

## KENTSEL ULAŞIM SEKTÖRÜNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ: ULUSLARARASI BİR KARŞILAŞTIRMA

Emine YETİŞKUL, Metin ŞENBİL

**Alındı:** 15.06.2009, **Son Metin:** 04.04.2010

**Anahtar Sözcükler:** kentsel ulaşım; enerji verimliliği; Stokastik Sınır Regresyonu.

Kentsel ulaşım, enerji tüketiminin giderek artan bir ögesidir. Arabalaşma, kentsel yayılma ve yetersiz toplu taşıma, enerji tüketimini artırmanın yanında enerji verimliliğini de olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada kentsel ulaşımında enerji verimliliğine etki eden faktörleri, dünyanın değişik bölgelerindeki 75 kente ait veriler ile Stokastik Sınır Regresyon Modeli kullanarak belirlemeye çalıştık. Genel olarak kentsel yoğunluk hem özel ulaşımında hem de toplu taşımada enerji verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, özel ulaşım için yakıt maliyetleri enerji verimliliğini belirleyen en önemli bağımsız değişken iken toplu taşıma için izli yolların varlığı enerji verimliliğini artırmaktadır. Ancak, gelişmiş ülkelerde toplu taşımanın daha çok enerji harcaması, bu ülkelerdeki kullanım azlığı ile ilgilidir. Sonuç olarak bu çalışma, kentsel ulaşımında enerji verimliliğinin artırılması için uygulanan politikaların özel ulaşım ile toplu taşımanın beraber düşünülerek koordineli uygulanmasını önermektedir.

### GİRİŞ

Son otuz yılda artarak gündeme yerleşen sürdürülebilirlik kaygılarının önemli bir kısmını, çevre kalitesinin bozulması ile biyo-çeşitlilikteki kayıplar, yenilenebilir doğal kaynakların yenilenme hızından daha hızla tüketimi, tehlikeli gazların ve sera etkisi gazlarının salımı, kısaca ekolojik ve doğal dengeyi tehdit eden sorunlar ve küresel ısınma teşkil etmektedir (Meadows vd., 2004; Heinberg, 2006; Diamond, 2005). Bu sorunların kaynaklarını araştırdığımızda karşımıza çıkacak olan önemli insan aktivitelerinden olan ulaşım (daha da özelinde kentçi ulaşım)dir). Trafik sıklığı, hava kirliliği, karbon salımları, vb. problemler gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilirlik kavramı ile farklı derecelerde ilişkilendirilmektedir (Greene, 1997).

Sürdürülebilir ulaşım (enerji tüketiminin verimliliği ve hava kirliliğinin azaltılması, ulaşım güvenliği ve hakkaniyetin sağlanması yanında ulaşım kaynaklı ekonomik sorunların çözülmesi vb.) için bu zamana kadar ortaya

atılan çözüm stratejileri davranışsal, teknik ve yönetim gibi farklı alanlara farklı ağırlıklar vererek çeşitlilik sergilemektedirler (ECMT, 1995). Bu çerçevede en fazla tartışılan çözüm stratejilerinden birisi de arazi kullanımı ile ulaşım arasındaki mevcut ilişkilerden faydalanarak ulaşım talebinin sürdürülebilir ölçeklere taşınmasıdır. Örneğin, derişik kent (*compact city*) formu bu tartışmaların odağında yer almaktadır ve sürdürülebilirliğe katkısı açısından lehte ve aleyhte görüşlerin bir arada bulunduğu yegane örneklerden birisidir (Gordon ve Richardson, 1997; Ewing, 1997, farklı görüşlerinin en tipik karşılaşmasını sergiler).

Arazi kullanım düzenlemeleri ile ulaşım talebinin azaltılması ya da yönlendirilmesi amaçlanırken iç içe geçmiş olan ulaşım kontrol ve talep yönetimi politikaları ile de özel otomobillerin mekan ve zamanda kısıtlanması, solo sürüşlerin azaltılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, toplu taşıma kullanımının artırılması için de çeşitli toplu taşıma destek politikaları oluşturulmaktadır (Elker, 2002). Bu politikalardan başarılı sonuçlar elde etmek için araştırma, yetki, planlama, bütçe ve fon konularının kapsamlı ve uyumlu organizasyonuna ek olarak kritik safhalarda sistem içi geri beslemelerin tesis edilmesi gereklidir. Tüm bunlar disiplinler arası kapsamlı yaklaşımları (bütünleşmiş arazi kullanımı ve ulaşım politikaları gibi) gerektirmektedir (Wilson, 2001).

Diğer yandan trafikte temiz ve verimli enerji tüketen araç sayısının artırılması değişik ve birbirini destekleyen stratejilerin bir arada uygulanması ile mümkündür. Bu stratejilerin odağında yasal düzenlemeler ve teşvikler yatmaktadır (Kesler ve Schroeder, 1995). Ulaşım sisteminin verimli kullanımı ve daha iyi sunumu için bilgi ve iletişim teknolojilerinden faydalanarak geliştirilen akıllı ulaşım sistemleri de enerji verimliliği ile birlikte çevre ve hava kalitesinin iyileşmesine katkıda bulunmak amacıyla kullanılabilir. Ancak, bu tür sistemlerin kurulup kullanılması için bir iletişim ağının halihazırda mevcut olması gerekir. Buna ek olarak da önemli bir miktarda finans ve organizasyon yatırımları gerektirir (Sussmann, 2005).

Yukarıda anlatılanlardan da anlaşılacağı üzere ulaşım sektöründe uygulanan politikaların sonuçları uygulanan duruma (*state dependency*) ve politikaların çeşitliliğine bağlı olarak da bir yerden başka bir yere farklılık (*heterogeneity*) göstermektedir. Bu farklılıkların kaynağını kentin formunda ve arazi kullanımında; kişi davranış ve yaklaşımlarında, hayat tarzlarında aramak gerekmektedir. Ayrıca, uygulandığı yerin organizasyon yapısı ile hukuki ve fiziki altyapısı da bu farklılıkları artırmaktadır (ECMT, 1995; Litman, 2003).

Enerji tüketimi hem yenilenemez kaynakların hızlı tüketiminden (fosil kaynaklar) hem de tüketim sonucu açığa çıkan (CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, vb.) salımlardan dolayı sürdürülebilirlik ile yakından ilgilidir. Bu nedenledir ki enerji tasarrufu ya da verimliliği sürdürülebilirlik ile doğal olarak ilişkilidir. Bu çalışmada yapılmak istenen ulaşım sektöründe enerji tüketimine etki eden makro ölçekli faktörlerin enerji kullanımına olan etkilerini ortaya çıkarmak ve bu etkiler üzerinden enerji verimliliği ile ilgili çıkarsamalar yapmaktır. Bu amaçla çalışmada Stokastik Sınır Regresyon Modeli kullanılarak ulaşım sektöründeki çeşitli enerji tüketimi göstergelerinden hem makro değişkenlerin etkileri hem de enerji verimliliği konusunda sonuçlar çıkarılacaktır.

Çalışmada kullanılan veriler 2000 yılına ait dünyada değişik coğrafyalara dağılmış kentlerin detaylı ulaşım istatistikleridir (UITP, 2001).

Veritabanının hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerdeki kentleri kapsamından dolayı anlamlı karşılaştırmaların yapılabilmesi olanaklıdır.

Genel olarak enerji tüketimi ve verimliliği konusunda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki farklılıklar vardır. Bütün önceliklerin bir kaç on yıla sığdırılmaya çalışıldığı, dolayısı ile hızlı bir ekonomik değişim ve gelişim kaygılarının her şeyin önüne geçtiği gelişmekte olan ülkelerdeki ulaşım sektörü, birbiri ile çelişen politikaları, stratejileri ve uygulamaları ile gelişmiş ülkelerdekinden farklıdır. Örneğin, bizim ülkemizde de olduğu gibi gelişmekte olan ülkelerin kentleri çoğunlukla giderek artan araba sayısını barındıracak altyapıya sahip değildir; bu durum trafik sıkışıklığına ve dolayısı ile uzun süreli gecikmelere neden olmaktadır. Bu durum, gelişmekte olan ülkelerdeki kişi başına veya aile başına düşen araba sayısı, gelişmiş ülkelerdeki sayıdan çok daha az olmasına rağmen ortaya çıkmaktadır (Gakenheimer, 1999; Sperling ve Clausen, 2002; Gwilliam, 2001).

Ayrıca, gelişmekte olan ülkelerin kendilerine özel koşullardan dolayı ortaya çıkan ulaşım türleri de gelişmiş ülkelere göre daha çeşitlidir. Ulaşım türlerinin çeşitliliği, trafikte değişik hız ve manevra kabiliyetinde olan araçların varlığını beraberinde getirmekte, dolayısıyla trafik akışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu da farklı şerit kullanımı gereksinimi doğurmaktadır. Tüm bunlar gözönüne alındığında gelişmekte olan ülkelerin kentlerinde (kişisel) ulaşım sektörü daha az enerji tüketilirken bile tüketimin gelişmiş ülkelerin tüketiminden daha verimli olup olmadığı sorusunu ortaya çıkmaktadır.

