmıştır. Railsim, TPC uygulaması ile performans karakteristiği belirlenen bir tren ile geometrisi belirlenen bir hat üzerinde test sürüşleri yapmaya imkan sağlamaktadır. Test sürüşleri isteğe bağlı olarak değişik koşullar altında tekrarlanabilmektedir. Test sürüşlerine geçmeden önce hat geometrisi ve araç karakteristiğine ilişkin bilgilerin TPC'ye tanıtılması gerekmektedir. Bu da aşağıda anlatıldığı şekilde TPC için özel olarak hazırlanmış bir excel veri dosyasının oluşturulması aşamasını kapsamaktadır.

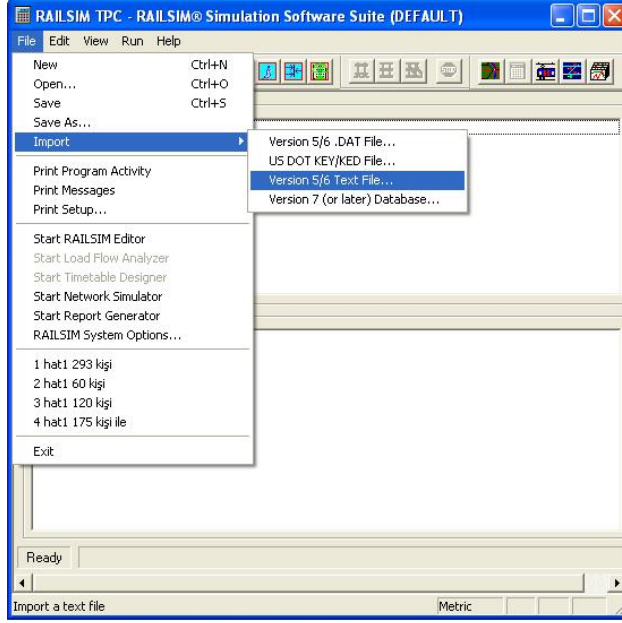
Bu dosya yazılımın hesaplamalarında hat bilgilerini doğrudan kullanabileceği özel formüller ve tablolarla oluşturulmuş hazır bir şablonu içermektedir. Dosyaya sırası ile:

- Hat başlangıç – bitiş kilometreleri
- Hat eğim değerleri ve eğimin başlangıç bitiş kilometreleri
- Hat kurp yarıçapları ve kurpun başlangıç – bitiş kilometreleri
- Hat istasyon isimleri ile istasyonların başlangıç – bitiş kilometreleri
- Hattaki hız limitleri ve bu limitlerin başlangıç – bitiş kilometreleri
- Hat tipi

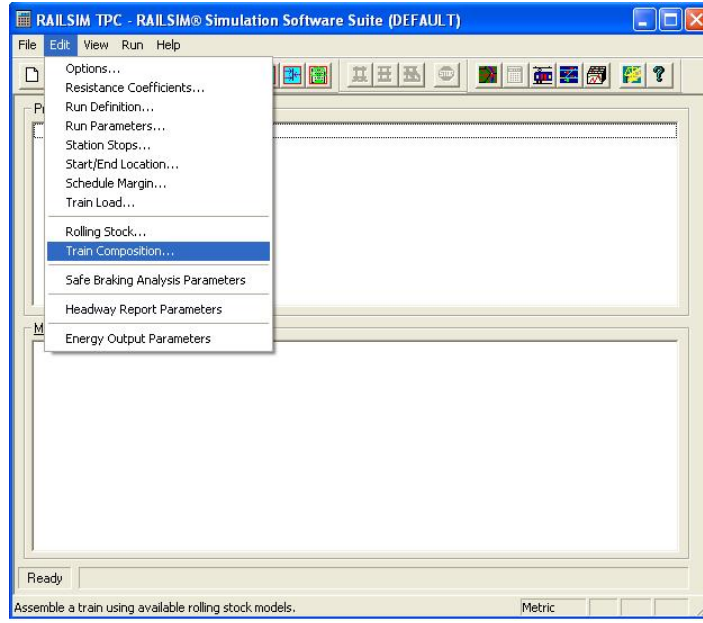
verilerinin girilmesi gerekmektedir. Bu dosya her iki hat için de ayrı ayrı hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan dosya verileri programın tanıyacağı şekilde text formatına getirilmiştir. Hazırlanan dosya aşağıda görüldüğü üzere “import et” komutu ile programa aktarılmıştır.

Artık üzerinde tren koşturulabilecek bir hat programa tanıtıldıktan sonra araca ilişkin karakteristik bilgiler girilerek Alstom treni programa tanıtılmıştır.

Bu aşamadan sonra test sürüşlerine yani simülasyonlara geçilebilmektedir.



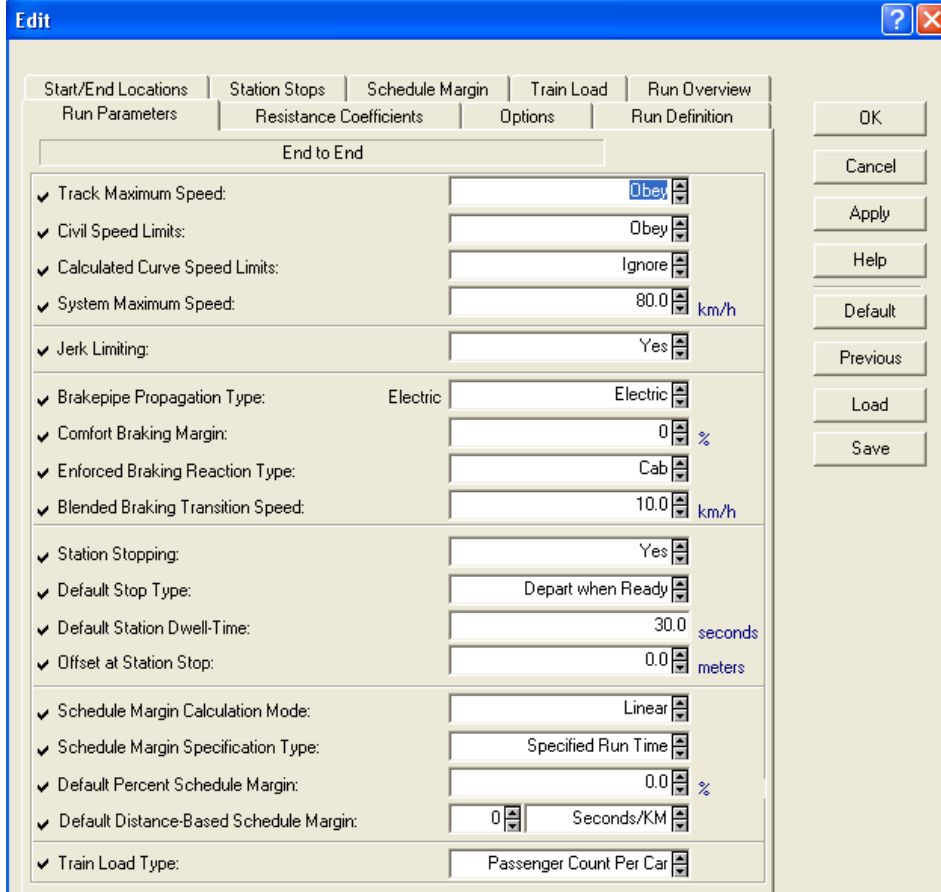
Şekil 3.1 : Programa dosyanın atılması.



Şekil 3.2 : Tren seçilmesi.

Simülasyonlar istenen yolcu yükü, istasyon bekleme süreleri, istasyon geçiş süreleri gibi verilerin programa girilmesi ile sayısız değişik koşulda tekrarlanabilmektedir. Bu seçenekler programın menüsünden ulaşılan pencere ile istenilen değerlerin girilmesiyle belirlenir.

Şekil 3.3'teki menü yardımıyla, yolcu konforu için belirlenen jerk değerinin göz önünde bulundurulup bulundurulmayacağı, simülasyonun başlangıç bitiş

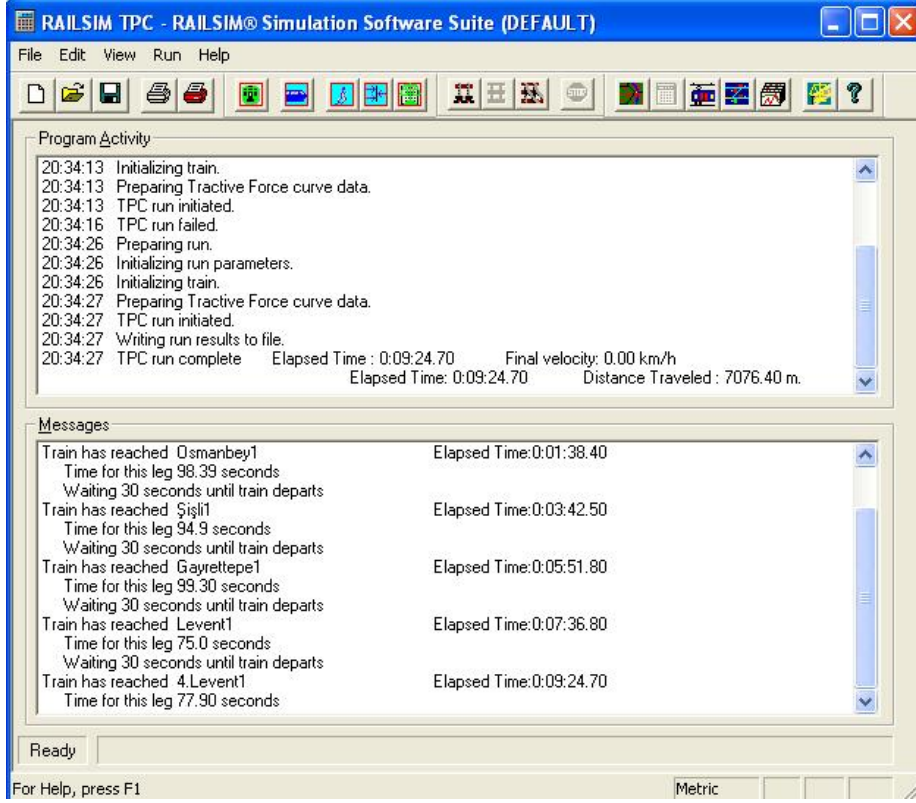


**Şekil 3.3 : Sürüş Parametrelerinin Belirlenmesi.**

istasyonlarının seçimi, istasyon bekleme sürelerinin her istasyon için değişik değerlerde atanması yapılacağı gibi; istenirse maksimum hız limitinin daha düşük seviyelere çekilmesi opsiyonları da uygulanabilmektedir. Genel anlamda bu seçeneklerle geniş bir hareket alanı sağlanmaktadır.

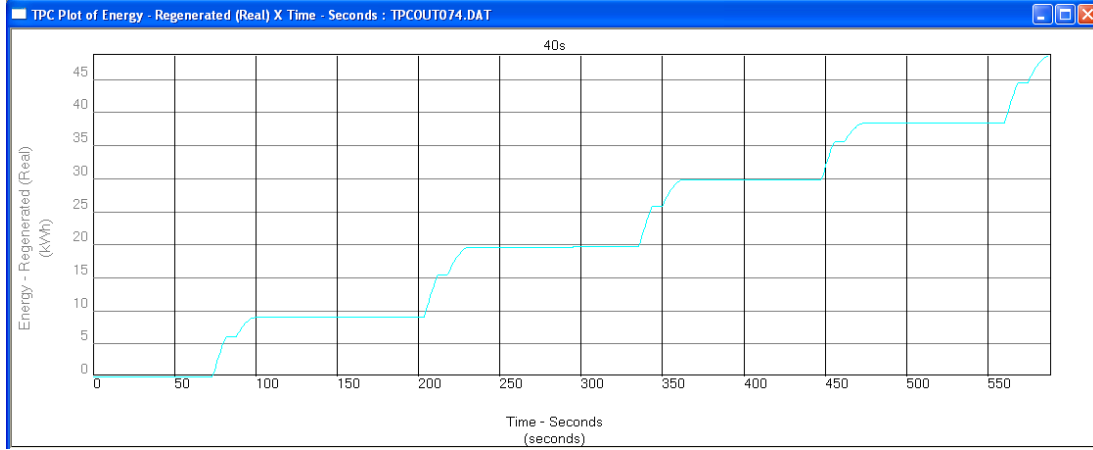
Tüm seçimler yapıldıktan sonra program koşturulduğunda şekil 3.4'te görüldüğü üzere tüm istasyon geçiş ve bekleme sürelerini içeren bir ekranda sonuçlar izlenebilmektedir. Buradan istasyonlar arası geçiş süreleri, trenin toplam tur süresi, tüm istasyonlardan ayrı ayrı kalkış zamanı, istasyonlardaki bekleme süreleri görülebilmektedir. Eğer tren belirlenen süreler dahilinde istasyonlar arasını katedemiyorsa program hata vermekte ve bu şekilde tren performansının belirlenen özellikleri sağlayamadığı anlaşılmaktadır.

