

Karayolu Trafiğinde Şok Dalgaları: Dalgacık Dönüşümü ile Makroskobik ve Mikroskobik İnceleme

İsmail ŞAHİN¹
S. Şeyma KUŞAKCI²
Gökçe AYDIN³

ÖZ

Şok dalgaları, karayolunda farklı trafik durumları arasındaki sınır şartlarını tanımlar. Şok dalgalarının oluşumunu ve yayılmasını anlamak, trafik tıkanıklığının özelliklerini ve etkilerini incelemenin yanında, yeni trafik işletim tekniklerinin ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için de önemlidir. Şok dalgalarının oluşması ve yayılması, makroskobik (ortalama akım hızı) ve mikroskobik (taşıt yörüngeleri) olmak üzere iki farklı veri kümesi kullanılarak, dalgacık dönüşümü (wavelet transform) tekniğiyle incelenmiştir. Şok dalgalarının bu çalışmada tahmin edilen yayılma hızları literatürde bulunan hızlarla uyumludur. Dalga hızları, trafik akışının temel diyagramını kalibre etmek ve bir karayolu kesimindeki akım hızlarını (yolculuk sürelerini) tahmin etmek için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Karayolu trafik akımı, taşıt yörüngeleri, durgun olmayan zaman serileri, şok dalgaları, dalgacık dönüşümü.

ABSTRACT

Shockwaves in Highway Traffic: Macroscopic and Microscopic Analysis with Wavelet Transform

Shock waves in highway traffic define the boundary conditions between different traffic states. Understanding of formation and propagation of shock waves is helpful for analyzing the features of traffic congestion and its consequences; moreover, for developing novel highway traffic operation techniques and management strategies. Formation and propagation of shock waves were analyzed with wavelet transform technique using two different sets of data, namely macroscopic (mean flow speeds) and microscopic (vehicle trajectories). Estimated propagation speeds of shockwaves in this study are consistent with those reported in the literature. Shockwave speeds could be used to calibrate the

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 16.02.2015 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2016 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - sahin@yildiz.edu.tr
2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - skusakci@yildiz.edu.tr
3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - elbe80@gmail.com

fundamental diagram of a traffic stream and also to estimate flow speeds (journey times) over a highway stretch.

Keywords: Highway traffic flow, vehicle trajectories, non-stationary time series, shock waves, wavelet transform.

1. GİRİŞ

Karayolu taşıtlarının birlikte hareket etmesi karayolu trafik akımlarını oluşturur. Trafik akımları; trafik talebine, akışın gerçekleştiği karayolunun geometrik özelliklerine, taşıt kompozisyonuna, sürücü davranışlarına, trafik yönetim tarzına ve hava koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Türetilmiş değişkenler olarak adlandırılan, trafiğin akım, hız ve yoğunluk büyüklükleri, bu sayılan etkilerle değişir. Trafik akımının değişkenleri kendi aralarında da ikili fonksiyonel ilişkilere sahip olup, birbirlerini etkilerler. Bu ikili ilişkilere dayanarak geliştirilen trafik akım modelleri saha gözlemleriyle uyumlu olmalıdır. Trafik akımlarına ilişkin gözlemler, hem trafik akışının işleyişine açıklamalar getiren yeni modeller geliştirmek hem de geliştirilen modellerin geçerliliğini sınamak için yapılır. Trafik akım modelleri, karayolu planlaması ve işletimi çalışmalarının gerçekleştirilmesinde kullanılan faydalı araçlardır. Bu nedenle, akım modellerini destekleme işlevini yerine getiren deneysel (ampirik) çalışmalar, trafik mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir.

Günümüzde trafik akışına ilişkin saha ölçümleri elle ya da çeşitli teknolojik araçlar yardımıyla yapılabilmektedir. Elle yapılan ölçümler, teknolojik destek bulunmaması durumunda ya da araştırmanın gerektirdiği özel koşullar sebebiyle uygulanır. Bu yöntem, koşullara göre şekillendirilebilen esnekliğe sahiptir, ancak veri toplama süreci zahmetlidir. Teknoloji kullanılarak veri toplamada algılayıcılardan (detektörlerden) faydalanılır. Bu yöntemle çeşitli akım verileri sürekli olarak ölçülebilir. Ölçülen veriler, akıllı ulaşırma sistemleri gibi gerçek zamanlı işletim uygulamalarında kullanılabilirdiği gibi, saklanmak suretiyle daha sonraki ulaşırma planlaması ve trafik akımı modellemesi gibi çalışmalarda değerlendirilebilir.