Çalışmanın kalan bölümleri şu şekilde planlanmıştır. İkinci bölümde kentsel ulaşım sektörünün enerji ihtiyacı ve enerji tüketimi ile ilgili tespitler yapılacak ve enerji tüketimine etki eden faktörler genel olarak değerlendirilecektir. Üçüncü bölümde enerji verimliliği ve kentsel ulaşım tartışıldıktan sonra dördüncü bölümde bu çalışmada kullanılan veritabanı hakkında bilgi verilecek ve ön analizler sunulacaktır. Beşinci bölümde ise enerji tüketimi ve enerji verimliliğine ilişkin model ve çıkarılan sonuçlar ayrıntılı biçimde incelenecektir. Bu bölümü genel sonuçlar ve tartışma izleyecektir.

## ENERJİ TÜKETİMİ VE KENTSEL ULAŞIM

Kentler, sundukları ekonomik ve sosyal aktiviteler açısından enerji tüketiminin merkezinde yer almaktadırlar. Kentsel enerji tüketiminin merkezinde ise binlerce bağımsız karar vericiye bağlı olan yapılar ve ulaşım yer almaktadır. Örneğin, Londra kentinde toplam enerji tüketiminin %61'i yapılar (ticari yapılar %36, konutlar % 25) için harcanmakta iken, bunu %28 ile ulaşım izlemektedir -ulaşım sektöründe de tüketilen enerjinin % 50'si arabalar tarafından harcanmaktadır; endüstri ise kalan %11'lik kısmı harcamaktadır (Steemers, 2003). Değişik özelliklere sahip binlerce bağımsız karar vericinin olduğu bir ortamda arabalar tarafından harcanan enerjinin azaltılması ya da daha verimli kullanılması mikro ölçekli politikaların yanında belki de daha önemlisi makro ölçekli politikaların uygulanması ile olanaklıdır.

Kentsel enerji harcamaları tablosunda önemli bir yer oluşturan ulaşım sektörünün diğer sektörlerle göre farklılıkları vardır (Steemers, 2003). Ulaşım sektörü, uygulanabilecek politikaların etkileri açısından diğer sektörlerle göre daha hızlı tepki verebilen bir sektördür. Ayrıca meydana gelen kazalar ile trafik sıkışıklığı nedeniyle kaybedilen zamanla ortaya

çıkan ekonomik kayıplar, eşitlik, hakkaniyet ve psikolojik etkiler göz önüne alındığında ulaşım sektörü kent ve ülke gündemini yoğun olarak meşgul etmektedir.

İnsan vücudundaki dolaşım sistemine benzerliği ile öne çıkan bir kentin ulaşım sistemi, en kenar köşesindeki ulaşım sorununu, kentin bütününe kolayca taşıyabilme kapasitesine sahiptir. Bu nedenlerle kentsel ulaşımaya yönelik politikaların etkileri diğer sektörler göre daha hızlı ve etkin bir şekilde ortaya çıkabilmektedir. Bu bir anlamda ulaşım sektöründe mevcut talep esnekliklerinin mutlak değerlerinin yukarıda sayılan diğer sektörler göre genellikle daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, yakıt fiyatı artışının arabalardaki veya ticari işletmelerdeki yakıt tüketimine etkisi incelendiğinde tüketimin birinci lehinde daha fazla azaldığı görülecektir: yakıt maliyetinin artması sonucu araba ile yapılan yolculuklarda azalma meydana gelmesi bir banka şubesinin ısınmasında azalma yapılmasından çok daha kolaydır.

Diğer yandan araba teknolojisi devamlı değişirken genel araba fiyatları da küresel araba üretimindeki artışa bağlı olarak azalmaktadır; böylece daha az yakıt tüketen ve çevreyi daha az kirleten arabalara erişim gün geçtikçe göreceli olarak kolaylaşmaktadır (Gallagher, 2006). Dolayısıyla eldeki araba stoğunun değişimi, binalar ve onların iç mekanlarının değişimine göre daha kolay olmaktadır. Nitekim ülkemiz ulaşım sektöründe de 1992 yılından bu yana Avrupa Birliği'nin ulaşım kaynaklı salım kontrolüne yönelik çıkarmış olduğu Euro standartlarının önemli izdüşümleri olmuştur. Bunun yanında son yıllarda enerji tüketiminde verimliliği esas alan düzenlemelere de gidilmektedir. Ancak enerji verimliliğinde son kullanıcılara her zaman önemli yükümlülükler düşmektedir.

### ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KENTSEL ULAŞIM

Enerji verimliliği bir birim enerji girdisine karşılık gelen kullanılabilir çıktı ya da bir birim kullanılabilir çıktı için gerekli olan enerji şeklinde ölçülebilir (Patterson, 1996; Freeman vd., 1997; Boyd ve Pang, 2000). Patterson (1996) enerji verimliliğini ölçmek için dört grup göstergenin kullanılabileceğini bildirmektedir: 1) termodinamik, 2) fiziksel-termodinamik, 3) ekonomik-termodinamik, 4) ekonomik. Birinci grupta yer alan göstergeler termodinamiğin ilk iki kanunundan türetilmekte olup tamamı ile enerji birimlerinden oluşmaktadır. İkinci ve üçüncü grup göstergeler ise hibrid göstergeler olup, birim enerji başına çıktılar fiziksel ürün (örneğin, araç kilometre, taşınan yolcu vb.) ya da piyasa fiyatları cinsinden ifade ederler. Son grup göstergeler ise üçüncü grup değişkenler gibidir ve enerjiyi de piyasa fiyatları cinsinden ifade ederler.

Bu çalışmanın amacına uygun göstergeler ikinci ve üçüncü grup göstergeler olan hibrid (melez) göstergelerdir. Kullanılabilir göstergeler arasından ülkeler arası karşılaştırmaya olanak veren göstergelere bir örnek olarak birim enerji başına kat edilen mesafe (araç kilometre / enerji birimi) verilebilir. Ancak, bu göstergenin almış olduğu önemli bir eleştiride toplum açısından ulaşımdan beklenenin insanların taşınması olduğundan bir hedef sapması olduğu yönündedir (Collins, 1992; aktaran Patterson, 1996). Buna karşın birim enerji başına taşınan yolcu sayısı da bize salımlar ve mutlak enerji tüketimi hakkında herhangi bir şekilde bilgi vermez. Örneğin, aynı kat edilen mesafede araç bakımının yetersiz olduğu durumda taşınan yolcu sayısının artması ile yolcu sayısı azalırken araç bakımının iyileştirilmesi aynı enerji tüketimine karşılık gelebilir. Ancak

enerji verimliliği açısından birincisi daha anlamlıdır Bu gibi yanılmalara yol açmamak amacıyla çalışmamızda hibrid enerji verimliliği göstergelerini kullanıyoruz.

Kentsel ulaşımında enerji verimliliği doğrudan ya da dolaylı yollarla artırılır. Doğrudan olan yolların en başında araçların enerji kullanımlarını iyileştirmek gelmektedir. Bir aracın enerji verimliliğinde etkin olan unsurlar, aracın tipi, ağırlığı, yaşı ve motor hacmidir. Dolayısı ile doğrudan enerji verimliliği elde edilebilmesi için bu unsurların herhangi birinde ya da (birbirleri ile olan ilişkiler de dikkate alınarak) bir kaçında iyileştirme yapılması gerekmektedir. Dolaylı yollarla iyileştirme ise aracı çevreleyen koşulların değiştirilmesi ile olanaklıdır. Yönetim ve organizasyon yapısındaki düzenlemeler ile kamu taşımacılığında deregülasyon yapılması ekonomik verimlilik açısından olumlu bulunmaktadır (Button ve Costa, 1999; De Borger vd., 2002), ancak bu tür düzenlemelerin enerji verimliliği sağladığına dair herhangi bir bulgu henüz elde edilmemiştir. Genel olarak mevcut yolların bakımının düzenli yapılması, trafik koşullarının ve yol geometrilerinin iyileştirilmesi, toplu taşıma için izli yolların yapılması, durak aralıklarının uygun mesafelerde olması vb. uygulamalar, enerji verimliliğini artıran dolaylı yolların başında gelmektedir.