Simülasyon gerçekleştirildikten sonra raporlar menüsünden elde edilebilecek grafiklerle sonuçların nasıl olduğu takip edilebilmektedir. Bu grafikler ivme, hız, zaman, üretilen rejeneratif enerji, mesafe gibi verilerin eksenler için ayrı ayrı seçilmesiyle çok değişik şekillerde belirlenebilmektedir.



Şekil 3.4 : Programda simülasyon.

Aşağıdaki örnek grafikte bir simülasyonda üretilen rejeneratif enerjinin zamana bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 3.5 : Üretilen rejeneratif enerji – zaman eğrisi.

### 3.1 İstasyonlar Arası Geçiş Sürelerinin Belirlenmesi

İstasyonlar arası geçiş sürelerinin belirlenmesi, oluşturulacak zaman çizelgesini şekillendirecek ana unsurlardan birisidir. Çünkü araç performansının izin verdiği süreler göre planlamaya gidilecektir. Bu süreler istasyonlar arası mesafeler, hat



geometrisi, araç yükü ve tren performansına göre değişmektedir. Bu değerlere göre geçiş süreleri için minimum süreler belirlenmiştir. Bu minimum sürelerden bir kısmı Alstom dokümanlarından sağlanmış bir kısmı da yapılan simülasyonlar ile bulunmuştur.

İstasyon geçiş sürelerinin maksimum değerleri için de bir üst limit bulunmaktadır. Bu limiti belirleyene seçilecek tren aralığı süreleri olacaktır. Hatta çalışacak tren sayısına göre belirlenen tren aralığı süreleri maksimum süre için kısıttır.

Program koşturulmadan önce istenen yolcu yükü miktarı ve istasyonlar arası geçiş süresi programa girilerek trenin bu süre içerisinde belirlenen güzergahı katedip katedemediği görülmüş ve minimum süreler bu şekilde belirlenmiştir. Bu simülasyonlar yapılırken jerk değeri de göz önünde bulundurulmuştur. Bu şekilde yolcu konforu da göz ardı edilmemiştir.

### 3.1.1 AW1 yükü için belirlenen istasyon geçiş süreleri

Simülasyonda ilk olarak araç başı yolcu sayısı 60 kişi seçilmiştir. Bu rakam sadece koltukların dolu olduğu durumu ifade etmektedir. Bu durumda minimum istasyon geçiş süreleri saniye biriminde Hat-1 ve Hat-2 için aşağıdaki şekilde oluşmuştur.

**Çizelge 3.1 : Araç başı 60 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.**

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1–4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 98.79             | 94.99            | 99.6                | 75.3             | 100               |
|             | <b>4Lev1–Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
| <b>Hat2</b> | 120               | 73.49            | 100                 | 95.1             | 97.8              |

Çizelge 3.2 de araç başı 120 kişi ile yapılan simülasyon sonuçları görülmektedir. 4Lev1-Lev2 istasyon geçişinin Çizelge 3.1 ile aynı değerde olduğu görülmektedir. Bu sürenin aynı olması bu bölgedeki makastan ötürü bulunan hız limitinden kaynaklanmaktadır.

Hız limiti yolcu sayısından bağımsız olarak zaten hız değerini 30 km/h in üstüne çıkmasını engellemektedir. Diğer sürelerde ise 1-2 saniye civarında artışlar olduğu görülmüştür.

**Çizelge 3.2 :** Araç başı 120 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1–4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 99.49             | 96.39            | 100.3               | 76.1             | 101               |
|             | <b>4Lev1–Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
| <b>Hat2</b> | 120               | 74.19            | 100.6               | 96               | 98.7              |

Çizelge 3.3 te de araç başı 175 kişi ile yapılan simülasyon sonuçları görülmektedir. AW1 (m<sup>2</sup> başına 4 kişi) yükü için dokümanlarda verilen yolcu yükü sayısı bu değerdir. Araç başı 175 kişilik yolcu yükünde Gayrettepe ve Levent harici bölgelerde istasyonlar arası minimum geçiş süresinin 100 saniyeler civarında olduğu görülmektedir. Gayrettepe ve Levent arasında ise süre 75 saniyelere düşmektedir. Bunun sebebi diğer bölgelerde iki istasyon arası mesafe 1600 metreler civarında iken Gayrettepe Levent arasında bu mesafenin 1200 metre olmasıdır. 4Lev1–Lev2 arasındaki özel durum ise bir önceki paragrafta belirtildiği üzere değişmeden devam etmektedir.

**Çizelge 3.3 :** Araç başı 175 kişi ile minimum istasyon geçiş süreleri.

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1–4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 100.59            | 97.99            | 101.2               | 77.4             | 102               |
|             | <b>4Lev1–Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
| <b>Hat2</b> | 120               | 75.9             | 101.5               | 97               | 99.7              |

### 3.1.2 AW2 yükü için belirlenen istasyon geçiş süreleri

Alstom dokümanlarında AW2 (m<sup>2</sup> başına 6 kişi) yükü için belirlenen değerler araç başı 235 kişi olduğu görülmüştür. Bu değerle yapılan simülasyonda çizelge 3.4 teki tablo elde edilmiştir. Gayrettepe Levent arası minimum geçiş süreleri 80 saniyeye yaklaşırken diğer bölgelerde de sürelerin 105 saniyeye doğru ilerledikleri görülmüştür.

Alstom dokümanlarından AW2 yükü için elde edilen minimum geçiş süreleri de çizelge 3.5 te verilmiştir. TPC ile elde edilen verilerle dokümandan alınan verilerin

birbirine çok yakın oldukları görülmüştür.

**Çizelge 3.4 :** Araç başı 235 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1-4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 102.9             | 99.79            | 102.4               | 78.9             | 101.6             |
| <b>Hat2</b> | <b>4Lev1-Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
|             | 120               | 76.29            | 102.6               | 98.3             | 100.8             |

**Çizelge 3.5 :** AW2 yükü için Alstom dokümanlarından elde edilen veriler.

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1-4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 103               | 98.1             | 100.9               | 78               | 104               |
| <b>Hat2</b> | <b>4Lev1-Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
|             | 120               | 76               | 101.4               | 97.4             | 101               |

### 3.1.3 AW3 yükü için belirlenen istasyon geçiş süreleri

**Çizelge 3.6 :** Araç başı 293 kişi ile minimum istasyon arası geçiş süreleri.

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1-4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 103.79            | 101.79           | 103.5               | 80.5             | 105               |
| <b>Hat2</b> | <b>4Lev1-Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
|             | 120               | 77.29            | 103.6               | 99.7             | 101.9             |

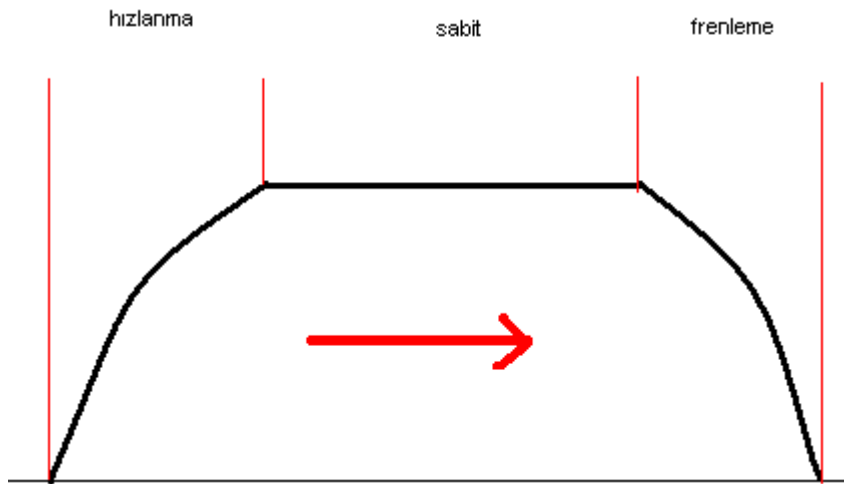
Alstom dokümanlarında AW3 (m<sup>2</sup> başına 8 kişi) yükü için belirlenen değer araç başı 293 kişidir. Bu değer artık aracın tam kapasite ile çalıştığı yolcu yükü anlamında kullanılmaktadır. Bu tablo sadece pik saatler için geçerli olabilecek bir tablodur. Bir önceki çizelgedeki gibi AW3 yükü için yapılan simülasyonda da Alstom dokümanından alınan verilere çok yakın değerler elde edilmiştir.

**Çizelge 3.7 :** AW3 yükü için Alstom dokümanlarından elde edilen veriler.

|             | Tak1–Osm1  | Osm1–Şiş1 | Şiş1–G.tepe1 | Gyr1–Lev1 | Lev1–4lev1 |
|-------------|------------|-----------|--------------|-----------|------------|
| <b>Hat1</b> | 104.5      | 99.8      | 101.8        | 79.1      | 105.7      |
|             | 4Lev1–Lev2 | Lev2 Gyr2 | Gyr2–Şiş2    | Şiş2–Osm2 | Osm2–Tak2  |
| <b>Hat2</b> | 120        | 76.9      | 102.4        | 98.6      | 101.9      |

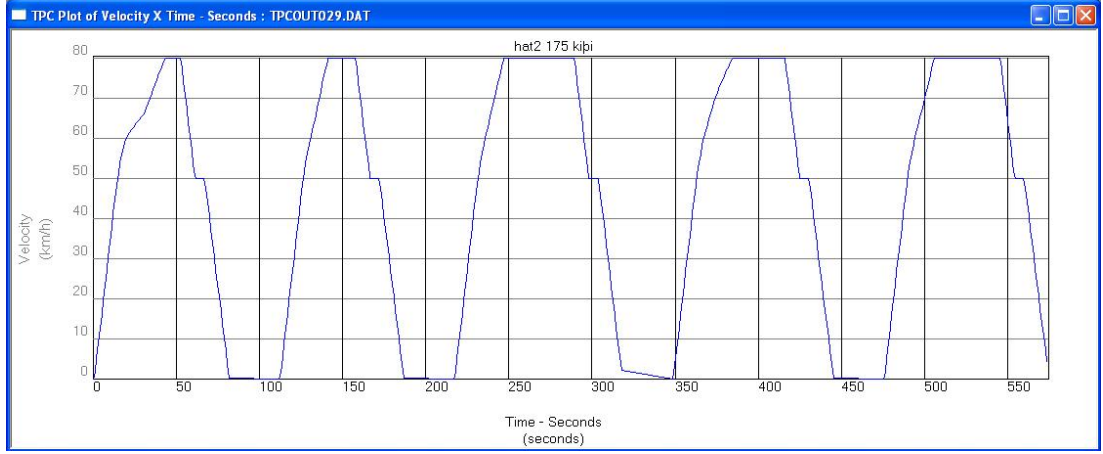
### 3.2 Sefer Çizelgesi Hazırlanırken İzlenen Yöntem

Bir metro aracının iki istasyon arası izlediği yol en basit biçimde üç bölümde incelenebilir. Bunlar ivmelenme, sabit durum ve frenleme olarak isimlendirilebilir. Aşağıdaki şekil bu hareketi ana hatları ile özetlemektedir.