Trafik akışına ilişkin veriler sahadan zaman serileri biçiminde toplanabilir. Böylece, akım, hız ve işgal oranı (yoğunluğun birimsiz biçimi) için sayısal değerler zamana bağlı olarak ölçülür. Ölçüm aralığı çalışmanın amacına göre seçilir (örneğin, 5 sn'den 60 dak'ya kadar çeşitli aralıklarda ölçümler yapılabilir). Zaman serisi biçimindeki trafik akış verilerinin incelenmesiyle, akım büyüklüklerinin zamansal ve mekânsal sayısal değerleri elde edilebilir. Örneğin, belirli bir otoyol, arter ya da kavşağın girişinde trafik talebinin değişimi zamana göre ölçülebilir. Bir darboğazın yeri ve aktifleşme zamanı ile kapasitesi, trafik akışının zaman serileri ile saptanabilir. Trafik akışı içindeki kinematik dalgaların oluşumu, yayılımı ve özellikleri (genlik değişimi ve yayılma hızı) zaman serileri yardımıyla incelenebilir. Trafik akımını oluşturan taşıtların yörüngelerindeki zaman ve konum verileri, taşıt takip ve şerit değiştirme düzenlerine ilişkin zengin bilgiler içerir. Trafik akışına ilişkin bazı özellikleri zaman serilerinden elde etmek için, geliştirilmiş çeşitli tekniklerden yararlanılabilir. İstatistik ve sinyal işleme, yaygın olarak kullanılan tekniklere temel oluştururlar. Yığılımlı (kümülatif/birikimli) taşıt sayılarının zamana göre değişimini gösteren ölçeklendirilmiş eğriler kullanılarak, trafik akışına ilişkin bazı özelliklerin elde edilebildiği [1] ve [2] çalışmalarında gösterilmiştir. Ardışık istasyonlarda ölçülen yığılımlı taşıt sayılarının 5 dakikalık hareketli ortalamaları hesaplanarak çizilen grafikler yardımıyla,

trafik akışı içinde ortaya çıkan salınımların (oscillations) oluşumu, yayılımı, büyümesi ve sönümlenmesini incelemek, bir başka çalışmaya konu olmuştur [3].

Bu çalışmada, trafik akımının bazı özelliklerinin dalgacık dönüşümü (wavelet transform) tekniği kullanılarak trafik akışı zaman serilerinden nasıl elde edilebileceği gösterilmektedir. Dalgacık dönüşümünün trafik mühendisliğindeki öncü uygulamaları arasında Adeli ve Karim tarafından kaleme alınan “Akıllı Ulaştırma Sistemlerinde Dalgacıklar” adlı kitap bulunmaktadır [4]. Yazarlar, bu çalışmalarında, ayrık (discrete) dalgacık dönüşümü tekniğini bulanık mantık ve yapay sinir ağlarıyla birleştirerek, kaza-arıza (olay/incident) yönetiminde algılayıcı olarak kullanmışlardır. Dalgacık dönüşümünün otoyol trafiğindeki darboğazların incelenmesine, akım rejiminin değişimine ve trafikteki salınımların analizine ilişkin uygulamaları, tekniğin işlevliliğini göstermesi bakımından önemlidir [5]. Zheng ve Washington [6] trafik akışı ve taşıt yörüngesi verilerindeki ani değişimleri algılamak için en uygun dalgacık tipinin seçilmesine ilişkin kapsamlı bir çalışma yapmışlardır.

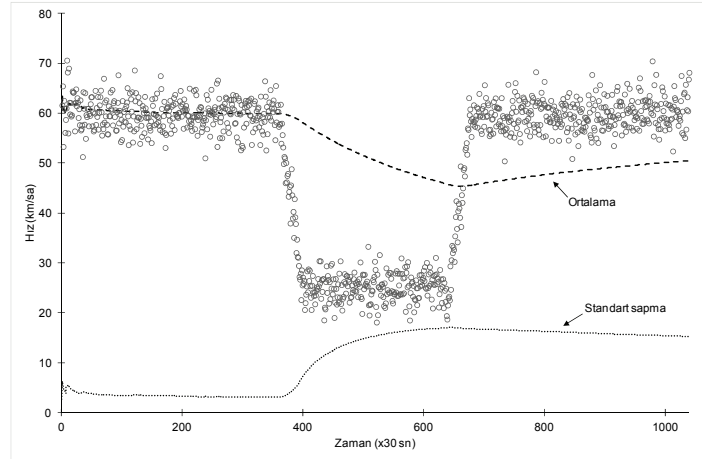
Bu çalışmanın ikinci bölümünde, durgun olmayan zaman serilerinin ve dalgacık dönüşümünün temel özellikleri anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde, dalgacık dönüşümünün bir otoyol kesimindeki trafik akışına ait makroskobik ve taşıt yörüngelerine ait mikroskobik zaman serisi verilerine uygulanmasına ilişkin örnekler kapsamında, özellikle şok dalgalarının oluşması ve yayılmasına ilişkin elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Dördüncü bölümde, kinematik dalgaların, trafiğin temel diyagramı bağlamında, trafik akım modellerinde nasıl kullanılabilirliğine dair değerlendirmeler yapılmaktadır. Son bölümde, trafik mühendisliğinde ampirik çalışmaların önemine değinilmekte, dalgacık dönüşümü yönteminin trafik akışı zaman serilerine uygulanmasına ilişkin genel değerlendirmeler yapılmakta ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