### ÇALIŞMANIN ARKAPLANI

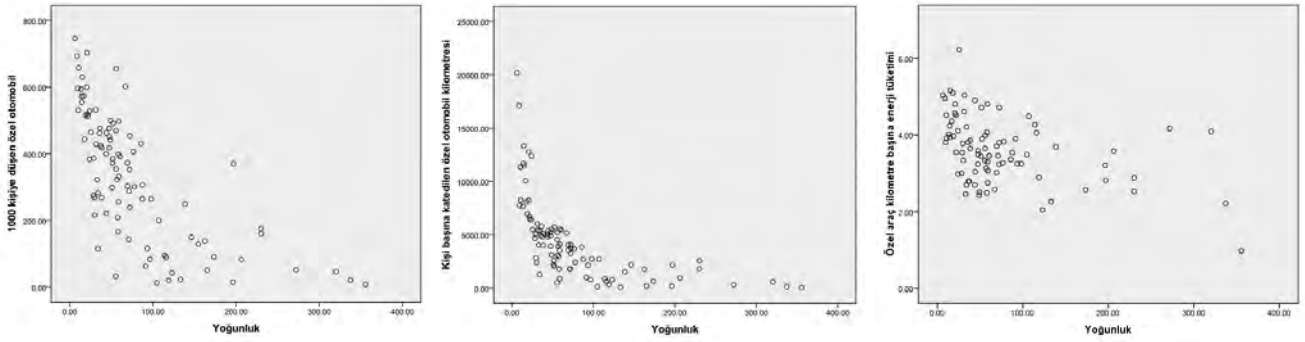
Bu çalışmada kullanılan veriler Milenyum Kentleri veritabanından alınmışlardır. Milenyum Kentleri veritabanı değişik coğrafyalarda bulunan 100 kentin bilgilerinden oluşmuştur (UITP, 2001). Veritabanı demografi, ekonomi ve kent yapısı gibi genel veriler yanında araba sayısı ve ulaşım verimliliği gibi verileri de içermektedir. Bu bölümde veritabanından konumuz ile ilgili seçilen bilgiler sunulacaktır.

Bir kentin enerji tüketimi hakkında bilgi verebilecek en temel veri kentin yoğunluğudur. Uluslar arası karşılaştırmalı çalışmalarda da (örneğin, Kenworthy ve Laube, 1999) yer aldığı gibi kentin yoğunluğu arttıkça araba sahipliğinin ve katedilen mesafenin azaldığı dolayısıyla da enerji verimliliğinin arttığı belirlenmiştir. Milenyum Kentleri veritabanından ürettiğimiz şekillerde de açıkça görüldüğü gibi yoğunluk artışı ile anılan değişkenler arasında negatif ilişki vardır (**Şekil 1a, 1b ve 1c**).

Diğer yandan, makro seviyede kent yoğunluğunun azalması ile gelişen süreç kentsel yayılmadır. Düşük yoğunlukta kentsel gelişme olarak da tanımlanan kentsel yayılmaya ilk ciddi eleştiri, araba bağımlılığına neden olması ve kent merkezindeki yaşanabilir konut alanlarını yok etmesi nedenleriyle 1960'larda gelmiştir (Jacobs, 1993). 1970'lerin başında yayınlanan 'Yayılanın Maliyetleri (*Costs of Sprawl*)' olarak adlandırılan çalışma, her ne kadar sonradan maliyet hesaplamaları konusunda ciddi eleştirilere uğrasa da (*Costs of Sprawl-Revisited*), kentsel yayılma ile ilgili ilk ciddi çalışmadır. Bu çalışmada itiraza yer bırakmayan iki gerçek ise yayılma sonucu ortalama mesafelerin arttığı ve toplu taşımanın yetersiz kaldığı gerçeğidir. Bu gelişme hem enerji tüketimini artırırken tüketimin ana kaynağı olan araba sahipliği ile araba kullanımı da teşvik etmektedir.

Kentsel yayılmanın en yaygın olduğu Kuzey Amerika'yı konu edinen ve kentsel yayılma, araba bağımlılığı ve enerji tüketimi ilişkilerini araştıran iki çalışma (Gordon ve Richardson, 1997 ve Ewing, 1997) bu konudaki karşıt görüşleri en açık biçimde gösteren çalışmalardır. Önceki yayın (Gordon ve Richardson, 1997), bu ilişkilerin olsa bile az olduğunu, sonraki yayın ise kuvvetle varolduğunu savunmaktadır. Kendi özel bağlamında





Şekil 1. Araba Sahipliği, Kat Edilen Mesafe ve Enerji Tüketiminin Yoğunluk (kişi/hektar) ile Değişimi (Milenyum Kentleri).

tartışma sürerken artan çevresel kaygılar (sera gazlarının salımı, hava kirliliği, verimli toprakların kaybı, vb.) kentsel yayılmanın kontrol altına alınması yönünde yapılan yayınları artırmıştır. Dolayısıyla, genel olarak kentsel yayılmanın kontrol edilmesi gerektiğini savunan görüşler ağırlık kazanmıştır.

Dünya ölçeğinde yapılan bir çalışma (Newman ve Kenworthy, 1989), araba sayısının artması ile kentsel yayılma arasında yakın bir ilişki bulmuş ve yayılmanın arabalaşmaya, arabalaşmanın yayılmaya koşturarak geliştiğini saptamıştır. Bu çalışma da çeşitli eleştiriler (Gomez-Ibanez, 1991; Giuliano, 1995) almıştır. Yapılan eleştirilerin bile değiştiremediği gerçek ise ulaşım sektöründe tüketilen enerjinin en önemli kalemini oluşturan özel otomobil sayısının hızla artması ve buna bağlı olarak da enerji tüketiminin hızlı artmasıdır.

Kentsel yayılma ile arabalaşma arasındaki veya kat edilen yol ile nihai enerji tüketimi arasındaki anlamlı ilişkilerin gelir gibi ara değişkenlerden etkilendiği ve mevcut güçlü ilişkileri zayıflattığı (örneğin, Gomez-Ibanez, 1991) ileri sürülmektedir. Ayrıca, kentsel ulaşım ile arazi kullanımı arasındaki güçlü ilişkilerin gelişmiş ülkelerde zayıfladığı da (örneğin, Giuliano, 1995) savunulmaktadır. Bu görüşlere karşın **Tablo 1'**de sunulan korelasyon analizi tersinin geçerli olduğunu göstermektedir.

Yoğunluk=kişi/hektar; araba sahipliği= 1000 kişiye düşen araba sayısı; katedilen mesafe= kişi başına katedilen yolcu araba kilometresi; enerji tüketimi=özel araç kilometresi başına enerji tüketimi (megajoule/km).

Başka bir ifadeyle, gelir seviyesinin ara değişken olarak varsayıldığı durumlarda bile Şekil 1'de sunulan kentsel yoğunluk ile diğer değişkenler arasındaki ilişkiler ne gelişmekte olan ne de gelişmiş ülke kentlerinde değişmektedir. Bu da ileri sürülen ilişkilerin küresel ölçekte ve büyük ölçüde doğru olduğu savını güçlendirmektedir.

Diğer yandan toplu taşımada araç başına taşınan yolcu sayısının özel ulaşımındaki sayıdan fazla olması toplu taşımayı doğal olarak verimli kılmaktadır. Ancak, kendi özelinde toplu taşımanın verimliliği, araçların bakımı ve sistem özellikleri ile de yakından ilgilidir. Örneğin, izli yolların

**Tablo 1.** Kişi Başına Metropolitan Gayri Safi Hasıla ile Kontrol edilerek Yoğunluk, Kat edilen Mesafe ve Enerji Tüketimi Arasındaki Kısmi Korelasyon Analizi; (1.değer: Gelişmekte olan ülke kenti, 2. değer: Gelişmiş ülke kenti).

	1	2	3	4
1. Yoğunluk	1,00			
2. Araba sahipliği	-0,58/-0,62	1,00		
3. Kat edilen mesafe	-0,55/-0,56	0,59/0,75	1,00	
4. Enerji tüketimi	-0,51/-0,26	0,24/0,41	0,44/0,48	1,00

bulunması toplu taşımanın diğer özel taşıtlarla trafikte karışmasını önlediğinden hızının sektöre uğramasını önler ve durak dışındaki yerlerde fazlasıyla enerji tüketen hızlanma ve yavaşlama sürüş devinimlerini en aza indirerek enerji verimliliğini artırır. Ancak, sefer sıklığı talebin az olduğu durumlarda verimsizliği artırır. Her ne kadar toplu taşımanın arabalı ulaşımdan verimli olduğu kabul edilse de toplu taşıma sistemlerinin kendi içinde verimliliği de önemlidir.