**Şekil 3.6 :** Genel hareket şeması.

Bu prensip ana hatlarıyla istasyon mesafelerinin 1-2 km civarında ve tren maksimum hız seviyelerinin 80-100 km/saat düzeyinde olduğu tüm metro sistemlerinde geçerlidir. Alstom dokümanlarından elde edilen bilgilerle Alstom treninin maksimum hız olan 80 km/saate erişebilmesi için 39.6 saniyeye ihtiyacı olduğunu bilmekteyiz. Eğer tren yine de yolcu yükü ve eğim dolayısıyla 80 km/saate ulaşamazsa 40 saniye dolaylarında ivmelenme konumunda kalmaktadır. RailSim ile yapılan simülasyon grafiklerinde de tüm istasyon geçiş sürelerinde hızlanma süresi 40 saniyeye yakın değerler olarak ölçülmüştür. Bundan dolayı 80 km/h için tüm bölgelerde hızlanma süresinin 40 saniye olarak kabul edilebileceği görülmüştür.



**Şekil 3.7 :** Hat boyu hız zaman grafiği.

Frenleme süresi de grafiklerden görüldüğü üzere 27 – 33 saniye arasında değişmektedir. İstasyonlara ve sefer sürelerinin uzunluğuna göre bu sürenin değişimi yine bu aralıktaki hareketini korumaktadır. Bunun için frenleme süresi de genel bir kabul ile 30 saniye olarak tanımlanmıştır.

Sabit bölge denilen süre ise en değişken aralığa sahip kısım olarak görülmektedir. Değişen sefer sürelerine göre RailSim ile tekrar simülasyon yapılarak bu süre için de gerçek değerlere ulaşılmıştır.

Üstteki tren hareket süreci grafiğinin dışında üzerinde değişiklikler yapılarak çizelge hazırlanma aşamasında kullanılabilir son süre ise istasyonlardaki bekleme süresidir. Rejeneratif enerjinin geri kazanımı için çizelgelemede kullanılacak ve üzerinde değişiklik yapılabilecek en uygun zaman aralığı da yine istasyon bekleme süreleridir. Bu süreler trenler arasında uygun koordinasyon sağlanacak şekilde seçilerek trenlerin kalkış ve frenleme süreleri birbirleri ile kesiştirilebilmektedir.

Genel kabul ile metro hatlarında istasyonlardaki bekleme süreleri 30 saniye civarındadır. Fakat bu süre istasyondan istasyona, istasyondaki yolcu yoğunluğu ve hareketine ve hattaki trenlerin durumuna göre değişmektedir. İstanbul metrosunda da kimi istasyonlarda bu süre 10 saniyelere kadar düşebilirken Şişli gibi yolcu hareketinin yoğun olduğu istasyonlarda 30 saniyelerin altına nadiren düşmektedir.

Çizelgeleme işlemi yapılırken istasyonun gerçek durumuna göre istasyon bekleme sürelerinin üzerine yedek zaman aralığı denilen süreler eklenmekte ve bu süreler genellikle ana kalkış istasyonlarında harcanmaktadır. Bu sürelerin eklenmesinin sebebi ise bir arıza veya istenmeyen durumda kaybedilen zamandan ötürü serviste

oluşabilecek aksamaların önüne geçmektir. Rejeneratif enerjiye yönelik çizelgelemede hem uygun tur zamanının aşmadan hem de tren sıklığına etki etmeden bu yedek zaman aralılarında istifade edilebilmektedir.

Tüm bu süreler dahilinde ana amaç trenlerin hızlanma ve frenleme anlarını birbirlerine denk düşürerek rejeneratif frenlemeden kazanılan enerjinin maksimum oranda kullanılmasıdır.

## 4. JAVA DİLİNDE SİMÜLASYONUN HAZIRLANMASI

### 4.1 Java Programlama Dili ile Simülasyonun Yazılması

Bölüm 3.2’de verilen genel tren hareketi çerçevesinde rejeneratif enerjinin kullanım oranının belirlenebileceği algoritma Java ile yazılmıştır. Algoritma ile hareket süreci dört safha olacak şekilde modellenmiştir. Hareket sürecine ilişkin tüm tanım, kısıt, optimizasyon ve diğer özellikler aşağıda tek tek açıklanmıştır. Bütün tanımlama, kısıt ve analizler zaman değeri üzerinden yapılmıştır.

Yazılım iki ayrı seçenekte simülasyona olanak verecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Birincisi hareket süreci safhaları değerlerinin tek tek kullanıcı tarafından girilerek oluşturulduğu simülasyon ortamı, ikincisi ise programın hareket süreci için belirlenen aralıklar dahilinde gelişigüzel değerler atamasıyla elde edilen simülasyonlardır. Random test aşamasında program verilen aralıktaki değerleri düzgün dağılıma uyacak şekilde atamaktadır.

#### 4.1.1 Tanımlamalar

##### 4.1.1.1 Tren hareket süreci

Programda tren hareket süreci dört bölümde tanımlanmıştır. Bunlar:

- Hızlanma: Hızlanma Süresi
- Sabit: Durağan Bölge Süresi
- Yavaşlama: Yavaşlama Bölgesi
- Beklemede: İstasyondaki Bekleme Süresi

olarak isimlendirilmiştir. Hızlanma süresi trenin istasyon kalkışından maksimum hıza ulaştığı ana kadar geçen süredir. Sabit tanımı ile verilen süre ise maksimum hıza ulaştıktan sonra bu hızda seyire devam edilen ve/ya boşta gidilen süredir. Frenleme aracın frenlemeye geçerek rejeneratif enerjinin üretildiği ve istasyonda durup yolcuların boşaltılacağı ana kadar geçen zaman dilimidir. Bekleme süresi olaraksa istasyondaki bekleme süreleri tanımlanmıştır.

Simülasyonun temelini bu süreler oluşturmaktadır. Railsim TPC den elde edilen hareket sürelerinin programa elle girilerek simülasyon yapılabilmesinin yanında belirlenecek bir aralık dahilinde gelişigüzel atanan değerler dahilinde de simülasyonlar yapılabilir.

#### **4.1.1.2 Tur zamanı**

Tur zamanı trenin Taksim1 istasyonundan çıkıp 4.Levent2'ye ulaştıktan sonra tekrar Taksim1 istasyonuna gelinceye kadar geçirdiği süredir. Bu süre 27 – 28 dakikalar civarında bir zaman dilimini kapsar. 6 tren çalışılan pik saatlerde 27 dakikalık tur süresi yakalanmaya çalışılırken diğer saatlerde 28 dakika da tur süresi olabilmektedir. TAS değerinin korunabilmesi için hattaki tren sayısına göre bu sürenin korunması gerekmektedir.

#### **4.1.1.3 Kullanılan zaman**

Tren hareket sürecindeki değerler belirlenip program koşturulduğunda hızlanma konumunda olan bir tren ile yavaşlama konumunda olan bir diğer trenin kesiştikleri süreler rejeneratif kullanılan zaman olarak program konsolundaki kayıtlara tek tek düşmektedir. Seçilen simülasyon süresi sona erdiğinde tüm bu süreler toplanarak kullanılan zaman olarak program sonuçlarına yansımaktadır. Yapılmak istenen ana amaç bu sürenin toplam frenleme süresine oranını maksimum düzeyde tutmaktır.

#### **4.1.1.4 Kaybolan zaman**

Ana amaç farklı trenlerin frenleme ve hızlanma aralığındaki koordinasyonu sağlayarak üretien rejeneratif enerjinin maksimum düzeyde kullanımı olsa da kullanılmayarak ısı şeklinde kaybolan rejeneratif enerji de olacaktır. Bu süre de frenleme yapan bir aracın olduğu fakat aynı anda ivmelenen başka bir trenin olmadığı toplam süreyi tanımlamak için kullanılmıştır. konsolun Yani bir başka ifade ile kayıp zamandır. Simülasyon tamamlandığında kullanılan zaman gibi kaybolan zaman da program sonuçlarında görülebilmektedir. Bu iki sürenin toplamı rejeneratif frenlemenin meydana geldiği toplam süreyi vermektedir.

#### **4.1.1.5 İstasyon**

Bu tanım hattaki 12 adet istasyon için kullanılmaktadır. Her iki istasyon arası üstte belirtilen dört safhaya ayrılmıştır. Her istasyon için örneğin Şişli-Hızlanma, Şişli-



Sabit, Şişli-Frenleme ve Şişli-Beklemede olarak dört safha isimlendirilmiştir. Bu dört bölüm için süre verileri ayrı ayrı girilmektedir.

Kuyruk hattı da bir ara istasyon olarak tanımlanmıştır. Kuyruk hattı ile beraber 12 istasyon vardır.

#### **4.1.1.6 Tren sayısı (n)**

Simülasyon sırasında hatta çalıştırılacak olan tren sayısıdır. Tren sayısı seçime bağlıdır. İstenilen tren sayısı ile simülasyon gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde pik saat için ayrı günün diğer saatleri için ayrı sayıda trenlerle farklı denemeler yapılabilmektedir. TAS süresinin hesaplanmasında da hattaki tren sayısı bilgisi kullanılmaktadır.

#### **4.1.1.7 Simülasyon süresi**

Programın koşturulacağı toplam zamandır. Tüm diğer süreler gibi toplam süre de saniye cinsinden belirlenmektedir. Saat \* 60 \* 60 şeklinde toplam süre oluşturulmaktadır. Hatta çalışan tren sayıları günün belli zaman dilimlerinde değiştiği için bu süreler dahilinde program koşturularak daha gerçekçi veriler elde edilebilmektedir.

### **4.1.2 Kısıtlar**

#### **4.1.2.1 Tur zamanı**

Tur zamanının aralığı  $27 \pm 1$  dakika seçilmiştir. Bu şekilde tur zamanında oluşabilecek aşırı artış ve azalmalar ile sefer tarifesinde oluşacak olumsuzluklar önlenmiştir. Bu yolcu konforu için de önemli bir etken olacağından bu kısıt önemlidir. Bu şekilde şu anda uygulanmakta olan 6 tren için 4.5 dakika, 5 tren için 5.5 dakika gibi işletme sıklığı değerleri de korunmuştur.

#### **4.1.2.2 4.Levent – Levent arası tek yol işletmesi**

4.Levent istasyonundan çıkacak tren Levent2'ye gelmeden Levent1'deki tren 4.Levent1'e hareket edememektedir. Bu kısıt tur süresinin 27 dakikalardan daha aşağıya çekilmesini, pik saatlerde TAS'ın 4.5 dakikadan daha aşağıya çekilmesini önlemektedir. Bu da işletme sıklığının arttırılmasına olanak vermemektedir. Tamamen çift hat işletmesi yapılabildiği durumda tren sıklığının yoğun saatlerde 3

dakikaya kadar çekilebilmesine sistem izin verebilmektedir ama bu koşullarda minimum süre 4.5 dakika olabilmektedir.

#### **4.1.2.3 Minimum istasyon bekleme süreleri**

Gerçek zamandan alınan verilere göre hareket edilerek minimum istasyonlar için minimum bekleme süreleri belirlenmiştir. Bu süre Şişli, Taksim, 4.Levent gibi yoğun yolcu sirkülasyonunun olduğu istasyonlarda daha uzunken Gayrettepe, Levent gibi pik saatler dışında nispeten daha az yolcu yoğunluğu olan istasyonlarda daha kısa kalmıştır. Bu süreler tüm istasyonlar için tek tek girilmekte bu da esnek bir çalışma ortamı sağlayarak tüm istasyonlar için özel koşulların belirlenmesine imkan sağlamaktadır.

#### **4.1.2.4 Kuyruk hattı manevrası**

Bu manevra tüm süreçleri ile sabit bir manevradır. Taksim2 istasyonundan hareket ederek kuyruk hattına giren tren, kuyruk hattından dönerek Taksim1 istasyonuna girmektedir. Bu süre yaklaşık olarak 3 dakikadır ve manevra sırasında geçilen makaslarda belli hız limitleri bulunduğundan bu süre üzerinde kısaltma yapmak mümkün değildir.

#### **4.1.3 Optimizasyon**

Hazırlanan programın optimizasyon seçeneği de bulunmaktadır. Bu seçenek sayesinde program devamlı trenlerin hızlanma ve frenleme anlarını gözetleyerek bunları kesiştirmeye çalışmaktadır. Bu kesiştirmeyi yapmaya çalışırken tur süresini en fazla 60 saniye arttıracak kadar süre eklemeleri yaparak rejeneratif koordinasyon sağlamak adına tur süresinin çok fazla artması önlenerek tren sıklıkları muhafaza edilmeye çalışılmıştır.

Optimizasyon iki farklı açıdan gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar sabit süre ve istasyon bekleme sürelerine göre optimizasyondur. İki seçenek de aktif hale getirilebileceği gibi tek tek de seçilebilmektedir.