2. DURGUN OLMAYAN ZAMAN SERİLERİ VE DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ

Trafik akışına ilişkin zaman serileri (örneğin, hız–zaman serileri), özellikle zaman çözünürlüğü yüksek olduğunda gürültü içerirler (örneğin, anlık ölçülen ya da birkaç saniye aralığında toplulaştırılmış veriler). Zaman çözünürlüğü azaldığında, örneğin bir karayolu kesitinden geçen taşıtların noktasal hızları 5 dakika aralıklarla ölçülüp, her aralıktaki ölçümlerin ortalaması alındığında, ölçülen farklı taşıt hızlarının değişkenliği (yani, gürültüsü) bastırılır ve tüm aralığı temsil eden tekil bir ortalama değer elde edilir. Ancak bu durumda, hızdaki değişkenliğin barındırdığı bazı bilgiler ortalamanın içine gömülerek kaybolabilir. Gerçek yaşamdaki zaman serileri, istatistiksel özelliklerinin çoğunlukla zamana göre değişkenlik göstermesinden dolayı, durgun olmayan (non–stationary) serilerdir. Trafik akışının makroskobik büyüklükleri olan akım, hız ve işgal oranı ile taşıt hareketlerinden (yörüngelerinden) elde edilebilen mikroskobik büyüklükler olan konum, hız ve ivme, zaman içinde ani değişimler (sıçramalar) sergilediklerinden, durgun olmayan zaman serileri oluştururlar. Bu tür serilerin zaman ve frekans özelliklerinin birlikte elde edilmesi için, son yıllarda, dalgacık dönüşümü tekniği kullanılmaya başlanmıştır. Bu bölümde zaman serilerinin durgun olmama özellikleri ve bu serilerin dalgacık dönüşümü tekniğiyle zaman–frekans düzlemindeki (time–frequency domain) analizleri anlatılmaktadır.

2.1. Durgun Olmayan Zaman Serileri

Trafik akışını temsil eden türetilmiş trafik değişkenleri (akım, hız, yoğunluk vd.) rastgele değişkenler olup, belirli bir anda ölçüldüğünde ya da kısa zaman aralıklarıyla toplanmış (aggregate) olarak ölçüldüğünde, zaman serisi oluştururlar. Ölçümlerin herbiri ilgili trafik değişkeninin rassal süreçte (stochastic process) gerçekleşmesiyle elde edilir. Bu bağlamda, bir süreci temsil eden zaman serisinin durgun (durağan/stationary) olma özelliği, ortalama ve standart sapma gibi istatistiksel parametrelerinin zaman içinde sabit olmasına bağlıdır [7]. Trafik verileri genellikle durgun olmayan özelliklere sahiptirler (örneğin, ölçümdeki ani sıçramalar gibi). Trafik talebindeki ve darboğaz kapasitesindeki değişme, katılma ve ayrılma kesimleri, şerit değiştirmelerde ve taşıt takibindeki sürücü davranışları, akımdaki salınımdan kaynaklanan dur kalk hareketleri, trafik akışını etkiler ve onu durgun olmayan bir sürece dönüştürür [5]. Durgun olmayan zaman serilerini durgunlaştırmak için çeşitli teknikler (hareketli ortalama, üstel yumuşatma vd.) geliştirilmiştir [8]. Ancak, durgunlaştırma işlemi, trafik akımının bazı özelliklerini bastırarak veri/bilgi kaybına yol açabilir. Bu nedenle, durgun olmayan “ham” verilerle çalışmak gerekebilir. Şekil 1’de bir karayolu kesitindeki trafik akımının yapay olarak üretilmiş hız–zaman serisi (speed–time series) görülmektedir. Gözlem süresi içinde akım hızı önce ani olarak nitelenebilecek tarzda azalmakta, bir süre sonra yine ani olarak artmaktadır. Bu hız değişim tarzı, darboğaz bulunan karayollarında sıkça görülür. Şekildeki küçük daireler sabit uzunluktaki zaman aralıklarında ölçülen ortalama hızları temsil etmektedir. Şekilde, hız–zaman serisinin yığışlı (kümülatif) ortalama ve standart sapma grafikleri de gösterilmiştir. Hız–zaman serisinin yığışlı ortalama ve standart sapmasının zaman içinde değişmesi, hızın zamansal sürecinin (değişmesinin) durgun olmadığını gösterir. Zaman serisinin yığışlı ortalama ve standart sapması, sırasıyla, (1) ve (2) eşitliklerinden elde edilmiştir [9]. Eşitliklerde, t anında/aralığında ölçülen hız x_t , örnek/aralık boyutu n olmak üzere, yığışlı değerler, gözlemin ilk değerinden ($n = 1$) son değerine ($n = N$) kadar adım adım ilerletilerek elde edilmiştir. İzleyen bölümde durgun olmayan zaman serilerinin dalgacık dönüşümü tekniğiyle zaman–frekans düzlemindeki analizleri anlatılmaktadır.