Yakıt maliyetlerinin arttırılması ise ulaşım talebi açısından iki tür davranış kalıbını geliştirerek enerji tüketimini her zaman kısmaktadır. Birincisi enerji verimliliği olan arabalara sahip olunması, ancak eski ulaşım alışkanlıklarının devam etmesidir. İkincisi ise araba kullanımını azaltılması ya da ulaşım davranışını daha az araba kullanımı yönünde değiştirilmesidir. Nitekim bir sonraki bölümde toplu taşıma ile yakıt maliyetleri arasındaki ilişkileri ortaya çıkaran modellerden elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

### ENERJİ VERİMLİLİĞİ MODELİ

Üretim ekonomisine ait ekonometrik uygulamalarda verimlilik, genellikle belirli bir miktarda üretim için gereken maliyetin tam verimlilik durumundan olan sapmasının matematiksel ifadesi olarak kabul edilmektedir (Aigner *vd.*, 1977; Kumbhakar ve Lovell, 2003). Diğer bir anlatım ile belirli bir işletmeye ait üretimin aynı teknoloji ve işgücü kullanılarak gerçekleştirilebilecek en fazla üretimden olan sapması verimlilik hesabı için yeter bilgidir. Aslında verimlilik üst sınırını belirleyen ve en verimli işletme olarak ortaya çıkan işletme ideal teorik bir sınırı gösterdiğinden mevcut değildir; buna karşın yeri hakkında her zaman bir fikrimiz vardır: en verimli işletmenin marjinal seviyesinden daha ileride olan bir işletmedir. İşletmelerin verimliliği hesaplanırken elimizde bulunan en önemli bilgi üretim sürecinin tamamıdır. Bir malın ne tür ve hangi miktarda girdilerle üretildiğinin açık biçimde ifade edilmesi ile verimlilik sınırına olan uzaklık yani verimsizliğe ait olan mesafe bulunur. Bu mesafe, aslında üreticinin kendine has koşulları ile oluşmuş durumun bir özetidir.

Kentsel ulaşım sektöründe de enerji verimliliği hakkında çıkarsamalar aynı tarzda ele alınarak yapılır. Kentsel ulaşım sektörünün bütününe ilişkin yapılan bir enerji kullanım analizi, her ne kadar içinde kontrol edilemeyen değişkenleri barındırsa da bir takım sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Örneğin, bir kentteki araba ve toplu taşıma kullanım oranları ile kent formu, söz konusu kentteki ulaşım sektörünün enerji kullanımı hakkında fikir edinmemizi sağlar.

Yukarıda aktardığımız durumu ekonometride Stokastik Sınır Regresyonu Modeli ile matematiksel olarak ifade edebiliriz. Stokastik Sınır Regresyonu şu şekildedir:

$$y_i = f(x_i) + v_i - u_i = \beta' x_i + v_i - u_i \quad (1)$$

Denklemin en sonunda yer alan iki terim,  $v_i$  ve  $u_i$ , belirli olasılık dağılımlarından değerler alan sapmaları ifade eder. Bu sapmalardan birincisi,  $v_i$ ,  $i$  kentinin kendine özgü koşullarından dolayı tükettiği enerji miktarının sapmalarını ifade eder ve iki yönlü yani eksi ya da artı değerler alır. Denklemin en sonunda yer alan ikinci sapma,  $u_i$ , ise verimlilik üst sınırından olan sapma değerini gösterir ve aldığı işarete göre maliyetleri (artı olduğu durum) ya da üretimi (eksi olduğu durum) ifade eder. Bu çalışmada  $u_i$  sapması üretim üst sınırından olan aşağıya doğru olan sapmayı anlatmakta ve hep eksi değerler almaktadır. Aynı zamanda bu

terim, görünmez sınır ( $y_i^* = \beta'x_i + v_i$ ) ile olan mesafenin büyüklüğünü ortaya koyduğundan bir bakıma kentin kendine has koşullarını ve ulaşım talebi sonucu ortaya çıkmış enerji tüketimi kaynaklı verimsizliğini anlatmaktadır.

Aigner *vd.*'in (1977) terminolojisine sadık kaldığımızda 1 numaralı denklemin en sonunda yer alan iki adet sapmayı bileşik sapma ( $\varepsilon$ ) olarak da değerlendirebiliriz. Bileşik sapmayı meydana getiren iki sapmadan birincisi simetrik normal dağılan bir sapmadır,  $v_i \sim N[0, \sigma_v^2]$ , verimsizliği betimleyen ikincisi ise normal dağılan bir  $u_i$  sapmasının mutlak değerine eşittir,  $u_i = |U_i|$  ve  $u_i \sim N[0, \sigma_u^{2**}]$ .

Bu model çerçevesinde verimlilik analizi iki aşamalı tahminden hareketle gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamada,  $\beta$  vektörü ile ifade edilen parametre değerleri tahmin edilir ve aynı zamanda sapmaların standart sapmaları ( $\sigma_u$  ve  $\sigma_v$ ) elde edilir. Tahmin edilmiş parametre değerleri ile bileşik sapmayı bulmamız da mümkündür:  $\varepsilon_i = v_i - u_i = y_i - \beta'x_i$ . Bileşik sapmaya dayanarak verimlilik ile ilgili olan sapmanın tahmini ise Jondrow *vd.*'de (1982) uygulanan yöntemle bulunur:

$$E[u_i | \varepsilon_i] = \frac{\sigma\lambda}{1 + \lambda^2} \left[ \frac{\phi(a_i)}{1 - \Phi(a_i)} - a_i \right] \quad (2)$$

Burada,

$$\sigma = [\sigma_v^2 + \sigma_u^2]^{1/2}, \quad \lambda = \sigma_u/\sigma_v, \quad a_i = \pm \varepsilon_i \lambda / \sigma,$$

$\phi(a_i) = a_i$  değerindeki standart normal dağılım

$\Phi(a_i) = a_i$  değerindeki kümülatif standart normal dağılım.

Yukarıda sunulan genel model kullanılarak bağımlı değişkenlere göre farklılaşan toplam altı adet model üretilmiştir. Bağımlı değişkenlerin seçimi bir önceki bölümde belirtilen ikinci ve üçüncü tür (fiziksel-termodinamik ve ekonomik-termodinamik) enerji verimliliği göstergeleri göz önüne alınarak yapılmıştır. Modellerde kullanılan bağımlı değişkenler şu şekildedir (enerji birimleri megajul olarak alınmıştır; bkz. **Tablo 2**):

1. Model 1: Kişi başına özel ulaşım enerji tüketimi (ÖZEN1)
2. Model 2: Özel aracın kat ettiği kilometre başına enerji tüketimi (ÖZEN2)
3. Model 3: Özel ulaşım yolcu kilometresi başına enerji tüketimi (ÖZEN3)
4. Model 4: Kişi başına toplu taşıma enerji tüketimi (KAMEN1)
5. Model 5: Toplu taşıma aracının kat ettiği kilometre başına enerji tüketimi (KAMEN2)
6. Model 6: Toplu taşıma yolcu kilometresi başına enerji tüketimi (KAMEN3)

Modellerin tümünde aynı bağımsız değişken grupları kullanılmıştır. Bağımsız değişkenler kentin makro formunu (yoğunluk, MİA'da çalışanların toplam çalışanlara oranı), altyapı özelliklerini (toplam yol uzunluğu, ortalama hız), enerji maliyetini (benzin fiyatı) ve ulaşım talebini (bin kişiye düşen özel araç sayısı, günlük özel araç yolculuk sayısı) tanımlamaktadır. **Tablo 2**'de yukarıda anılan modellerde kullanılan değişkenlerin açıklayıcı istatistikleri verilmektedir. Dikkat edileceği üzere değişkenler çeşitli dönüşümlere uğramışlardır; bunlar modellerin tahmin edilebilmeleri için yapılmış dönüşümlerdir. Ayrıca, veritabanında bazı şehirlere ait değerler olmadığı için verileri tam olmayan kentler model veritabanımızdan çıkarılmışlardır. Sonuç olarak modellerimizde 75 kente ait veriler kullanılmıştır.



Değişken ismi	Değişken kodu	Min.	Max.	Ortalama	Std. Dev.
Kişi başına özel ulaşım enerji tüketimi <sup>+</sup> (megajul)	ÖZEN1	6,83	11,54	9,49	0,93
Özel aracın kat ettiği kilometre başına enerji tüketimi <sup>+</sup> (megajul)	ÖZEN2	-0,02	1,64	1,26	0,26
Özel ulaşım yolcu kilometresi başına enerji tüketimi <sup>+</sup> (megajul)	ÖZEN3	-0,39	1,42	0,88	0,30
Kişi başına toplu taşıma enerji tüketimi <sup>+</sup> (megajul)	KAMEN1	4,08	8,34	6,84	0,68
Toplu taşıma aracının kat ettiği kilometre başına enerji tüketimi <sup>+</sup> (megajul)	KAMEN2	1,58	3,47	2,69	0,42
Toplu taşıma yolcu kilometresi başına enerji tüketimi <sup>+</sup> (megajul)	KAMEN3	-2,53	1,20	-0,31	0,70
Yoğunluk	YOĞUNLUK	6,36	355,65	72,63	72,64
Merkezi iş alanındaki istihdamın toplam istihdam içindeki oranı	MİA	2,71	75,18	17,84	11,92
Bin kişiye düşen yol kilometresi <sup>+</sup>	YOLKM	5,00	9,17	7,75	0,97
Ortalama yolağı hızı	YOLHIZ	15,00	60,60	34,88	10,49
Bin kişiye düşen araba sayısı	OTOMOBİL	7,90	746,01	356,91	191,47
Bin kişiye düşen motosiklet sayısı	MOTOR	0,16	290,99	37,52	49,57
Günlük özel araçlı yolculuk sayısı	ÖZELYOLCLK	0,12	4,45	1,61	1,02
Görece yakıt maliyeti (Yakıt fiyatı/kişi başına düşen metropoliten gelir)	YAKIT	0,00	0,49	0,02	0,07
Toplu taşıma araç sayısı	OTOBÜS	303,60	13375,4	1371,80	1593,10
Toplu taşıma izli yol uzunluğu	İZLİYOL	0,00	727,46	105,78	123,624
Gelişmiş ülke ayracı	DEV			0,68	0,47