##### **4.1.3.1 Durağan zamana göre optimizasyon**

Sabit olarak isimlendirilen hızlanma sonrası sürenin kısaltılıp uzatılması ile yapılan optimizasyondur. Hattaki kalkışa geçecek aracın durumuna göre bu süre minimum

değerinin altına inmeyecek şekilde uzatılarak kalkışa geçecek aracın ivmelenme aralığı ile kesiştirilmeye çalışılır.

#### **4.1.3.2 İstasyon bekleme sürelerine göre optimizasyon**

İstasyon bekleme sürelerinin uzatılıp kısaltılması ile elde edilen optimizasyondur. Program hatta frenleme durumuna geçecek diğer bir trenin durumuna göre kalkışa geçecek başka bir trenin kalkışını geciktirme mantığına dayanmaktadır. İstasyon bekleme sürelerine göre yapılan optimizasyonda trenlerin istasyonda bekleme süreleri uzatılıp kısaltılarak kalkışlarının frenlemeye geçecek başka bir trenle kesişmesi sağlanmaktadır.

#### **4.1.4 Analiz**

Programın ana çıktıları kullanılan zaman ve kaybolan zamandır. Bu sürelerle bakılarak simülasyon sonucunda rejeneratif enerjinin geri kazanımına ilişkin bir veri elde edilmektedir. Bununla beraber program sayesinde hangi tren hangi anda nereden ayrılmış veya normal hareket sürecinin hangi safhasında olduğu verilerine de ulaşılabilir.

#### **4.1.5 Programın çalışma şekli**

$t = 0$  anında ilk trenin hatta çıkması ile program koşturmaya başlar. Seçilen tren sayısına göre oluşan tren aralığı zamanını baz alarak, diğer  $n-1$  kadar tren de sırayla hatta çıkar. Trenlerin hatta çıkış süreleri arasında  $28/n$  dakika kadar süre geçmektedir. Bu süre trenler arası süre olarak bilinmektedir. Her kilometre taşı geçildiğinde hattaki trenlerin konumuna ilişkin veriler program hafızasına basılır. Kilometre taşından kastedilen hattaki herhangi bir trenin konumunda olan değişikliktir. Trenlerden herhangi birinin istasyondan kalkışa geçmesi veya sabit geçişten frenleme geçmesi anında yani hareket sürecinde bir aşama değiştiğinde tüm trenlerin o anki konumları çıktılarda görülmektedir. Eğer optimizasyon seçeneklerinden biri veya her ikisi aktif hale getirilirse ve hatta iki veya daha fazla tren varsa trenler birbirlerinin hızlanma ve yavaşlama sürelerini gözetlemeye başlarlar. Bu süreleri yakalamak için istasyon bekleme süreleri ve/ya sabit time sürelerini belirlenen aralıklar dahilinde uzatıp kısaltırlar. Bu işlem yapılırken bir yandan tur zamanı da 28 dakika sınırları içerisinde tutulur. Hızlanma ve yavaşlama sürelerinin kesiştikleri anlarda rejeneratif frenleme adı altında kesişme süreleri programın hafızasına düşer. Simülasyonun sonunda

rejeneratif süreler toplanarak “kullanılan zaman” olarak çıktılarına düşer. Ayrıca kullanılmayarak kaybolan rejeneratif frenleme süresi de “kaybolan zaman” olarak çıktılarda görülebilmektedir. Simülasyon en başta seçilen simülasyon süresi kadar devam eder. Bu süre de programın tüm verileri gibi saniye cinsinden girilir. Süre saat\*60\*60 şeklindeki biçimde saatin seçilmesi ile belirlenir.

#### **4.1.6 Simülasyonlar**

Hazırlanan simülasyon ile değişik koşullar ve aynı koşulda farklı tren sayıları için program koşturularak kullanılan ve kaybolan rejeneratif enerji süreleri bulunmuştur. Ardından optimizasyon ile şartların iyileştirilip iyileştirilemediği kontrol edilmiştir.

Simülasyon gerçekleştirilen koşullar ana başlık altında istasyon geçiş sürelerinin uzatılıp kısaltılmasıyla belirlenmiştir. Yani bölüm 3 te Railsim TPC ile belirlenen minimum istasyon geçiş sürelerinden başlanarak, bu sürelerin düzenli artırılmasına simülasyonlara devam edilmiştir. Yapılan ön çalışmada maksimum oranda rejeneratif enerjinin kullanımı için senkronizasyonu sağlayacak eş sürelerin olumlu sonuç vereceği düşünülerek simülasyon süreleri bu genel bakışla seçilmiştir. İstasyon geçiş sürelerinin içerisindeki hızlanma, durağan bölge ve yavaşlama süreleri de RailSim programından elde edilen grafikler ile belirlenmiştir. Simülasyonla, seçilen istasyon geçiş sürelerine göre, istasyon bekleme süreleri ve hatta çalışan tren sayıları değiştirilerek defalarca koşturulmuştur. Aşağıda yapılan denemeler sonucunda elde edilen başlıklar halinde anlatılmıştır.

##### **4.1.6.1 Tüm istasyon geçiş sürelerinin minimum değerlerine göre**

Hatta 6 trenin bulunduğu ve trenlerin tüm istasyonlar arasında tam gaz seyrederek bölgeleri minimum sürelerde geçtiği durumda istasyon bekleme süreleri eşit 20, 30, 40 ve 50 saniye seçilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

30 saniyelik simülasyonda rejeneratif enerji üretilen sürenin %74 lük bölümünün kullanıldığı görülmüştür. 40 saniyelik bölümde bu oran %65 olmuştur. Süre 20 saniyeye düşürüldüğünde oran %78 olurken 50 saniyeye çıkarıldığında %55'e düşmüştür.

İstasyon bekleme süresi kısaldıkça trenlerin hatta kalma süresi uzamakta bu da hızlanma ve frenleme eğrilerinin kesişme olasılığını yükseltmektedir. İstasyon bekleme süreleri yükseltildikçe buna ters orantılı olarak kullanılan süre düşmektedir.

İstasyonlardaki trenlerin minimum bekleme süreleri ise istasyonun yolcu yoğunluğuna göre değişmektedir. 4.Levent, Taksim, Şişli gibi yoğun istasyonlarda bekleme süresi pik saatlerde 25 saniyenin altına indirilemezken; Gayrettepe ve Levent istasyonlarında bu süre 13 saniyelere kadar düşebilmektedir. Tüm istasyonlar için ayrı ayrı minimum bekleme süreleri göz önüne alınarak tekrar simülasyon gerçekleştirildiğindeyse oran %75 olmuştur. 20 saniye standart bekleme süresi ile minimum bekleme süreleri, tüm istasyon toplamlarında aynı süreye tekabül etse de standart 20 saniye ile sağlanan senkronizasyonun bozulması 3 puanlık düşüşe sebep olmuş olabilir.

#### **4.1.6.2 Tüm istasyon geçişleri sabit 105 saniye durumuna göre**

Taksim – Osmanbey, Osmanbey - Şişli, Şişli – Gayrettepe, Levent – 4.Levent araları 105 saniye, Gayrettepe – Levent arası ise 85 saniye seçilmiştir. Gayrettepe – Levent arası mesafe diğer bölgelere göre daha kısa olduğu için bu süre farklıdır. Bu çalışma süreleri altı, beş, dört tren için koşturulmuştur.

Minimum istasyon bekleme sürelerine göre simülasyonda: altı tren için %75, beş tren için %72, dört tren içinse %78 lik bir kullanım oranı sağlanmıştır.

Hatta çalışan tren sayısı arttıkça hattaki araç yoğunluğunun artacağı ve buna uygun olarak kullanım oranının yükselmesi gerektiği düşünülse de çift tren sayılarında trenler arasında senkronizasyonun sağlanma olasılığının daha yüksek olması 5 ve 4 tren arasındaki bu farka sebep olmuş olabilir.

İstasyondaki bekleme süreleri arttırıldıça yine kullanım oranlarını düşüşe geçmiştir.

#### **4.1.6.3 Tüm istasyon geçişleri sabit 110 saniye durumuna göre**

Taksim – Osmanbey, Osmanbey - Şişli, Şişli – Gayrettepe, Levent – 4.Levent araları 110 saniye, Gayrettepe – Levent arası ise 90 saniye seçilmiştir.

Altı tren çalışıldığı durumda en iyi performans 20 saniyelik bekleme süresinin olduğu durumda elde edilmiştir. Oran %74 olarak bulunmuştur.

Beş tren çalıştırdığıdaysa en olumlu sonuç 25 saniyelik sürede elde edilmiştir. Oran %77 olmuştur.

Dört trenlik seferlerde en olumlu sonuç yine 25 saniyelik istasyon bekleme sürelerinde elde edilmiştir. Oran %65 tir.

#### 4.1.6.4 Rastgele sürelerle deneme

Gerçekte, rejeneratif geri kullanım için çizelgelemeye dikkat edilmediği durumda kazanç oranının hangi seviyelerde olduğunu bulmak ve Rastgele sürelerle denemeler yapabilmek için yazılıma ek bir özellik eklenmiştir. Bu şekilde istasyonlar arası geçiş süreleri tek bir değer değil bir aralık olarak sisteme tanıtılmıştır. Aynı şekilde istasyon bekleme süreleri için de belli bir aralık tanımlanmıştır. Bu aralıklar istasyonlar arası minimum geçiş süreleri ile +20 saniye fazlası aralığına müsaade edecek şekilde belirlenmiştir. Yazılım bu aralıktaki değerleri düzgün dağılıma uygun olacak şekilde atamaktadır. AW1 yükünde çalışılan saatlerde istasyonlar arası geçiş için aşağıdaki süre aralıkları seçilmiştir.

**Çizelge 4.1 : AW1 yük çalışma saatleri için istasyonlar arası geçiş süreleri.**

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1–4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 100 – 120         | 98 - 118         | 101 – 121           | 77 – 97          | 102 – 122         |
| <b>Hat2</b> | <b>4Lev1–Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
|             | 120 – 130         | 76 - 96          | 101 - 121           | 97 – 117         | 99 - 119          |

Program her iki istasyon arası süre için bu aralılarıdaki bir değeri atamaktadır. Program süreleri atarken bir yandan tüm bu süreleri toplayarak toplam tur süresinin 28 dakikayı aşmasını engellemektedir.

İstasyon bekleme süreleri içinse AW1 yükü ile çalışılan saatlerde ortaya çıkan minimum istasyon bekleme sürelerinin üzerine yine +20 saniye tolerans ekleyerek aşağıdaki tabloda ortaya çıkan aralıklar dahilinde süre atamaları yapılmıştır.

Bu seçilen aralıklara göre program defalarca kez koşurulduğunda 100 simülasyonun ortalama değeri olarak 5 tren için: %50; 4 tren için: %35 oranında rejeneratif enerjinin geri kullanım oranlarının elde edildiği görülmüştür.

Bu simülasyon sadece 5 ve 4 tren için denenmiştir. Çünkü AW1 yükü ile çalışılan saatler 5 ve 4 tren çalışan saatlere denk gelmektedir.

Aynı simülasyon AW2 yükü için de gerçekleştirilmiştir. AW2 yükü için de belirlenen istasyon geçiş süresi aralıkları aşağıdaki çizelgedeki gibidir. Aynı şekilde AW2

**Çizelge 4.2 :** AW1 yük çalışma saatleri için istasyon bekleme süreleri.

| <b>Taksim 1</b> | <b>Osmanbey 1</b> | <b>Şişli 1</b> | <b>G.tepe 1</b>   | <b>Levent 1</b> | <b>4. Levent 1</b> |
|-----------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| 30 – 100        | 15 – 30           | 20 - 40        | 10 – 25           | 10 - 25         | 45 – 85            |
| <b>Levent 2</b> | <b>G.tepe 2</b>   | <b>Şişli 2</b> | <b>Osmanbey 2</b> | <b>Taksim 2</b> |                    |
| 10 – 25         | 10 – 25           | 20 - 40        | 15 – 30           | 35 – 70         |                    |

yükünde minimum istasyon geçiş sürelerinin üzerine 20 saniye eklenerek programın gelişigüzel değerler atayacağı aralıklar elde edilmiştir. AW2 yükü ile bu aralıklar dahilinde yapılan denemeler de hatta 6 trenin bulunduğu süreler için yapılmıştır. Çünkü AW2 yükü ile çalışılan aralıklar pik saatler denilen sabah ve akşam saatleridir.