Şekil 1. Durgun olmayan hız–zaman serisi

$$\bar{x} = \sum_{t=1}^n \frac{x_t}{n} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\sum_{t=1}^n \frac{(x_t - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

2.2. Dalgacık Dönüşümü

Mühendislerin sinyalleri yorumlama biçimi Fourier dönüşümü (Fourier transform) sayesinde yenilenmiştir; ancak, bu yöntemle bir sinyali trigonometrik temel fonksiyonlarına ayırarak zamana bağlı değişen özelliklerini elde etmek olanaksızdır. Fourier temel fonksiyonları frekans odaklı olup zaman bilgisinden yoksundur. Bu dönüşüm tekniği, zaman serilerinde ani bir değişme olup olmadığını söyleyebilmekte, ancak değişimin ne zaman gerçekleştiğini söyleyememektedir. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü (short time Fourier transform) bu eksikliği gidermeye yönelik olsa da, elde edilen çözünürlük sınırlıdır [10]. Ayrıca, Fourier dönüşümünün sinyaldeki gürültülere duyarlı olması ve lineer olmayan problemlerde iyi sonuçlar vermemesi nedeniyle, zaman–frekans analizi için başka yöntemler aranmıştır. Böylece, hem zaman hem de frekans düzleminde uygun temel fonksiyonlar oluşturup, çeşitli çözünürlüklerde analiz yapılabilmesine olanak tanıyan dalgacık dönüşümü geliştirilmiştir. Bu teknikle, zaman serilerindeki ani değişimler gerçekleşme zamanıyla birlikte saptanabilmektedir.

Dalgacık, gerçek ya da kompleks bir matematiksel fonksiyon $\psi(t)$ olup, sürekli zaman serilerini çeşitli ölçek bileşenlerine dönüştürebilir. Bu çalışmada kullanılan gerçek dalgacıklar aşağıdaki iki temel koşulu sağlarlar [5]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (4)$$

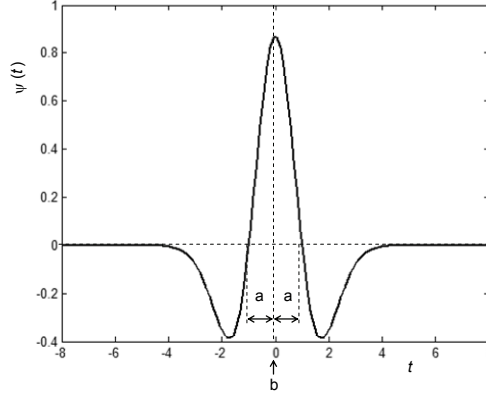
Eşitlik (3) dalgacık fonksiyonunun sıfır ortalamaya sahip olması gerektiğini gösterir. Dalgacık enerjisini ifade eden Eşitlik (4) enerjinin sonlu büyüklükte olduğunu belirtir.

Dalgacık dönüşümü doğrusal bir dönüşüm olup, bir $x(t)$ sinyalini temel fonksiyonlar aracılığıyla parçalara ayırır. Bu temel fonksiyonlar, ebeveyn dalgacık $\psi(t)$ fonksiyonunun genişmesi (frekans/ölçek düzleminde) ve ötelenmesi (zaman düzleminde) yoluyla oluşturulur. Sürekli bir $x(t)$ sinyalinin dalgacık dönüşüm katsayısı (çıktısı) sürekli dalgacık dönüşümü (continuous wavelet transform) olarak adlandırılır ve aşağıdaki Eşitlik (5) ile tanımlanır:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

Sinyalin periyodik ya da harmonik doğasını temsil eden ölçek parametresi a , frekans ile ters orantılı olup, dalgacığın genişmesi (dilation) veya büzülmesini (contraction) kontrol eder. Dalgacığın zaman boyutunda hareketini sağlayan b , öteleme (shift/translation) parametresidir. Eşitliğin başındaki $1/\sqrt{a}$ katsayısı, tüm ölçeklerdeki dalgacıkların aynı enerjiye sahip olmasını sağlar. Parametre $a = 1$ ve $b = 0$ olduğunda, $\psi(t)$ ana dalgacık olarak adlandırılır. Dalgacık katsayıları $W(a, b)$, b anında ve a ölçeğinde (frekansında), genişmiş/ötelenmiş ebeveyn dalgacık ile orijinal sinyal arasındaki benzerliğin ölçüsünü temsil eder.

Dalgacıklar ailesi içinde çeşitli dalgacık fonksiyonları bulunmaktadır (örneğin, Haar, Daubechies, Gauss, Morlet, Coiflets, Mexican Hat vd.). Bu dalgacıkların çoğu çeşitli sinyal türleri için benzer sonuçlar vermektedir. Zheng ve Washington [6] bu aile üyelerinden bir kısmını hız-zaman trafik akımı zaman serisi verilerinin dönüşümü için uygulamışlardır. Yazarlar, hızın ani olarak değiştiği zamanları en az hata ile saptayan ve ürettiği enerjinin bilgi içeriği en yüksek olan (yani, en küçük Shannon entropisine sahip) dalgacığı seçmişlerdir. Yapılan testler sonunda, en uygun dalgacığın Mexican Hat olduğunu saptamışlardır. Mexican Hat dalgacığının bir örneği Şekil 2'de gösterilmiştir (dalgacığın biçimi geleneksel Meksika şapkasına benzediği için bu adı almıştır). Bu çalışmadaki dönüşümlerde Mexican Hat dalgacığı kullanılmıştır.