**Tablo 2.** Model Değişkenlerinin Açıklayıcı İstatistikleri (Örneklem Büyüklüğü = 75).

Modellerde yukarıda anılan hibrid enerji verimliliği göstergeleri ile uyumlu bağımlı değişkenler temel alınmıştır—göstergenin değeri azaldıkça verimlilik artmaktadır. Ancak enerji verimliliği göreceliği olan bir kavramdır, operasyonel olması için göstergelerin karşılaştırmalara olanak verecek şekilde toplanması gerekmektedir. Bir kente ait zaman serileri olarak düzenlenmiş veriler; bir zaman kesitinde birden çok kente ait veriler veya panel seriler olarak düzenlenmiş birden çok kentin zaman serilerinden oluşturulmuş veriler, karşılaştırmalara ve böylece anlamlı analizlere olanak veren verilerdir. Bu çalışmadaki veriler, **Tablo 2'** de sunulan değişkenlerin bir zaman kesitinde (2000 yılı civarı) 75 kente ait verilerin düzenlenmesinden oluşturulmuştur. Tablo 3 ise bu değerleri kullanarak kentlerin verimlilik konusunda sıralamasını vermektedir.

Bu çalışmada, farklı bağımlı değişkenlerle kurulan modellerin verimlilik karşılaştırılması yapılmıştır (**Tablo 3**). ÖZEN1 ve KAMEN1 değişkenleri, kişi başına düşen özel/ toplu ulaşım enerji tüketimini göstermektedir. Araçların enerji tüketim verimliliği aynı kabul edildiğinde bir araçta daha fazla kişi taşınması veya aynı sayıda kişi taşındığı kabul edildiğinde aracın daha az enerji tüketmesi, kişi başına düşen enerji tüketimini azaltır. Diğer bir taraftan özel ve toplu ulaşım araçları enerji tüketim verimliliğinin aynı olduğu varsayıldığında ikinci verimlilik ölçütü, ÖZEN2 ve KAMEN2 değişkenlerinin aynı seviyede olması beklenir. Bunun gözlenemediği durumlarda ya kentte trafik sıkışıklığından kaynaklı enerji kaybı ya da araçların tüketiminden kaynaklı enerji kaybı söz konusudur. Örneğin, kişi (ÖZEN1) ve araç kilometresi (ÖZEN2) başına düşen özel ulaşım enerji tüketimi modelleri karşılaştırıldığında Bangladeş'in başkenti olan Dakar, 75 Kentte Enerji Verimliliği Sıralamasında 2. ve 3. sıralarda yer almaktadır.

Sıra	Özel Taşıma			Toplu Taşıma		
	ÖZEN1	ÖZEN2	ÖZEN3	KAMEN1	KAMEN2	KAMEN3
1	HO CHI MINH	CAPE TOWN	CAPE TOWN	CAPE TOWN	COPENHAG	DAKAR
2	DAKAR	ATHENS	BUDAPEST	DUSSELDORF	CAPE TOWN	ATHENS
3	MUMBAI	DAKAR	ATHENS	DAKAR	CHENNAI	GUANGZHO
4	SHANGHAI	MUMBAI	COPENHAG	GUANGZHO	DUSSELDORF	TUNIS
5	CHENNAI	CHICAGO	CAIRO	SHANGHAI	BERNE	SAN FRANCISCO
6	CAIRO	MARSEILLE	BERLIN	ATHENS	CALGARY	BARCELONA
7	GUANGZHO	HAMBURG	LILLE	CHICAGO	ZURICH	JOHANNES
8	JAKARTA	MILAN	MANCHESTER	RUHR	OSAKA	GLASGOW
9	CRACOW	LILLE	MUMBAI	WELLINGT	GUANGZHO	HO CHI MINH
10	MANILA	TOKYO	HAMBURG	STUTTGART	KUALA LUMPUR	MONTREAL
11	TUNIS	STOCKHOLM	CHICAGO	NANTES	DAKAR	SINGAPORE
12	TEHRAN	MONTREAL	MARSEILLE	JAKARTA	ATHENS	BERNE
13	HARARE	JOHANNES	MILAN	MONTREAL	LILLE	CALGARY
14	CAPE TOWN	GRAZ	BERNE	BERLIN	JOHANNES	LILLE
15	BARCELONA	CAIRO	DAKAR	CAIRO	CRACOW	CHENNAI
16	RIO DE JENERIO	MANCHESTER	GRAZ	OSLO	PERTH	GRAZ
17	BUDAPEST	ZURICH	TAIPEI	MANILA	WELLINGT	DENVER
18	PRAGUE	OSAKA	GUANGZHO	JOHANNES	BARCELONA	BRISBANE
19	SEOUL	HOUSTON	ATLANTA	PHOENIX	BRISBANE	ZURICH
20	TAIPEI	GUANGZHO	ZURICH	PERTH	TUNIS	HELSINKI
21	OSAKA	TAIPEI	STOCKHOLM	BERNE	SAN FRANCISCO	TEHRAN
22	SAO PAOLO	OTTAWA	BRUSSELS	OTTAWA	GRAZ	CHICAGO
23	SINGAPORE	TEHRAN	TEL AVIV	PRAGUE	MANCHESTER	CAIRO
24	TOKYO	SAN FRANCISCO	TOKYO	HO CHI MINH	CHICAGO	SAPPRO
25	HELSINKI	RIO DE JENERIO	CHENNAI	HELSINKI	RIO DE JENERIO	RUHR
26	JOHANNES	BRISBANE	TEHRAN	HARARE	MELBOURN	HARARE
27	KUALA LUMPUR	ROME	JOHANNES	SEOUL	HAMBURG	ROME
28	MANCHESTER	BRUSSELS	MONTREAL	VIENNA	CAIRO	CAPE TOWN
29	AMSTERDAM	PARIS	CALGARY	STOCKHOLM	RUHR	OSAKA
30	BERLIN	BARCELONA	OTTAWA	HOUSTON	TEL AVIV	KUALA LUMPUR
31	MILAN	BERNE	AMSTERDAM	RIO DE JENERIO	LONDON	RIO DE JENERIO
32	SAPPRO	BUDAPEST	HOUSTON	BRISBANE	MONTREAL	BRUSSELS
33	LONDON	SAPPRO	OSAKA	LYON	HARARE	TAIPEI
34	ATHENS	TUNIS	SAN FRANCISCO	LONDON	GLASGOW	MUNICH
35	MADRID	TEL AVIV	LONDON	TOKYO	SAPPRO	WELLINGT
36	TEL AVIV	WELLINGT	SEOUL	MARSEILLE	TORONTO	HAMBURG
37	GRAZ	COPENHAG	TUNIS	MELBOURN	DENVER	BUDAPEST
38	BERNE	MELBOURN	BARCELONA	SAPPRO	OTTAWA	TOKYO
39	COPENHAG	SINGAPORE	HELSINKI	KUALA LUMPUR	PRAGUE	TORONTO
40	DUSSELDORF	AMSTERDAM	HARARE	PARIS	HOUSTON	PARIS
41	PARIS	CHENNAI	RIO DE JENERIO	HAMBURG	ROME	PRAGUE
42	GLASGOW	HELSINKI	ROME	TORONTO	HELSINKI	BERLIN
43	STUTTGART	LONDON	GLASGOW	TUNIS	TEHRAN	TEL AVIV
44	VIENNA	RUHR	PRAGUE	BRUSSELS	PARIS	HOUSTON
45	MUNICH	GLASGOW	SINGAPORE	WASHINGTON	TOKYO	MANCHESTER
46	LYON	HO CHI MINH	BRISBANE	TAIPEI	MUNICH	MARSEILLE
47	RUHR	SEOUL	TORONTO	SYDNEY	MARSEILLE	MELBOURN
48	ZURICH	STUTTGART	SAPPRO	GLASGOW	SINGAPORE	STOCKHOLM
49	MARSEILLE	TORONTO	WELLINGT	MADRID	BUDAPEST	CRACOW
50	STOCKHOLM	KUALA LUMPUR	PARIS	SAN FRANCISCO	ATLANTA	LYON
51	NANTES	PRAGUE	MELBOURNE	OSAKA	VIENNA	VIENNA
52	HAMBURG	ATLANTA	RUHR	RIYADH	STOCKHOLM	SAN DIEGO
53	LILLE	DENVER	MADRID	BARCELONA	PHOENIX	DUSSELDORF
54	ROME	MUNICH	STUTTGART	SAO PAOLO	TAIPEI	PHOENIX
55	BRUSSELS	OSLO	WASHINGTON	ZURICH	LYON	MUMBAI
56	OSLO	BERLIN	KUALA LUMPUR	GRAZ	BRUSSELS	RIYADH
57	WELLINGT	CALGARY	OSLO	MANCHESTER	HO CHI MINH	PERTH
58	RIYADH	WASHINGTON	DENVER	SAN DIEGO	JAKARTA	SEOUL
59	MONTREAL	HARARE	DUSSELDORF	LILLE	SEOUL	LOS ANGELES
60	OTTAWA	MADRID	MUNICH	CHENNAI	MILAN	LONDON
61	SYDNEY	CRACOW	HO CHI MINH	ROME	MUMBAI	AMSTERDAM
62	BRISBANE	SHANGHAI	VIENNA	CALGARY	RIYADH	OTTAWA
63	MELBOURNE	VIENNA	CRACOW	SINGAPORE	SYDNEY	ATLANTA
64	PERTH	SYDNEY	MANILA	TEHRAN	SAN DIEGO	SYDNEY
65	TORONTO	SAO PAOLO	NANTES	TEL AVIV	LOS ANGELES	COPENHAG
66	CALGARY	PERTH	SAO PAOLO	DENVER	BERLIN	WASHINGTON
67	CHICAGO	LOS ANGELES	SAN DIEGO	LOS ANGELES	STUTTGART	SAO PAOLO
68	WASHINGTON	LYON	SYDNEY	COPENHAG	SHANGHAI	JAKARTA
69	LOS ANGELES	PHOENIX	SHANGHAI	MILAN	MANILA	MADRID
70	PHOENIX	DUSSELDORF	LOS ANGELES	BUDAPEST	WASHINGTON	OSLO
71	SAN DIEGO	NANTES	PERTH	MUNICH	OSLO	MILAN
72	SAN FRANCISCO	JAKARTA	LYON	MUMBAI	NANTES	STUTTGART
73	DENVER	RIYADH	RIYADH	CRACOW	SAO PAOLO	NANTES
74	HOUSTON	SAN DIEGO	PHOENIX	AMSTERDAM	MADRID	MANILA
75	ATLANTA	MANILA	JAKARTA	ATLANTA	AMSTERDAM	SHANGHAI