**Çizelge 4.3 :** AW2 yük çalışma saatleri için istasyonlar arası geçiş süreleri.

|             | <b>Tak1–Osm1</b>  | <b>Osm1–Şiş1</b> | <b>Şiş1–G.tepe1</b> | <b>Gyr1–Lev1</b> | <b>Lev1-4lev1</b> |
|-------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Hat1</b> | 103 - 123         | 100 - 120        | 102 – 122           | 79 – 99          | 104 – 124         |
|             | <b>4Lev1-Lev2</b> | <b>Lev2 Gyr2</b> | <b>Gyr2–Şiş2</b>    | <b>Şiş2–Osm2</b> | <b>Osm2–Tak2</b>  |
| <b>Hat2</b> | 115 – 125         | 77 – 97          | 102 – 122           | 98 – 118         | 101 – 121         |

AW2 yükü ile çalışılan saatlerde minimum istasyon bekleme süreleri ile bu sürelerin 20 saniye fazlası ile oluşturulan aralık da istasyon bekleme sürelerinin atanması için kullanılmıştır.

**Çizelge 4.4 :** AW2 yük çalışma saatleri için istasyon bekleme süreleri.

| <b>Taksim 1</b> | <b>Osmanbey 1</b> | <b>Şişli 1</b> | <b>G.tepe 1</b>   | <b>Levent 1</b> | <b>4. Levent 1</b> |
|-----------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| 30 – 80         | 15 – 30           | 20 - 40        | 10 – 25           | 10 – 25         | 35 – 50            |
| <b>Levent 2</b> | <b>G.tepe 2</b>   | <b>Şişli 2</b> | <b>Osmanbey 2</b> | <b>Taksim 2</b> |                    |
| 10 – 25         | 10 – 25           | 20 - 40        | 15 – 30           | 30 – 60         |                    |

AW2 yükü ile altı trenin çalıştığı durumda ise %55 oranında bir geri kazanımın elde edilebileceği görülmüştür.

Rastgele verilerle elde edilen geri kazanım oranları yapılan iyileştirme çalışması ile elde edilen geri kazanım oranlarından yüzde olarak 20 – 40 puan arasında daha düşük olduğu görülmüştür.

#### **4.1.6.5 Hızlanma ve frenleme sürelerinin değiştirilmesi**

Bir sonraki simülasyon denemelerinde hızlanma ve frenleme sürelerinin değişimi ile elde edilebilecek rejeneratif kazançların nasıl değişeceği gözlenmiştir.

İlk denemelerde Alstom metro araçlarının karakteristik özelliklerinden ötürü 80 km/h e ulaşma süresinin 40 saniye ve bu süratten 0 hm/h e düşme süreleri de 30 saniye olduğu görülmüştü. Bu süreler  $1 \text{ m/s}^2$  hızlanma ve  $1.1 \text{ m/s}^2$  frenleme ivmeleri için geçerli sürelerdi. Bu durumda araçların hızlanma ve frenleme ivmeleri düşürülerek hızlanma ve frenleme süreleri uzatılarak yeni denemelere gidilmiştir. Denemeler hızlanma sürelerinin 40 – 45 – 50 saniye ve frenleme sürelerinin 30 – 35 – 40 saniye olması seçenekleriyle ortaya çıkan kombinasyonlara göre farklı tren sayıları için tekrarlanmıştır. Bu denemelerde istasyon bekleme süreleri olarak minimum istasyon bekleme süreleri seçilmiştir. Simülasyon süreleri olaraksa o tren sayısının hatta çalıştığı toplam süre belirlenmiştir.

#### **Hızlanma süresi 40 saniye frenleme süresi 35 saniye durumu**

Hatta 6, 5 ve 4 trenin bulunduğu koşullar için tekrarlanan durumlarda aşağıdaki gibi sonuçlar elde edilmiştir.

6 tren için elde edilen geri kazanım oranı: %70

5 tren için elde edilen geri kazanım oranı: %60

4 tren için elde edilen geri kazanım oranı: %59

#### **Hızlanma süresi 40 saniye frenleme süresi 40 saniye durumu**

Bu koşullar altında 6, 5 ve 4 tren çalıştığı durumlar için simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Yapılan denemelerde 6 tren için %73 lük bir geri kullanım oranı elde edilmiştir.

5 tren için bu oran %72 olarak bulunmuştur.

4 tren içinse %54 lük bir geri kullanım oranı elde edilmiştir. Bu sonuçlar ilk denemeye göre olumlu olsa da optimum sonuca yaklaşamadığı görülmektedir.



### **Hızlanma süresi 45 saniye frenleme süresi 30 saniye durumu**

Bu süreler altında yapılan simülasyon sonuçlarında 6 tren için %86 lık bir geri kazanım oranı elde edilmiştir. Bu oran şimdiye kadar elde edilen en iyi sonuçtur. 6 trenli işletme pik saatlere denk geldiğinden ve bu zaman diliminde istasyon geçiş sürelerinin biraz daha kısa tutulmasında fayda olduğundan 45 saniye hızlanma 30 saniye frenleme seçeneği çok uygun görünmektedir.

5 tren içinse elde edilen oran %80 olmuştur. 5 tren için de bu oran elde edilen en iyi sonuçtur.

4 tren için elde edilen oran %61 olmuştur. 6 ve 5 trende elde edilen senkronizasyon 4 tren için sağlanamamıştır.

### **Hızlanma süresi 45 saniye frenleme süresi 35 saniye durumu**

6 tren için yine %85 gibi yüksek bir oran elde edilmiştir.

5 tren için oran %73 gibi değer olmuştur.

4 tren içinse oran %66 olarak bulunmuştur.

6 tren için 45 saniyelik ivmelenme süresinin olumlu bir süre olduğu son iki denemede görülmektedir. 45 saniyelik hızlanma süresi 6 trenli işletme için uygun koordinasyonun yakalınmasını sağlamıştır.

### **Hızlanma süresi 50 saniye frenleme süresi 30 saniye durumu**

Simülasyon sonuçlarında 6 tren için %72 oranı bulunmuştur.

5 tren için %68

4 tren içinse %61 oranları elde edilmiştir.

### **Hızlanma süresi 50 saniye frenleme süresi 35 saniye durumu**

Frenleme süresi biraz daha arttırıldığında 6 tren için oranın %78 olduğu görülmüştür. Fakat bu süreler dahilinde trenler koştuğunda 6 trenli durumda tur süresinin 28 dakika sınırına dayandığı görülmüştür. Bu derece süre artığı pik satler için olumsuz etkiler oluşturmaktadır.

Aynı koşullarda 5 tren için oran %74 olarak bulunmuştur.

4 tren içinse %63 olmuştur.

Tüm simülasyonlar sonucunda elde edilen kazanımların listesi toplu halde aşağıda görülmektedir.

**Çizelge 4.5 : Simülasyon sonuçlarının toplu listesi**

| Senaryo                            |                                    | Hattaki tren sayısı |   |   | Kazanç Yüzdesi | Km başına enerji tüketimi (kwh) |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|---|---|----------------|---------------------------------|
| İstasyonlar arası geçi süreleri    | İstasyon bekleme süreleri          | 6                   | 5 | 4 |                |                                 |
| Minimum                            | 20                                 | √                   |   |   | 78             | 8.03                            |
| Minimum                            | 30                                 | √                   |   |   | 74             | 8.27                            |
| Minimum                            | 40                                 | √                   |   |   | 65             | 8.83                            |
| Minimum                            | 50                                 | √                   |   |   | 55             | 9.43                            |
| Minimum                            | Her istasyonun minimum değeri      | √                   |   |   | 75             | 8.17                            |
| 105 sn. (G.tepe-Levent 85 sn.)     | Her istasyonun minimum değeri      | √                   |   |   | 75             | 7.41                            |
| 105 sn. (G.tepe-Levent 85 sn.)     | Her istasyonun minimum değeri      |                     | √ |   | 72             | 7.55                            |
| 105 sn. (G.tepe-Levent 85 sn.)     | Her istasyonun minimum değeri      |                     |   | √ | 78             | 7.26                            |
| 110 sn. (G.tepe-Levent 90 sn.)     | 20                                 | √                   |   |   | 74             | 7.45                            |
| 110 sn. (G.tepe-Levent 90 sn.)     | 25                                 |                     | √ |   | 77             | 7.26                            |
| 110 sn. (G.tepe-Levent 90 sn.)     | 25                                 |                     |   | √ | 65             | 7.93                            |
| (Min süre, Min süre + 20s) aralığı | (Min süre, Min Süre + 20s) aralığı | √                   |   |   | 55             | 8.37                            |
| (Min süre, Min süre + 20s) aralığı | (Min süre, Min Süre + 20s) aralığı |                     | √ |   | 50             | 8.37                            |
| (Min süre, Min süre + 20s) aralığı | (Min süre, Min Süre + 20s) aralığı |                     |   | √ | 35             | 8.37                            |
| Hızlanma 40s, frenleme 35s         | Her istasyonun minimum değeri      | √                   |   |   | 70             | 8.21                            |
| Hızlanma 40s, frenleme 35s         | Her istasyonun minimum değeri      |                     | √ |   | 60             | 8.75                            |
| Hızlanma 40s, frenleme 35s         | Her istasyonun minimum değeri      |                     |   | √ | 59             | 8.81                            |
| Hızlanma 40s, frenleme 40s         | Her istasyonun minimum değeri      | √                   |   |   | 73             | 8.54                            |
| Hızlanma 40s, frenleme 40s         | Her istasyonun minimum değeri      |                     | √ |   | 72             | 8.59                            |
| Hızlanma 40s, frenleme 40s         | Her istasyonun minimum değeri      |                     |   | √ | 54             | 9.46                            |
| Hızlanma 45s, frenleme 30s         | Her istasyonun minimum değeri      | √                   |   |   | 86             | 6.94                            |

**Çizelge 4.5:** Simülasyon sonuçlarının toplu listesi (devam)

| Senaryo                         |                               | Hattaki tren sayısı |   |   | Kazanç Yüzdesi | Km başına enerji tüketimi (kwh) |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|---|---|----------------|---------------------------------|
| İstasyonlar arası geçi süreleri | İstasyon bekleme süreleri     | 6                   | 5 | 4 |                |                                 |
| Hızlanma 45s, frenleme 30s      | Her istasyonun minimum değeri |                     | √ |   | 80             | 7.31                            |
| Hızlanma 45s, frenleme 30s      | Her istasyonun minimum değeri |                     |   | √ | 61             | 8.46                            |
| Hızlanma 45s, frenleme 35s      | Her istasyonun minimum değeri | √                   |   |   | 85             | 7.26                            |
| Hızlanma 45s, frenleme 35s      | Her istasyonun minimum değeri |                     | √ |   | 73             | 7.85                            |
| Hızlanma 45s, frenleme 35s      | Her istasyonun minimum değeri |                     |   | √ | 66             | 8.19                            |
| Hızlanma 50s, frenleme 30s      | Her istasyonun minimum değeri | √                   |   |   | 72             | 7.13                            |
| Hızlanma 50s, frenleme 30s      | Her istasyonun minimum değeri |                     | √ |   | 68             | 7.35                            |
| Hızlanma 50s, frenleme 30s      | Her istasyonun minimum değeri |                     |   | √ | 61             | 7.73                            |
| Hızlanma 50s, frenleme 35s      | Her istasyonun minimum değeri | √                   |   |   | 78             | 7.33                            |
| Hızlanma 50s, frenleme 35s      | Her istasyonun minimum değeri |                     | √ |   | 74             | 7.53                            |
| Hızlanma 50s, frenleme 35s      | Her istasyonun minimum değeri |                     |   | √ | 63             | 8.06                            |

#### **4.1.7 Simülasyonla elde edilen en iyi sonucun enerji cinsinden kazanımı**

Yapılan simülasyonlarda farklı tren sayıları için farklı koşullarda optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Hatta 6 tren çalıştığı durumda en iyi sonuç %86 ile hızlanma süresinin 45 saniye frenleme süresinin ise 30 saniye olduğu koşulda elde edilmiştir.