Şekil 2. Mexican Hat ana dalgacığı

Eşitlik (6) Mexican Hat dalgacığının matematiksel ifadesidir. Dikkat edilirse ana Mexican Hat dalgacığı, $e^{-\frac{t^2}{2}}$ Gauss fonksiyonunun ($a = 1$ ve $b = 0$ için) ikinci türevidir [11].

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = -\frac{d^2}{dt^2} e^{-\frac{\left(\frac{t-b}{a}\right)^2}{2}} = \left[1 - \left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right] e^{-\frac{\left(\frac{t-b}{a}\right)^2}{2}} \quad (6)$$

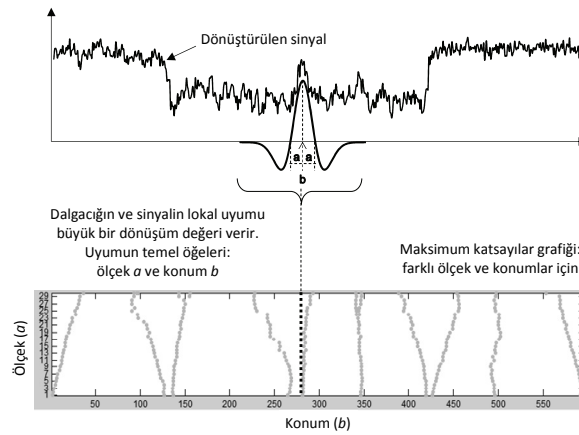
Örneğin, sürekli bir sinyal fonksiyonu olan $v(t)$ hız-zaman serisinin dalgacık dönüşüm katsayısı ifadesi (7) şu şekilde elde edilir:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \left[1 - \left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right] e^{-\frac{\left(\frac{t-b}{a}\right)^2}{2}} dt \quad (7)$$

Buradan, b anındaki ortalama dalgacık temelli enerji, farklı ölçekler için hesaplanan dalgacık dönüşüm katsayılarından yararlanılarak hesaplanır (8):

$$E_b = \frac{1}{\text{maks}(a)} \int_1^{\text{maks}(a)} |W(a,b)|^2 da \quad (8)$$

Burada, $\text{maks}(a)$ seçilen en büyük ölçek olup, genel enerji görünümünün bozulmadan (distortion) kaldığı en üst değer olarak seçilir. Ötelenme değeri b , orijinal sinyalin zaman çözünürlüğüne bağlı olarak, tüm zaman adımlarında enerji hesaplanacak şekilde belirlenir. Enerji birimsiz bir büyüklüktür. Hız sinyalinin zaman içinde ani değişimi, (8) eşitliğinde hesaplanan dalgacık temelli enerjinin zamansal dağılımında ani bir artışa yol açar. Böylece, enerji dağılımı takip edilerek, trafikteki kuyruklanmanın başlaması, çözülmesi ve salınım dalgalarının (oscillation waves) geçişi ile ilişkili ani hız değişimleri saptanabilir [12]. Kaynak [13]'ten esinlenilerek Mexican Hat dalgacığı ile yapılan dönüşüm işleminin genel bir temsili Şekil 3'te gösterilmiştir.



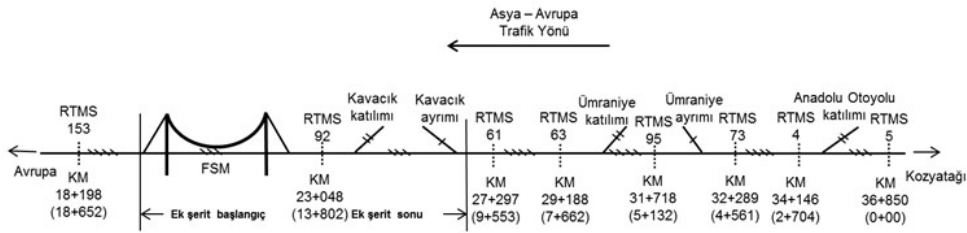
Şekil 3. Mexican Hat dalgacık dönüşümü ve elde edilen maksimum katsayılar grafiği

3. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ UYGULAMALARI

3.1. Karayolu Darboğazlarında Oluşan Şok Dalgaları – Makroskobik Ölçek

Çalışılan saha ve veriler

Çalışma kapsamında, TEM İstanbul içi geçişi (2. Çevreyolu), Fatih Sultan Mehmet köprüsü Asya–Avrupa yönüne ait algılayıcı (detektör) verileri, dalgacık dönüşümü yöntemiyle incelenmiştir. Trafik akışına ilişkin makroskobik ölçekteki bu veriler, YTÜ’de hazırlanmış bir yüksek lisans tezi kapsamında kullanılmıştır. Söz konusu tezde, akşam zirve trafik talebini karşılamak amacıyla, 2. Çevreyolunda yapılan ek şerit uygulamasının çeşitli senaryolar için verimliliği incelenmiştir [14]. Avrupa–Asya yönündeki zirve talebi karşılamak için, Asya–Avrupa yönündeki en sol şerit ödünç alınıp diğer yöne tahsis edilmektedir. Çalışmada kullanılan veriler, 21 Şubat 2008 tarihinde, akşam zirve saatlerde (yaklaşık 16:10 ve 21:10 arasında), Asya–Avrupa yönündeki trafiğe aittir. Verilerin toplandığı gün hava yağışsız ve açıktır. Veri toplama araçları olan algılayıcılar, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından işletilen RTMS (Remote Traffic Microwave Sensor) radar detektörleridir. Bu detektörler, 2 dakika çözünürlükle, ölçüm yapılan yol kesitindeki tüm şeritler için ortalama hız ve toplam hacim verilerini toplamaktadır. Çalışılan sahanın krokisi, RTMS numaraları ve konumları (km) ile birlikte Şekil 4’te gösterilmiştir (krokide trafiğin akış yönündeki ilk RTMS başlangıç kabul edilerek belirlenen km’ler parantez içinde yazılmıştır).

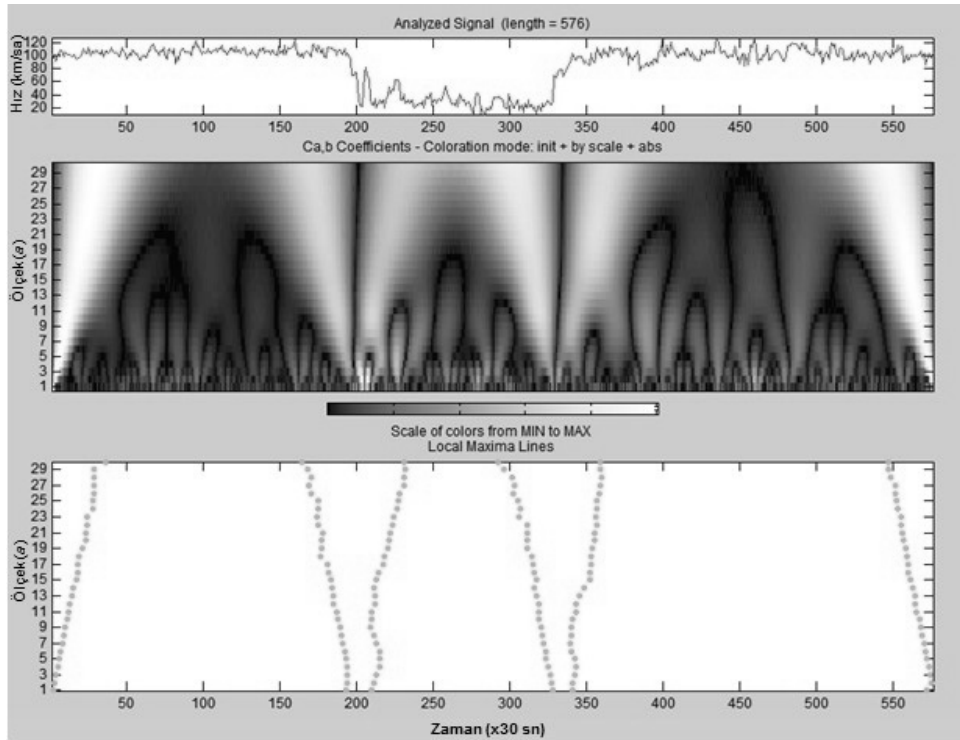


Şekil 4. Çalışılan saha ve RTMS konumları

Akşam saatlerinde Avrupa–Asya yönüne ek kapasite sağlayan bu uygulama sonucunda, Asya–Avrupa yönünde (şerit sayısındaki azalma nedeniyle) uzun taşıt kuyrukları oluşmaktadır. Aşağıdaki uygulamada gösterildiği gibi, kuyruklanma etkisi ilk olarak köprü girişinden hemen önce, 92 numaralı RTMS tarafından algılanmakta ve serbest akım koşulları ile tıkanıklık koşulları arasındaki arayüz (interface), şok dalgası biçiminde, akım yukarı doğru (trafik akımına ters yönde) yayılmaktadır. Akım yukarı doğru yayılan arayüzün ulaştığı kesitlerde akım hızı ani olarak düşmektedir. RTMS’lerin bulunduğu yol kesitlerindeki bu ani hız değişmelerinin zamanları, dalgacık dönüşümü yöntemiyle saptanabilmektedir.