Tablo 3. 75 Kentte Enerji Verimliliği Sıralaması.

Bu durumda hem araç başına fazla yolcu taşınmasından; hem de araçların az enerji tüketmesinden; ya da trafiğin daha akışkan olmasından söz edilebilir. Ancak, Vietnam'ın başkenti olan Ho-Chi-Minh kenti ÖZEN1 değişkenine göre olan sıralamada 1. sırada iken ÖZEN2 değişkenine göre 46. sıradadır, bu durumda sadece araç başına fazla yolcu taşındığı sonucunu tartışabiliriz.

Bir kentin, Ho-Chi-Minh kenti gibi bir verimlilik göstergesinde üst sırada ve diğer verimlilik göstergelerinde alt sıralarda yer alması, kentin enerji tüketim verimliliğinde tutarsız olduğunu gösterir. Buna bir örnek kentte Çin Halk Cumhuriyeti'nin ticari merkezi olan Shanghai'dır. Kent, toplu taşıma enerji tüketiminde kişi başına verimlilik açısından üst sıralarda yer alırken araç kilometresi başına alt sıralarda yer almaktadır. Bu durum ya trafik koşullarından ya da araçların genel durum koşullarından kaynaklanmaktadır ve araç kilometresi başına verimliliği azaltmaktadır.

**Tablo 3**'teki her bir enerji verimliliği göstergesine ait kent sıralamaları kullanılarak bir kentin ulaşım sistemi özellikleri ve onun işletimi hakkında çıkarımlar yapılabilir. Ayrıca, bu çalışmada farklı verimlilik göstergeleri ile hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülke kentleri verileri kullanılarak modeller üretildiğinden her bir verimlilik göstergesine etki eden faktörlerin etki dereceleri ve kentlerin gelişmişlik düzeyine göre farklılıkları bağımsız değişkenler ve modellerdeki değişken katsayıları incelenerek ortaya konulabilir.

**Tablo 2**'de sunulan bağımsız değişkenler irdelendiğinde en özet değerlendirmeye **Tablo 3**'ü de içine alabilecek kentlerin gelişmişlik düzeyi üzerinden yapılabilir. Dikkat edilirse Tablo 2'deki DEV değişkeninin ortalama değerinden çıkarılan gelişmiş ülke kent sayısı, toplam içinde 51 ( $75 \cdot 0.68$ ) adet olarak bulunur. Bağımsız değişkenler ele alındığında gelişmiş ve gelişmekte olan ülke kentleri birbirlerinden yoğunluk (gelişmiş ülke kenti < gelişmekte olan ülke kenti), bin kişiye düşen yol kilometre (gelişmiş ülke kenti > gelişmekte olan ülke kenti), bin kişiye düşen araba sayısı (gelişmiş ülke kenti > gelişmekte olan ülke kenti), ve bin kişiye düşen motosiklet sayısı (gelişmiş ülke kenti < gelişmekte olan ülke kenti) açılarından ayrılmaktadır.

Toplam altı adet model iki grup halinde tahmin edilmiştir: ilk grup özel ulaşım (bkz. **Tablo 2** ilk üç satır), ikinci grup ise toplu taşıma (bkz. **Tablo 2** dört, beş ve altıncı satırlar) ile ilgili enerji verimliliği modellerini içermektedir. Tablo 4'de modellerin tahmin edilen parametre değerleri ile model performansları verilmektedir. Ayrıca bu tablolardaki modeller kendilerinden daha kısıtlı olan alternatifleri (tek bağımsız değişkenli modeller) ile karşılaştırılmıştır. Bu alternatiflerin Logaritma Maksimum Benzerlik Değerleri (LL; LL0-sadece sabit terim ile yapılan tahmin ve LL1-Model bütünü ile yapılan tahmin) verilmiştir. Bu değerlere göre bu çalışmada sunulan modellerin kısıtlı olanlara göre performanslarının daha iyi olduğu sonucuna varılır.

Modellerde tahmin edilen parametre değerleri incelendiğinde özel ulaşım ile toplu taşıma arasındaki temel farklılığın kent makroformuna ait değişkenlere verdikleri tepkilerde ortaya çıktığı görülmektedir. Genel olarak parametre değerleri farklı yönlerde dir. YÖĞUNLUK değişkeni katsayısı, özel ulaşım da eksi, toplu taşıma da artı değerini almaktadır. Bu da, esnekliği toplu taşıma göre daha fazla olan özel ulaşım da yoğunluğun artması ile enerji tüketiminin azaldığını göstermektedir. Bu sonuç şu şekilde yorumlanabilir: yoğunluğun artması ile aktiviteler arası mesafeler azalacağından katedilen mesafeler azalacaktır, dolayısıyla yakıt tüketimi de azalacaktır. Buna ek olarak aktivitelerin birbirlerine zincirlenerek gerçekleştirilmesi de kolaylaşacağından toplam araba yolculuklarında azalma da meydana gelebilir. Aynı gerekçeler toplu taşımanın verimliliğini ters yönde etkilemektedir. Belirli güzergahı takip etmek zorunda olan toplu taşıma, aktiviteler arasının fazlası ile yakınlaşmasında dur-kalk döngüsünü

daha çok yapmak durumunda kalacaktır ve bu da enerji tüketimini arttıracaktır.

Özel ulaşım ile ilgili bütün modellerde yoğunluğun istikrarlı bir şekilde enerji tüketimi üzerinde negatif etkisi olması kentlerde yoğunluk artışının enerji tüketimini azaltmak amacı ile arazi kullanım politikası olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Yoğunluk artışının toplu taşımada pozitif yönde olan etkisi, sadece Model 3'de  $t=1.88$  değeri ile anlamlı olmasına rağmen bu enerji verimliliğindeki olumsuz etki, toplu taşımada özel tedbirlerin alınması ile giderilebilir. Örneğin izli yolların yapılması enerji tüketimini genel olarak azalttığından (izli yol ile ilgili değişkenin, LNRPUB, enerji tüketimine etkisi genellikle negatiftir) izli yol kullanımına yönelik politikalar desteklenebilir.