5 tren çalışılan durumda en iyi sonuç %77 ile istasyonlar arası geçiş süresinin 110 saniye ve istasyon bekleme sürelerinin 25 saniye olduğu durumda elde edilmiştir.

4 tren içinse en optimum sonuç olan %78'e 105 saniyelik istasyon geçiş sürelerinde, istasyon bekleme sürelerinin minimum olduğu durumda elde edilmiştir.

Trenlerin bu koşullar altında çalıştırıldığı durumda harcanan enerji miktarlarını belirlemek için yine Railsim TPC kullanılmıştır. Belirlenen optimum işletme şekline göre hareket süreçleri programa girilerek enerji tüketim değerlerine ulaşılmıştır.

Km başına harcanan net cer gücü enerji miktarını belirlemek için de aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

(Harcanan enerji – kazanılan rejeneratif enerji – yardımcı güç için harcanan enerji) /  
Hat uzunluğu

Yardımcı güç için harcanan enerji miktarının her iki istasyon arası genellikle birbirine yakın değerler aldığı ve yaklaşık 6 kwh civarında olduğu bilinmektedir.

##### **4.1.7.1 Altı trenli işletmede km başına harcanan enerji miktarı**

TPC'den Hat-1 ve Hat-2 için elde edilen enerji tüketim grafikleri şekil 4.1 ve 4.2'deki gibi oluşmuştur. Buna göre:

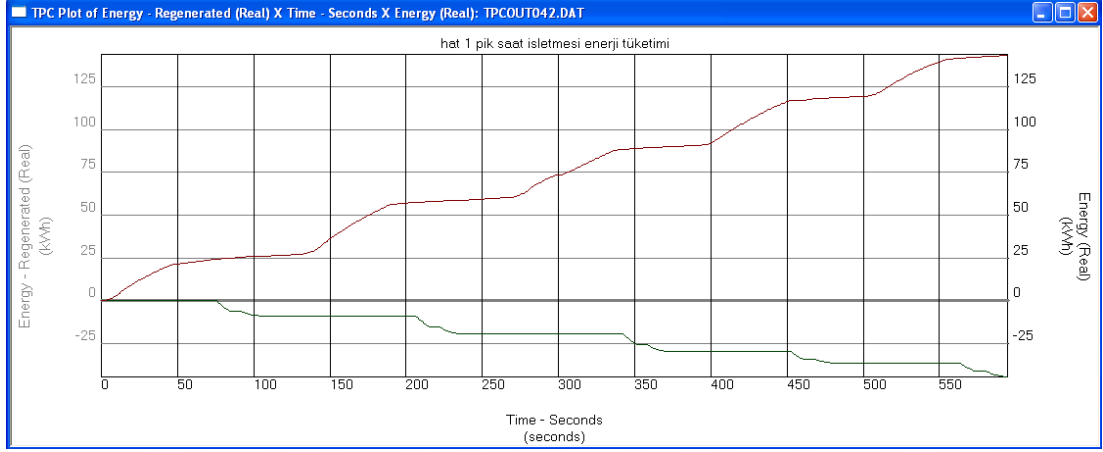
$$\text{Harcanan enerji} = 109.3 + 127.4 = 236.7$$

$$\text{Kazanılan rejeneratif enerji} = (44.3 + 44.1) * 0.86 = 76$$

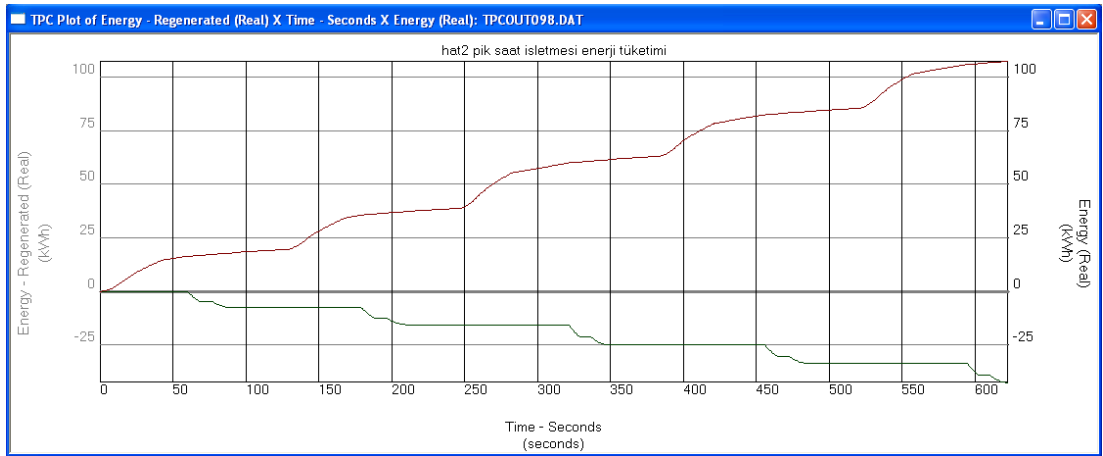
$$\text{Km başına harcanan net enerji} = (236.7 - 76 - 60) / 14.5 = 6.94$$

##### **4.1.7.2 Beş trenli işletmede km başına enerji tüketimi**

5 trenli işletme için belirlenen koşullarda km başına harcanan net enerji miktarı da TPC den elde edilen grafikler doğrultusunda bulunmuştur. Hat-1 ve Hat-2 için elde edilen enerji tüketim miktarlarına ilişkin grafikler şekil 4.3 ve 4.4 te verilmiştir.



**Şekil 4.1 :** Hat-1 pik saat işletmesi enerji tüketimi.



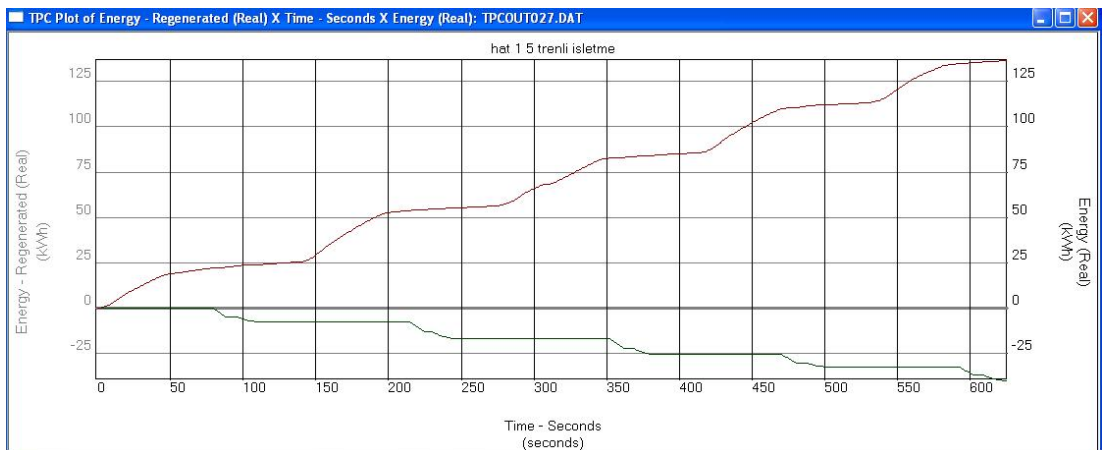
**Şekil 4.2 :** Hat-2 pik saat işletmesi enerji tüketimi.

Harcanan enerji =  $95.63 + 130.4 = 225.33$

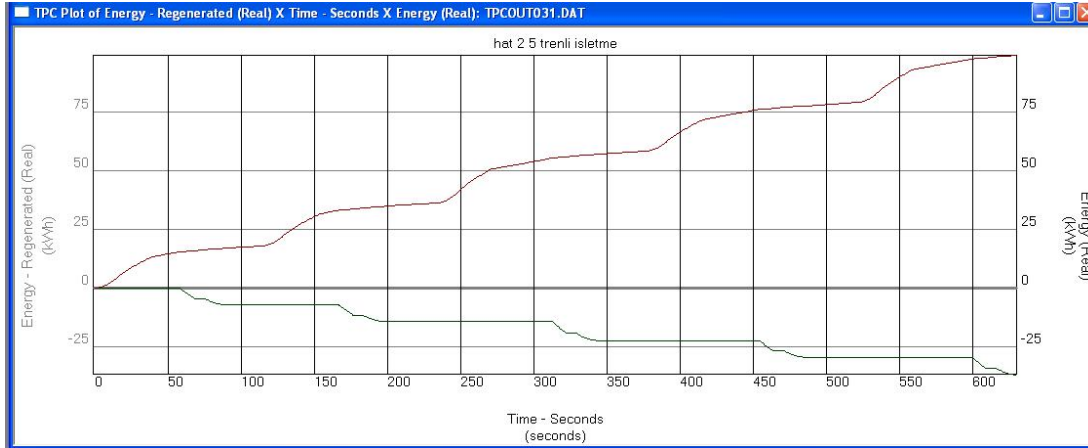
Kullanılan rejeneratif enerji =  $(34.6 + 42.9) * 0.77 = 59.67$

Km başına harcanan net enerji =  $(225.33 - 59.67 - 60) / 14.5 = 7.26$  kwh olmuştur.

**Şekil 4.3 :** 5 trenli işletmede Hat-1 enerji tüketimi

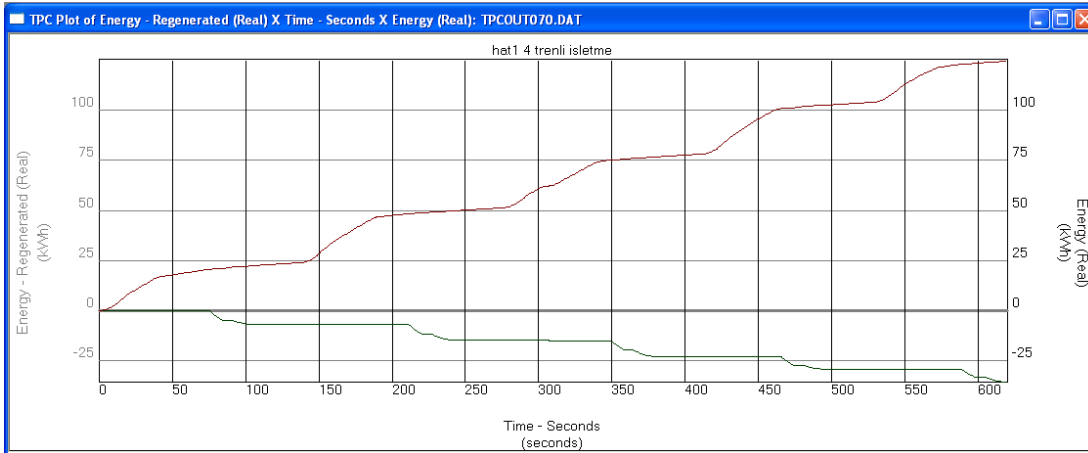


**Şekil 4.4 : 5 trenli işletmede Hat-2 enerji tüketimi**



#### 4.1.7.3 Dört trenli işletmede km başına enerji tüketimi

4 trenli işletmedeki optimum rejeneratif enerjinin kullanıldığı koşul tüm istasyon geçilerinin 105 saniye olarak belirlendiği durumda elde edilmişti. 4 trenli işletmede araç başı yaklaşık 100 kişi ile trenler çalışmaktadır. Buna göre TPC de yapılan simülasyonda elde edilen tüketim şu şekilde olmuştur.