Dalgacık dönüşümünün uygulanması için, bir matematik paket programının dalgacık dönüşümü araç kiti/paketi kullanılmıştır (Wavelet Toolbox). Bu pakete, RTMS’den elde edilen hız–zaman serisi bir sinyal fonksiyonu olarak tanıtılmaktadır. Paket, otomatik olarak, kullanıcı tarafından belirlenmiş en büyük ölçek (a_{maks}) ile kullanıcı tarafından belirlenmiş

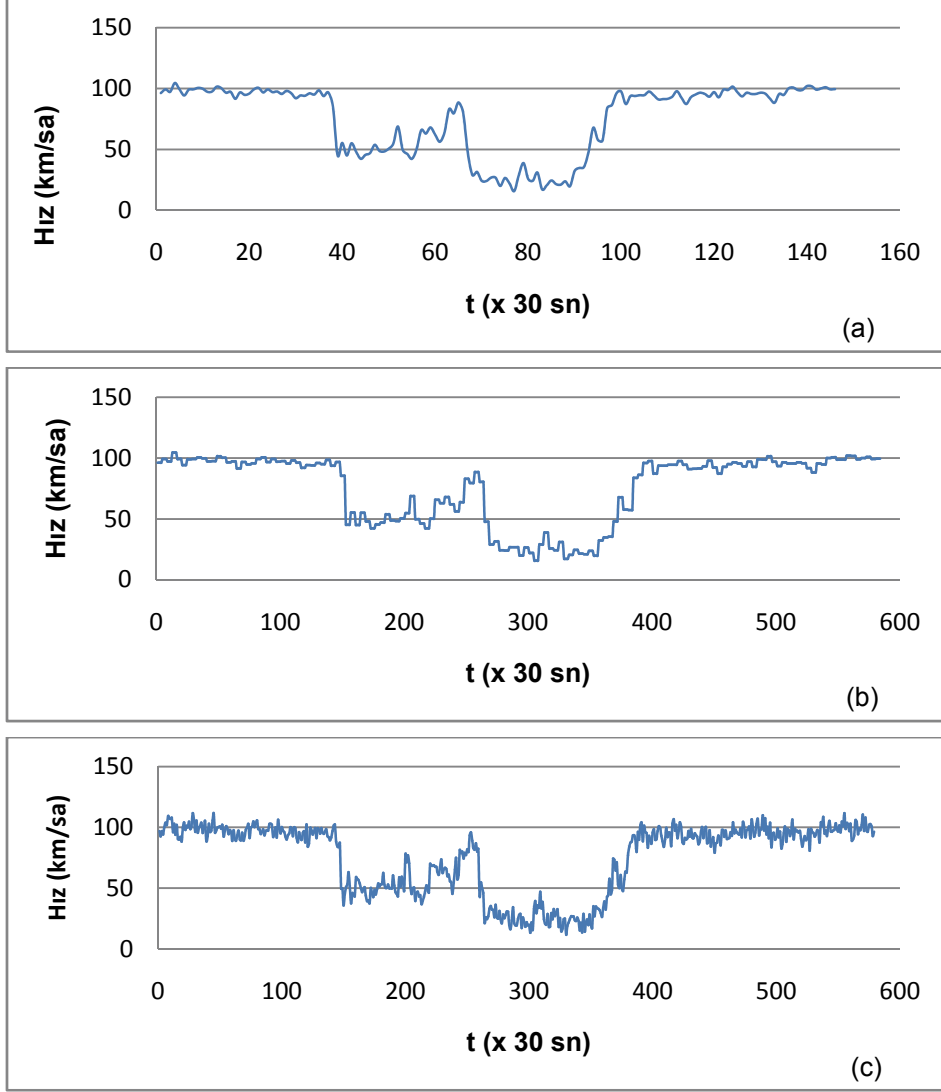
türdeki (bu çalışmada Mexican Hat) dalgacık dönüşümünü gerçekleştirmekte, dalgacık katsayıları matrisini ve yerel maksimum katsayı eğrilerini vermektedir. Şekil 5'te, 63 numaralı RTMS'in ölçtüğü hızların dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen ekran görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde, alt alta sıralanmış üç adet grafik bulunmaktadır. En üstteki grafik pakete tanıtılan hız–zaman serisi sinyal fonksiyonunu, ortadaki grafik katsayı matrisinden faydalanarak oluşturulan kontur grafiğini (açık renkli bölgeler en büyük katsayıları gösterir), en alttaki grafik ise yerel maksimum katsayı çizgilerini göstermektedir.



Şekil 5. 63 numaralı RTMS verisi için dalgacık dönüşümü araç kitinin ekran görüntüsü

Dalgacık dönüşümü uygulaması: Makroskobik ölçek

Çalışmada kullanılan hız–zaman serilerinin uzunluğu yaklaşık 300 dakikadır. Veriler 2'şer dakika aralıklarla toplandığından, zaman serilerinde yaklaşık 150 veri noktası bulunmaktadır (Şekil 6a). Her aralıkta, aralık boyunca radar kesitinden geçen taşıtların ölçülen noktasal hızlarının ortalaması hesaplanarak, aralığı temsil eden hız belirlenir. Yapılan ilk denemelerde, dalgacık dönüşümünün sağlıklı sonuç verebilmesi için, çok sayıda veri noktasına gereksinim duyduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, hız–zaman serilerindeki veri sayısı, verinin genel niteliğini bozmayacak şekilde, yapay olarak artırılmıştır. Verilerin 30 saniye çözünürlüğe sahip olmasının yeterli sayıda veri noktası üreteceğine karar verilmiştir.