Bu çalışma ile yoğunluğa ilişkin elde ettiğimiz sonuç, son on yıldır akademik tartışmalarında bir bakıma merkezinde yer almaktadır. İkiye bölünmüş olan akademik çevrede bir taraf yoğunlukların görece fazla olduğu derişik kentte (compact city) ulaşım kaynaklı enerji tüketiminin azaldığını öne sürerken (Ewing, 1997), diğer taraf ise derişik kent yaklaşımının enerji tüketimini azaltamayacağını, enerji sarfiyatı ve araba kullanımına ilişkin nedenlerinin başka etkenleri olduğunu (örneğin, ucuz yakıt fiyatları, araba kullanım alışkanlıkları vb.) ileri sürmektedirler (Gordon ve Richardson, 1997).

Özel ulaşım da enerji tüketimini azaltıcı en önemli etkenlerden bir tanesi de yakıt maliyetleridir. Her kentte mevcut gayri safi gelire oranlı olan yakıt maliyeti arttıkça enerji tüketimi azalmaktadır. Doğrudan yakıt maliyetinin artırılması ile özel ulaşımın azalması ya da daha verimli araçların kullanılması kaçınılmazdır. Ancak, özel ulaşım talebindeki azalmanın büyüklüğü araçlardaki verimlilik artışı büyüklüğünden çoğunlukla daha geride kalmaktadır (Goodwin *vd.*, 2004). Lakin bu tür doğrudan maliyet artışlarına yönelik politikalar, politikacıların oy kaygılarından dolayı arazi kullanım politikalarına göre daha öncelikli değildir.

**Tablo 4.** Model Parametre Değerleri Tahmini.

Bağımlı değişkenler Model 1: OZEN1, Model 2: OZEN2, Model 3: OZEN3, Model 4: KAMEN1, Model 5: KAMEN2, Model 6: KAMEN3

Bağımsız değişkenler	Özel Ulaşım						Toplu Taşım					
	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4		Model 5		Model 6	
	Değer	t-değeri	Değer	t-değeri	Değer	t-değeri	Değer	t-değeri	Değer	t-değeri	Değer	t-değeri
Sabit terim	7.64	12.65	1.72	4.80	2.84	5.68	0.00	6.44	2.87	4.07	0.75	3.61
Yoğunluk	-0.25	-2.71	-0.08	-1.67	-0.18	-2.43	0.33	0.97	0.14	1.46	0.22	1.88
MİA	0.27	0.90	-0.17	-0.77	-0.83	-3.41	-0.03	0.55	-0.49	-1.39	-1.50	-3.24
YOLKM	0.17	2.14	-0.04	-0.93	-1.96	-2.93			0.03	0.35	0.00	-0.05
YOLHIZ			0.62	2.83								
OTOMOBİL	0.13	3.92			0.00	-0.35						
MOTOR	-0.16	-2.02			0.09	1.86						
ÖZELYOLCLK	0.33	5.96			0.12	3.21						
YAKIT	-2.36	-4.64	-0.64	-1.89	-1.14	-4.78						
OTOBÜS							0.02	4.08	-0.01	-4.19	0.02	2.54
İZLİYOL							0.10	2.37	-0.07	-2.01	-1.21	-2.51
DEV							0.09	0.61	0.14	1.20	0.37	1.94
$\lambda$	1.23	3.36	4.68	2.50	7.82	1.88	2.06	3.71	1.49	3.74	5.31	1.89
$\varepsilon$	0.35	92.47	0.36	98.89	0.42	104.78	0.81	102.91	0.48	104.88	0.94	104.30
LL0		-102.39		-49.37		-90.24		-74.04		-39.72		-78.34
LL1		-10.27		-20.14		-12.84		-61.48		-28.94		-59.55

Merkezi iş alanında çalışan sayısının toplam çalışan sayısına oranını temsil eden MİA değişkeni hem özel ulaşım hem de toplu taşımada enerji tüketimini negatif yönde etkilemekte, dolayısıyla enerji verimliliğini artırmaktadır. Bunun nedenlerinden bir tanesini merkezi iş alanının göreceli olarak kentin en erişilebilir alanında olmasıdır. Başka bir ifadeyle, merkezi iş alanında çalışanların sayısı arttıkça ortalama kat edilen yolcu kilometre azalmaktadır (Özel/toplu ulaşım kilometresi başına enerji tüketimini açıklayan Model 3/6'daki MİA değişkenine ait t-değerler sırasıyla -3.41 ve -3.24 anlamlı değerleridir). Bin kişiye düşen yol kilometresi, YOLKM sadece özel ulaşım da anlamlı sonuçlar vermektedir. Yol uzunluğunun artması daha fazla kilometre sürüşünü getirdiğinden kişi başına düşen yakıt tüketiminde artış olacaktır (Model 1'deki YOLKM değişkeninin artı değer alması). Buna karşın, yol uzunluğunun artışı birim yola düşen araç sayısının azalmasını getirdiğinden araç sürüşlerinde durma kalkma gibi durumların azalmasına ve yakıt tüketiminin azalmasına neden olacaktır (Model 2 ve 3'deki YOLKM değişkeninin eksi değer alması).

Modellerde içsel olarak kabul gören, görünmeyen verimlilik üst sınırından olan uzaklıklar olarak kendi ifadesini bulan  $E[u_i | \epsilon_i]$  değerleri arttıkça enerji verimliliği de artmaktadır. Yukarıda 2 numaralı denklemde hesabı verilen verimlilik değerleri ayrıca hesaplanıldığında Tablo 3'de verilen sıralamalar değişmektedir. Bunun en önemli nedeni enerji verimliliği etkenlerinin regresyon analizi ile etkileri nispetinde ayıklanması ertesinde kalan artık verimlilik değerleri olmalarıdır. Nedenleri hakkında fazla bilgi sahibi olmadığımız değişkenlerin varlığında gerçekleşen bu görünmeyen verimlilik değerleri kentleri birbirinden ayıran en temel unsurlarda kendilerini bulmaktadır. Kentlerin topoğrafyası, iklimi, ulaşım sisteminin yönetimi, altyapının bakım ve onarımı vb. gibi istatistiklerde fazlasıyla yerini bulamayan değişkenlerin tanımladığı farklılıklar verimlilik konusunda önemli etkilere sahiptir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günümüzde enerji tüketimi konusu, sürdürülebilirlik tartışmalarında en az iki nedenden dolayı yer almaktadır. Birinci neden, yenilenemez kaynakların başında yer alan fosil yakıtların tüketimi ile ilgili iken ikincisi enerji tüketimi sonucunda ortaya çıkan salımların meydana getirdiği hem yerel (hava kirliliği gibi) hem de küresel (küresel ısınma gibi) ölçekli kaygılarla ilgilidir. Ulaşım sektörü de enerji kaynağı olarak büyük ölçüde fosil yakıtlara dayandığından ve bunun doğal sonucu olan salımlardan dolayı sürdürülebilirlik tartışmalarında önemli bir yer işgal etmektedir. Enerji kullanımı ile ilgili bu ikili kaygının dışında kentsel alanın yayılarak büyümesi, verimli toprakların yitirilmesi ve çevre dengesinin sarsılması gibi çevresel sorunlar, ulaşım sektöründe enerji tüketiminin daha ekonomik ve daha çevre dostu politikalar ile kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışmada, ulaşımında enerji verimliliğinde etkin olabilecek politikaların üretilmesi amacı ile 51'i gelişmiş ülke kenti olmak üzere dünyanın değişik yerlerindeki 75 kentte ait veriler kullanılarak kentsel ulaşımında enerji verimliliğine etki eden faktörler belirlenmiştir. Kentsel yoğunluğun özel ulaşımında enerji verimliliğini artırdığı, buna karşın toplu taşımada o kadar da etkili olmadığı hatta tersi istikamette etkili olabileceği sonuçlarımız arasındadır. Burada yoğunluk artışı ile kentsel yayılmanın tersine karşılık gelen derişik yapıli gelişmeler anlatılmak istenildiğinden,



bu bulgu ister istemez kent formu ile ilgili sürdürülebilirlik tartışmalarına da uzanmaktadır.

Ancak, bu noktada önemli bir soru ortaya çıkmaktadır. Bu da derişik kent formunun ne dereceye kadar desteklenmesi gerektiğidir. Bilindiğı üzere kent planlamasının bir çıkış noktası da, 19. yüzyılda ortaya çıkan sanayi kentindeki yüksek yoğunluk nedeni ile yeteri kadar faydalanılamayan güneş ışığı ve alınamayan temiz hava, ve bunların sonucu olarak gelişen salgın hastalıklardır (tartışma için bkz. Neuman, 2005). Geçen yüzyılda bu tür sorunların üstesinden büyük ölçüde gelinmiş olmasına karşın bu sefer karşımıza çıkan artan refah ile gelen daha iyi yaşama isteğinin ortaya koymuş olduğu kent dışında yaşama ve bireysel ulaşımdan azami ölçüde yararlanma eğilimleridir. Bu tartışmalar kent ve ulaşım planlarını refah, yaşanabilirlik ve sürdürülebilirlik tartışmaları arasında bırakmaktadır.