**Şekil 4.5 : 4 trenli işletmede Hat-1 enerji tüketimi.**

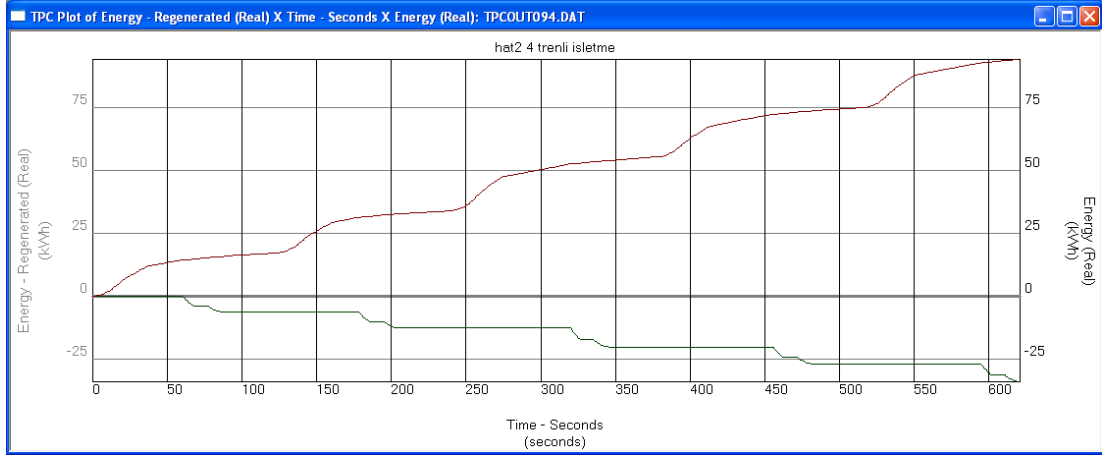
Yukarıdaki grafiklerden elde edilen bilgiler doğrultusunda ve geri kazanım oranının %78 olduğunda 4 trenli işletmede km başına enerji tüketimi aşağıdaki gibi olmuştur.

$$\text{Harcanan enerji} = (95.2 + 125.7) = 220.9$$

$$\text{Kullanılan rejeneratif enerji} = (35.2 + 36.1) * 0.78 = 55.6$$

$$\text{Km başına harcanan net enerji} = (220.9 - 55.6 - 60) / 14.5 = 7.26$$

Günlük yapılan sefer sayılarına göre harcanan ve geri kazanılan enerji miktarlarının



**Şekil 4.6 :** trenli işletmede Hat-2 enerji tüketimi.

çizelgesi Çizelge 2.6 da verilmişti. Bu çizelgeye göre İstanbul metrosunda km başına tüketilen ortalama enerji miktarının 8.37 kwh olduğu bilinmektedir.

Yeni çizelgeler ile İstanbul metrosunda bir haftada yapılacak 6, 5 ve 4 trenli işletme sefer sayıları aşağıdaki tablodaki gibidir. Bu değerler eski sefer sayıları ile çok yakın değerlerdir. Çünkü hizmet kalitesinin sağlanması için simülasyon sırasında TAS'ın değişmemesi sağlanmıştır. Bu da yakın sefer sayıları oluşturmuştur.

**Çizelge 4.6 :** Yapılan haftalık sefer sayıları ve enerji tüketimi.

|                           | 6 trenli<br>işletme | 5 trenli<br>işletme | 4 trenli<br>işletme | Diğer  | TOPLAM  |
|---------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|---------|
| Pazartesi                 | 132                 | 198                 | 32                  | 30     | 392     |
| Salı                      | 132                 | 198                 | 32                  | 30     | 392     |
| Çarşamba                  | 132                 | 198                 | 32                  | 30     | 392     |
| Perşembe                  | 132                 | 198                 | 32                  | 30     | 392     |
| Cuma                      | 132                 | 198                 | 32                  | 30     | 392     |
| Cumartesi                 | -                   | 180                 | 120                 | 50     | 350     |
| Pazar                     | -                   | -                   | 220                 | 62     | 282     |
| Toplam Sefer              | 660                 | 1170                | 500                 | 262    | 2592    |
| Tüketilen<br>Enerji (kwh) | 33.208              | 61.837              | 26.318              | 15.880 | 137.243 |

Bu tabloya göre elde edilen toplam enerji tüketim değeri katedilen toplam kilometre değerine bölünürse oluşturulan yeni işletme şekli ile trenlerin kilometre başına tükettikleri enerji değeri 7.29 kwh olarak bulunur.

Bu sonuçlardan da görüleceği üzere rejeneratif enerjinin optimum miktarda geri kazanılabileceği belirlenen yeni işletme koşullarında eskiye nazaran kilometre başına 1.08 kwh lik bir enerji kazancı sağlanabilecektir. Bu da yüzdeye vurulduğu zaman %12.9 lik bir kazancı sağlanabileceği anlamına gelmektedir.

Bir yıl boyunca yapılacak işlemin bu koşullar altında gerçekleştirilmesiyle

Yıllık toplam km \* km başına ortalama tüketim = 987.473\*1,08 = 1.066.471 kwh kadar enerji geri kazanılmış olacaktır.

Maddi anlamda bunun nasıl bir rakama denk geldiğini görmek istersek bir yılda tüketilen toplam enerjiye bakmak gerektir. 2008 yılı verilerine göre metro araçları bir yılda toplam 987.473 km yol yapmış ve bu sürede 8.265.149 kwh kadar enerji tüketilmiştir.

Yeni çizelge ile çalışılması durumunda ise bu miktar 7.198.678 kwh olacaktır. İki farklı işletme fark ise 1.066.471 kwh'tir.

İşletmede kullanılan elektriğin kwh ücreti 25.500 Ykr olduğu göz önünde bulundurulursa sağlanabilecek maddi kazanç da 271.950 TL dir.

Bu maddi kazancın yanında fren rezistörlerinden açığa çıkan ısının havalandırma sistemlerine ve araç alt sistemlerine olumsuz etkileri de göz önünde bulundurulursa tasarruf ile elde edilecek çevresel ve maddi kazancın daha da yukarılara çıkabileceği bilinmektedir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmaya göre sefer çizelgesi oluşturulması sırasında üç faktörün geri kazanılabilecek rejeneratif enerji üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmektedir.

Hatta çalışan tren sayısı ile doğru orantılı olarak kullanılan rejeneratif enerjinin oranı genellikle artmaktadır. Çünkü hattaki tren sayısı arttıkça trenlerin hızlanma ve frenleme eğrilerinin de kesişme olasılığı artmaktadır. Çalışan tren sayısının artması demek, tren sıklığının artması demek olduğundan trenler arası sürelerin azalması rejeneratif enerjinin kullanım oranının artması anlamına da gelmektedir. Genellikle artmaktadır denilmektedir, çünkü kimi durumlarda daha az sayıda tren ile daha senkron bir yapı yakalanabilmekte ve rejeneratif kazancın az tren ile daha yüksek olabildiği görülmüştür.

İstasyonlar arası uzun bekleme süreleri ise rejeneratif enerjinin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu sürelerdeki artış trenlerin hatta kalma sürelerini azaltmakta ve bu da trenlerin rejeneratif enerji aktarımını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca minimum istasyon bekleme süreleri ile çizelgeleme sağlanarak yolcuların istasyonda beklemeleri yerine nispeten 5-10 saniyelik daha uzun yolculuklar yapması yolcu konforuna daha az etkileyecektir.

Trenler arasında bir senkronizasyon sağlamak kullanım oranını arttıran bir etkidir. Bunun için rast gele veya seferden sefere değişen istasyon geçiş süreleri ve istasyon bekleme süreleri belirlemektense sabit ve olabildiğince eş süreler oluşturmak kullanım oranını arttırmaktadır.

Simülasyonlar sırasında kimi zaman bu senkronizasyonun sağlandığında çok iyi değerlerin ortaya çıktığı görülmüştür. 6 tren çalışıldığı durumda ve frenleme ile hızlanma süreleri de uygun seçildiğinde %86 ya varan geri kazanım oranına ulaşılabildiği görülmüştür.

Hatta 5 trenin çalıştığı durumda ise en uygun sonuç istasyonlar arası geçiş sürelerinin 110 saniye istasyon bekleme sürelerinin ise 25 saniye olduğu durumda %77 lik kazanç oranı ile elde edilmiştir.

4 trenli işletme içinse en iyi kazanç oranı %78 ile 105 saniyelik istasyon geçiş sürelerinde ve yine minimum istasyon bekleme sürelerinde sağlanmıştır.

Farklı tren sayıları için oluşan optimum simülasyon sonuçları arasında çok ciddi bir uçurumun oluşmadığı görülmektedir. Bu da her koşulda sağlanacak uygun çizelgeleme ile yüksek oranlara ulaşılabileceğini göstermektedir.

Yüksek kazancın sağlanabileceği görülen bu yeni çizelge yöntemleri insan kontrolünden ziyade ATC (Automatic Train Control) sistemi içerisinde kontrol edilerek sağlanabilecektir. Belirtilen kazanımların sağlanabilmesi için uygun işletme prosedürünün gömülü kodları ATC Sistemine dahil edilmelidir. Zira her makinistin aynı hassaslık derecesiyle kontrol edemeyeceği sistemde istenen kazanç değerine ulaşmak için otomatik sürüşün bulunması gerekmektedir.

Yapılan çalışma ile uygun çizelgelemenin yapıldığı durumda %12.9'luk bir cer gücü kazancı ile yılda 1.066.471 kwh gibi bir enerji tasarrufunun sağlanabileceği görülmüştür ki bu da 271.950 TL'lik bir maddi kazanç anlamına da gelmektedir.

Rejeneratif enerjinin kullanım oranını arttırmak için tren sefer tarifeleri oluşturulurken istasyon arası bekleme süreleri kısa tutularak istasyon geçiş süreleri ve bekleme süreleri de olabildiğince eşitlenmeye çalışılmalıdır. İstasyon bekleme süreleri belirlenirken maksimum bekleme süresi olan istasyon eş süre olarak seçilmelidir. Bu şartlar altında uygun işletme koşulları oluşturulduğunda enerji kazancının sağlanabileceği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Açıkbaş, S.**, 2008: Çok Hatlı Çok Araçlı Raylı Sistemlerde Enerji Tasarrufuna Yönelik Sürüş Kontrolü, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- Açıkbaş, S. and Söylemez, M.T.**, 2008: Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms. *IET Electric Power Applications*. Vol. **2**, no. 3, pp. 172-182.
- Açıkbaş, S. ve Alataş A.**, 2006: Raylı Sistemlerde Enerji Verimli Sürüş. In Türkiye 10. Enerji Kongresi, 29 Kasım
- Açıkbaş, S. and Söylemez, M.T.**, 2004: Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation, *Computers in Railways IX*, pp. 951–960.
- Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A., and Vimercati, S.**, 1998: Experimental assesement of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *Transactions on Power Delivery*. Vol. **13**, no. 4, pp. 1536-1542.
- Albert, H., Levin, C., Vietrose, E. and Witte, G.**, 1995: Reducing energy consumption in underground systems, September.
- Bocharnikov, Y. V., Tobias, A. M., Roberts, C., Hillmansen, S., and Goodman, C. J.**, 2007: Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. . *IET Electric Power Applications*. Vol. **1**, no. 5, pp. 675-682.
- Chen, J. F., Lin, R. L., and Liu, Y. C.**, 2005: Optimization of an MRT train Schedule: Reducing maximum traction power by using genetic algorithms . *Transactions on Power Systems*. Vol. **20**, no. 3, pp. 1366-1372.
- Foiadelli, F., Roscia, M., and Zaninelli, D.**, 2006: Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems.
- Goodman, C. J., and Siu, L. K.**, 1998: A review of simulation models for railway systems. In International Conference on Developments in Mass Transit Systems, 20–23 April
- Gordon, S.P. and Lehrer, D.G.**, 1998: Coordinated train control and energy management control strategies, *ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, p. 166-176.
- Hong, D., Lee, H., and Kwak, J.**, 2007: Development of a mathematical model of a train in the energy point of view. In International Conference on Control , Automation and Systems, Seoul, Korea, 17–20 October.
- İstanbul Ulaşım A.Ş. Dahili Rapor**, 2006: Kadıköy – Kartal metro hattı enerji tüketiminin 750 VDC ve 1500 VDC durumları için karşılaştırılması.