Bu çalışma ile yoğunluğun yanında özel ulaşım için enerji verimliliğini belirleyen önemli bir faktörün de yakıt maliyetleri olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir taraftan, toplu taşıma için izli yolların varlığı da enerji verimliliğini artırmaktadır. Genel trafikten ayrılmış bir toplu taşıma sabit hızlarda hizmet verebilmekte, yakıt ekonomisi için gerekli olan ideal koşullara yaklaşabilmektedir. Ancak, gelişmiş ülkelerde toplu taşımanın kişi başına daha çok enerji harcaması, bu ülkelerdeki kullanım azlığından dolayı olabilir. Buna karşın, sadece kat edilen mesafe üzerinden yapılan karşılaştırmada gelişmiş ülke toplu taşıma sisteminin daha verimli olduğunu tespit etmekteyiz.

Diğer yandan araçlardaki verimlilik artışlarının kentsel politikalar ile desteklenmeyip, kendi haline bırakılması, enerji verimliliği konusundaki hedeflerin (enerji tüketiminin ve salımların azalması gibi) gerçekleşmesini önemli ölçüde sekteye uğratabilecek tehlikeyi içinde barındırmaktadır. 'Geri tepme etkisi' olarak da adlandırılan bu tehlike, araçlardaki enerji verimliliği artışı sonucu meydana gelen dolaylı gelir artışının aynı refah seviyesinde daha fazla ulaşım talebi doğurabileceği olasılığıdır (Greening vd., 2000). BU husus da dikkate alınarak kentsel ulaşımda enerji verimliliğinin artırılması için özel ulaşım ile toplu taşımanın beraber düşünülmesi ve eşgüdümlü politikaların uygulanması gerekmektedir.

#### KAYNAKÇA

- AIGNER, D., LOVELL, K. ve SCHMIDT, P. (1977) Formulation and estimation of stochastic frontier function models, *Journal of Econometrics* (6) 21-37.
- BOYD, G. A. ve PANG, J. X. (2000) Estimating the linkage between energy efficiency and productivity, *Energy Policy* (28) 289-96.
- BUTTON, K. ve COSTA, A. (1999) Economic efficiency gains from urban public transport regulatory reform: two case studies of changes from Europe, *The Annals of Regional Science* (33) 425-38.
- DE BORGER, B., KERSTENS, K. ve COSTA, A. (2002) Public Transit Performance: What Does One Learn From Frontier Studies?, *Transport Reviews* (22:1) 1-38.
- DIAMOND, J. (2005) *Collapse, How Societies Choose to Fail or Succeed*, Viking Penguin, New York.

- ECMT (European Conference Of Ministers Of Transport) (1995) Urban travel and sustainable development, *Organization for Economic Co-operation and Development Paris*, 280.
- ELKER, C. (2002) *Ulaşımında Politika ve Pratik*, Gölge Ofset Matbaacılık, Ankara.
- EWING, R. (1997) Is Los-Angeles type of sprawl desirable?, *Journal of the American Planning Association* (63) 107-26.
- FREEMAN, S. L., NIEFER, M. J. ve ROOP, J. M. (1997) Measuring industrial energy efficiency: practical issues and problems, *Energy Policy* (25) 7-9, 703-14.
- GAKENHEIMER, R. (1999) Urban mobility in the third world, *Transportation Research A* (33) 671-89.
- GALLAGHER, K. S. (2006) *China Shifts Gears: Automakers, Oil, Pollution, and Development*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- GIULIANO, G. (1995) The weakening transportation-land use connection. *Access* (6) 3-11.
- GOMEZ-IBANEZ J. A. (1991), A global view of automobile dependence, *Journal of the American Planning Association* (57) 376-69.
- GOODWIN, P., DARGAY, J. ve HANLY; M. (2004) Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: A Review, *Transport Reviews* (24) 275-92.
- GORDON P. ve RICHARDSON H. W. (1997) Are compact cities a desirable planning tool?. *Journal of the American Planning Association* (63) 95-106.
- GREENE, D. L. ve WEGENER, M.(1997) Sustainable transport, *Journal of Transport Geography* (5) 177-90.
- GREENING, L. A., GREENE, D. L. ve DIFIGLIO, C. (2000) Energy efficiency and consumption-the rebound effect- a survey, *Energy Policy* (28) 389-401.
- GWILLIAM, K. (2003) Urban transport in developing countries, *Transport Reviews* (23) 197-216.
- HEINBERG, R. (2006) *The Party's Over, Oil, War and the Fate of Industrial Societies*, New Society Publishers, Canada.
- JACOBS, J. (1993) *Death and Life of The Great American Cities*, The Modern Library Edition, New York.
- JONDROW, J., LOVELL, K., MATEROV, I. ve SCHMID, P. (1982) On the estimation of technical inefficiency in the stochastic frontier production function model, *Journal of Econometrics* (19) 233-8.
- KENWORTHY, J. R. ve LAUBE, F. B. (1999) *An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities 1960-1990*, University Press of Colorado, Niwot, Colorado.
- KESSLER, J. ve SCHROEER, W. (1995) Meeting mobility and air quality goals: strategies that work, *Transportation* (22) 241-72.
- KUMBHAKAR, S. C. ve LOVELL, K. (2003) *Stochastic Frontier Analysis*, Cambridge University Press, N.Y.

- LITMAN, T. (2003) The Online TDM Encyclopedia: mobility management information gateway, *Transport Policy* (10) 245-9.
- MEADOWS, D., RANDERS, J. ve MEADOWS, D. (2004) *Limits to Growth, The 30-Year Update*, Chelsea Green Publishing Company, Vermont.
- NEUMAN, M. (2005) The compact city fallacy, *Journal of Planning Education and Research* (25) 11-26.
- NEWMAN, P. W. G. ve KENWORTHY J. R. (1989) *Cities and Automobile Dependence: A Sourcebook*, Gower Technical, Brookfield.
- PATTERSON, M. G. (1996) What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues, *Energy Policy* (24) 377-90.
- SPERLING, D. ve CLAUSEN, E. (2002) The developing world's motorization challenge, *Issues in Science and Technology* (59-66).
- STEEMERS, K. (2003) Energy and the city: density, buildings and transport, *Energy and Buildings* (35) 3-14.
- SUSSMANN, J. M. (2005) *Perpectives on Intelligent Transportation Ssystems*, Springer, New York.
- UITP (International Association of Public Transport) (2001) *The Millennium Cities Database for Sustainable Transport*, CD-ROM.
- WILLSON, R. (2001) Assessing communicative rationality as a transportation planning paradigm, *Transportation* (28) 1-31.

Received: 15.06.2009, Final Text: 04.04.2010

**Keywords:** urban transport; energy efficiency; Stochastic Frontier Regression.

## ENERGY EFFICIENCY IN URBAN TRANSPORT: AN INTERNATIONAL COMPARISON

Urban transport has been increasingly becoming a primary element in energy consumption. Increasing car ownership causes urban sprawl and renders public transport ineffective. Together these cause not only an increase in energy consumption but also inefficient energy consumption. In this study, the factors that affect energy efficiency are specified and estimated by Stochastic Frontier Regression Model with available data of 75 cities in the world. It is found that urban compactness increases energy efficiency in private and public transport. Fuel cost is the most significant independent variable in private transport that promotes energy efficiency. As for the public transit, reserved roads increase energy efficiency. This study shows that employing policies effective for private transport as well as public transport in coordination might be the most effective tool in reducing cost instead of uncoordinated applications.

**EMİNE YETİŞKUL;** BCP., M.Sc. in CP, Ph.D. in CE.

Received BCP. (1995) and M.Sc in CP (1998) at METU; Ph.D. in CE (2006) at Kyoto University, Japan. Conducted research in the Institute of Transportation Studies at UC, Berkeley, USA. Works as city planner in the Ministry of Public Works and Settlement and teaches as part-time instructor in the Department of City and Regional Planning, METU. [eminey@bayindirlik.gov.tr](mailto:eminey@bayindirlik.gov.tr), [yetiskul@metu.edu.tr](mailto:yetiskul@metu.edu.tr)

**METİN ŞENBİL;** B.CP., M.Sc. in CP, Ph.D. in CE.

Received BCP. (1995) and MSc in CP (1998) at METU; Ph.D. in CE (2003) in the Department of Civil Engineering Systems at Kyoto University, Japan. Worked as a COE Researcher in the Graduate School of Development and Cooperation, at Hiroshima University, Japan. Currently makes research on transportation planning and urban land-use planning in the Department of City and Regional Planning at Gazi University. [senbil@gazi.edu.tr](mailto:senbil@gazi.edu.tr)