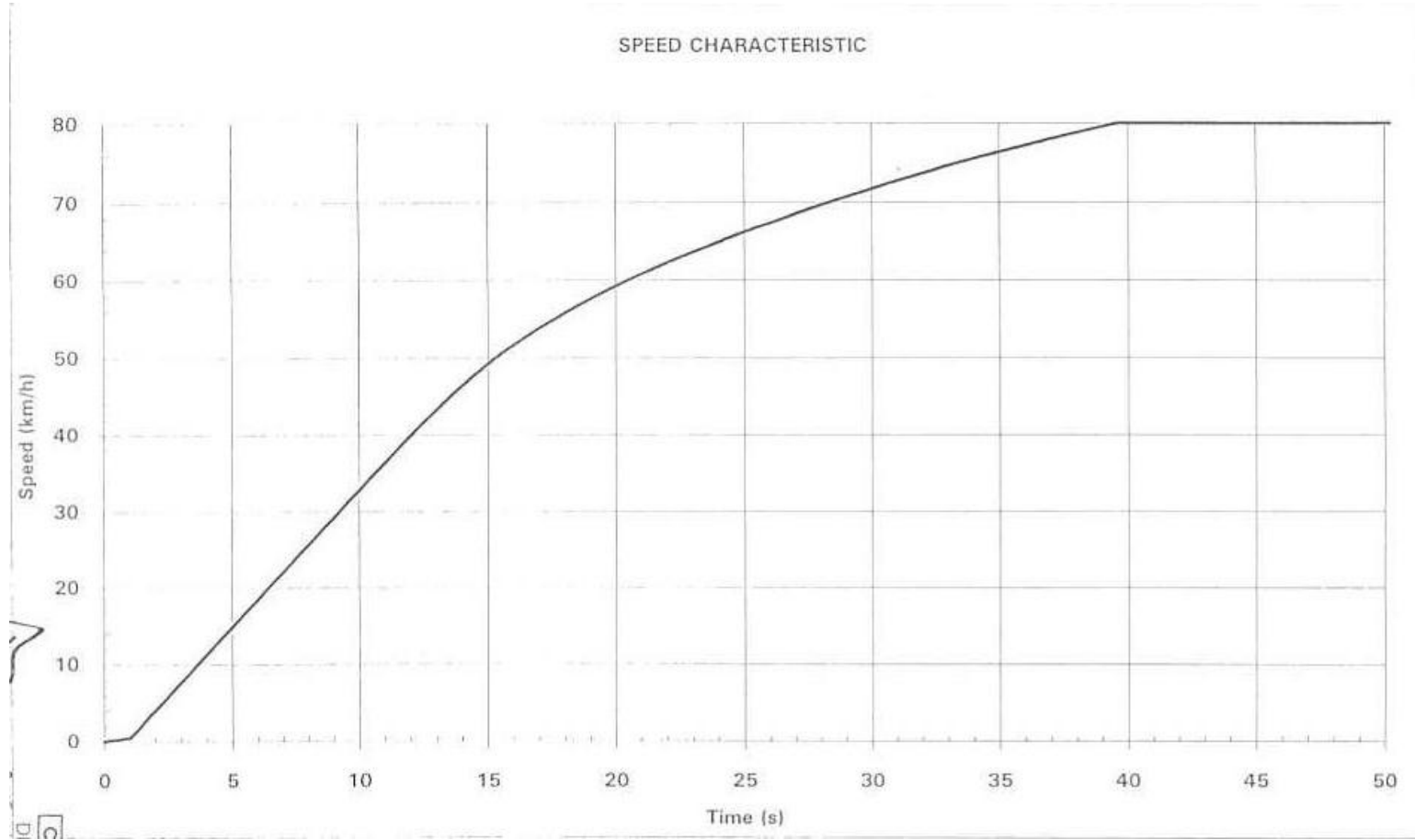
- Jong, J. C., and Chang, E. F.,** 2005: Models for estimating energy consumption of electric trains. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Vol. **6**, pp. 278-291.
- Kavak, K.,** 2005: Dünyada ve Türkiye'de enerji verimliliği ve türk sanayisinde enerji verimliliğinin incelenmesi, iktisadi sektörler ve koordinasyon genel müdürlüğü, Ankara, Turkey.
- Martin, P.,** 1999: Train performance and simulation. In Winter Simulation Conference
- Mizuta, Y.,** 2003: A case study on energy saving and new energy services in Japan. *Management of Environmental Quality*. Vol. **14**, no. 2, pp. 214-220.
- Okada, Y., Koseki, T., and Sone, S.,** 2003: Energy management for regenerative brakes on a DC feeding system. In International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, Tokyo, Japan, 19–22 August.
- Öncül, D. S., Aykaç, D. S. Ö., Bayraktar D. And Çelebi D.,** 2008: A Review of timetabling and resource allocation models for light-rail transportation systems. In International Conference on Prospects for Research in Transport, İstanbul, Turkey, 12 November 2008
- UITP,** 2005: The Cost Of Energy And How To Reduce It, Lisbon.
- Wong, K. K., ve Ho T. K.,** 2004: Dynamic coast control of train movement with generic algorithm. *International Journal of Systems Science*. Vol. **35**, no. 13-14, pp. 835-846.

## **EKLER**

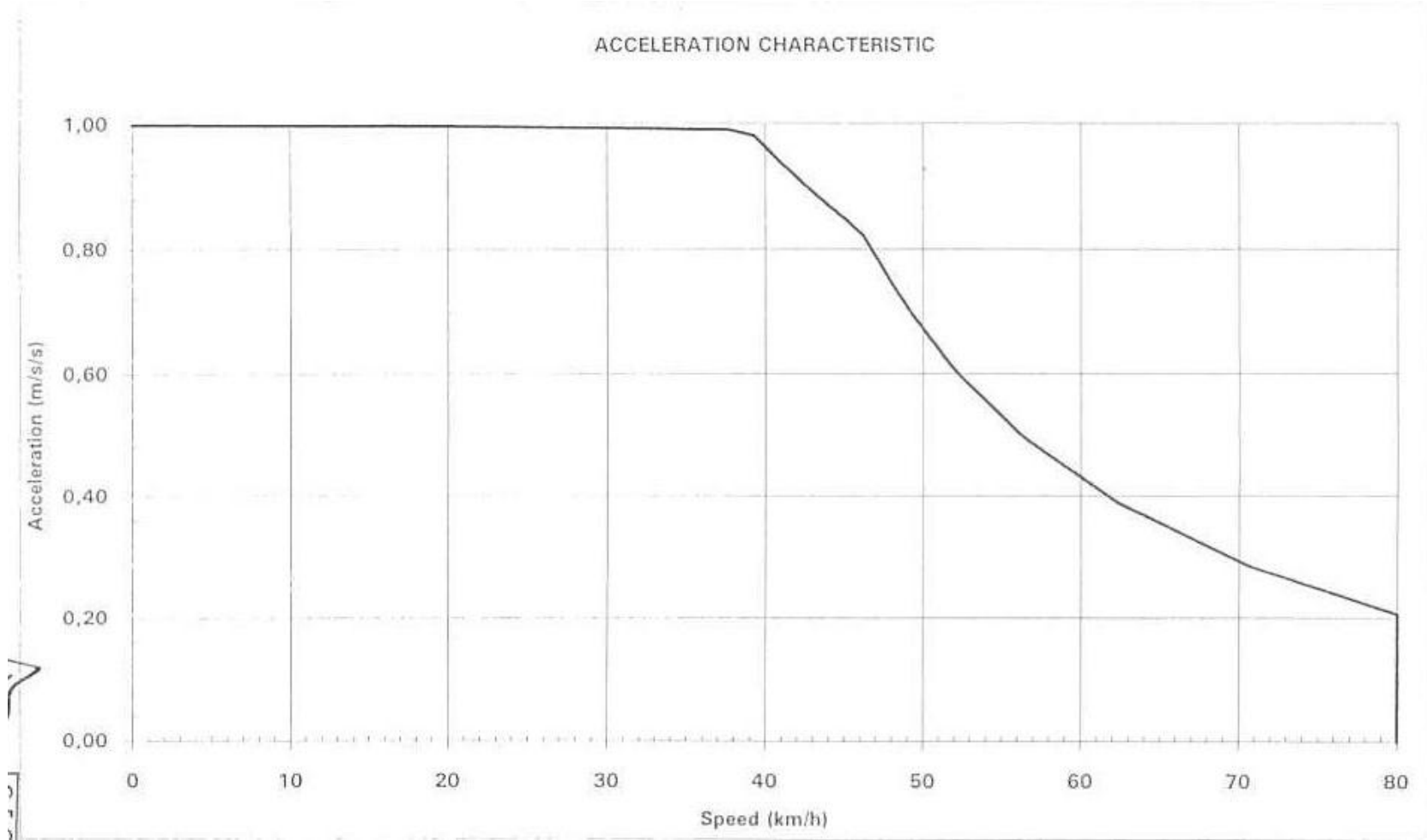
**EK A : Tren Karakteristikleri**



EKA



Şekil A.1 : Alstom aracı hız zaman grafiği



Şekil A.2 : Alstom aracı ivme zaman grafiği



**Çizelge A.1** : Hazırlanan programda istasyon geçiş sürelerinin programa girilmesi

```
Station.Stations[Station.TAKSIMI].waitTime = 60;
Station.Stations[Station.TAKSIMI].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.TAKSIMI].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.TAKSIMI].moveTime = 35;

Station.Stations[Station.OSMNBHEYI].waitTime = 20;
Station.Stations[Station.OSMNBHEYI].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.OSMNBHEYI].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.OSMNBHEYI].moveTime = 35;

Station.Stations[Station.SISLII].waitTime = 25;
Station.Stations[Station.SISLII].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.SISLII].decelerateTime = 35;
Station.Stations[Station.SISLII].moveTime = 35;

Station.Stations[Station.GAYRETI].waitTime = 20;
Station.Stations[Station.GAYRETI].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.GAYRETI].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.GAYRETI].moveTime = 15;

Station.Stations[Station.LEVENTI].waitTime = 15;
Station.Stations[Station.LEVENTI].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.LEVENTI].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.LEVENTI].moveTime = 35;

Station.Stations[Station.LAEVENTI].waitTime = 40;
Station.Stations[Station.LAEVENTI].accelerateTime = 50;
Station.Stations[Station.LAEVENTI].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.LAEVENTI].moveTime = 35;

Station.Stations[Station.LEVENT2].waitTime = 15;
Station.Stations[Station.LEVENT2].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.LEVENT2].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.LEVENT2].moveTime = 15;
Station.Stations[Station.GAYRET2].waitTime = 20;
Station.Stations[Station.GAYRET2].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.GAYRET2].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.GAYRET2].moveTime = 35;

Station.Stations[Station.SISLI2].waitTime = 25;
Station.Stations[Station.SISLI2].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.SISLI2].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.SISLI2].moveTime = 35;

Station.Stations[Station.OSMNBHEY2].waitTime = 20;
Station.Stations[Station.OSMNBHEY2].accelerateTime = 45;
Station.Stations[Station.OSMNBHEY2].decelerateTime = 30;
Station.Stations[Station.OSMNBHEY2].moveTime = 35;
```

```
Station.Stations[Station.TAKSIM2].waitTime = 40;  
Station.Stations[Station.TAKSIM2].accelerateTime = 15;  
Station.Stations[Station.TAKSIM2].decelerateTime = 30;  
Station.Stations[Station.TAKSIM2].moveTime = 10;
```

```
Station.Stations[Station.KUYRUK].waitTime = 75;  
Station.Stations[Station.KUYRUK].accelerateTime = 15;  
Station.Stations[Station.KUYRUK].decelerateTime = 20;  
Station.Stations[Station.KUYRUK].moveTime = 10;
```

**Çizelge A.2 : Simülasyon süresi ve tren sayısının seçim bölümü**

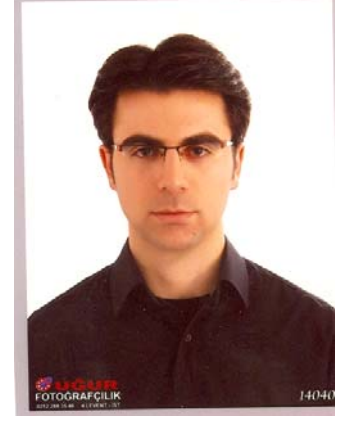
```
Simulation simulation = new Simulation(5); //tren sayisi  
simulation.initialize();  
simulation.run(9* 60 * 60); //simulation time saniye  
simulation.end();  
System.out.println("..... System ended .....");
```

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad: Orhan Ustaoglu**

**Doğum Yeri ve Tarihi: Seydişehir 1983**

**Lisans Üniversitesi: İTÜ Elektronik Mühendisliği**



1983 KONYA Seydişehir doğumlu olan Orhan USTAOĞLU, 2005 yılında İTÜ Elektronik Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. 2006 Eylül ayından beri İstanbul ULAŞIM San. ve Tic A.Ş. de Metro Arıza Revizyon & Periyodik Bakım Atölyesi Şefliği'nde Atölye Mühendisi olarak görev yapmaktadır.