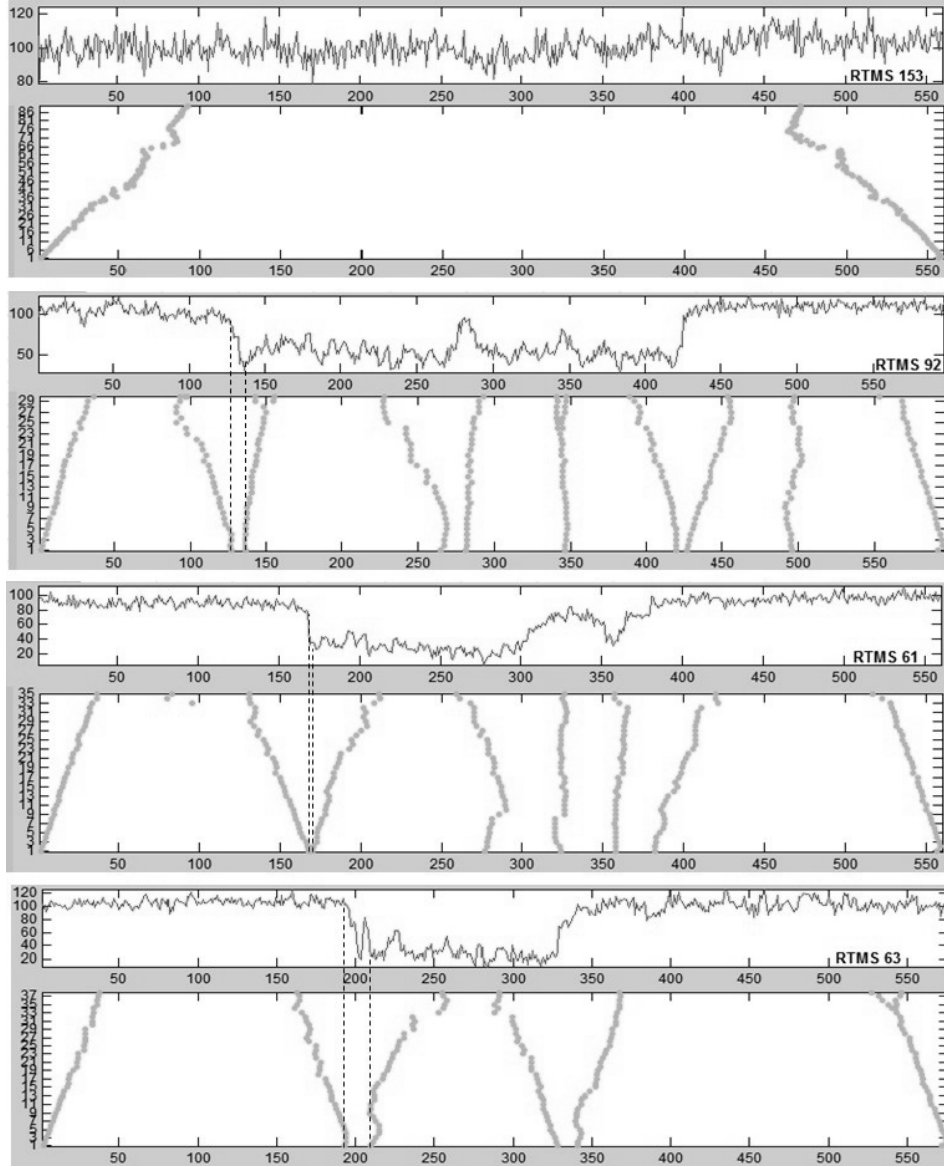
Şekil 6. (a) 4 numaralı RTMS detektöründen elde edilen ham hız verileri; (b) ham hız verilerinden türetilmiş 30 saniye çözünürlüklü hız verileri ; (c) 30 saniye çözünürlüklü, gürültü eklenmiş hız verileri

Bu işlem için, akım hızının iki dakikalık dilimlerde sabit olduğu kabul edilmiş ve her aralık 30'ar saniyelik dört dilime bölünmüştür. Böylece, iki dakika uzunluğundaki her aralık, sayısal değeri birbirine eşit 4 veri haline getirilmiştir (Şekil 6b). Orijinal hız verileri iki dakika aralıklarda ortalaması alınıp toplulaştırılarak, gerçekte gürültülü olan hız ölçümleri düzeltilmiş olur. Düzeltilmiş verileri gerçeğe yaklaştırmak için, çözünürlüğü artırılan hız-zaman verilerine sinyal gürültü oranı (SNR – signal-to-noise ratio) 25 olan gürültü

eklenmiştir (Şekil 6c). Aslında, dalgacık dönüşümü tekniği bakımından, zaman serisinin çözünürlüğünün artırılması, gürültü eklemekten çok daha etkilidir. Hatta gürültü eklenmiş ve eklenmemiş dönüşümler arasında neredeyse fark yoktur. Çalışmanın bu bölümünde kullanılan hız–zaman serilerinin çözünürlüğü artırılmış ve bunlara gürültü eklenmiştir.

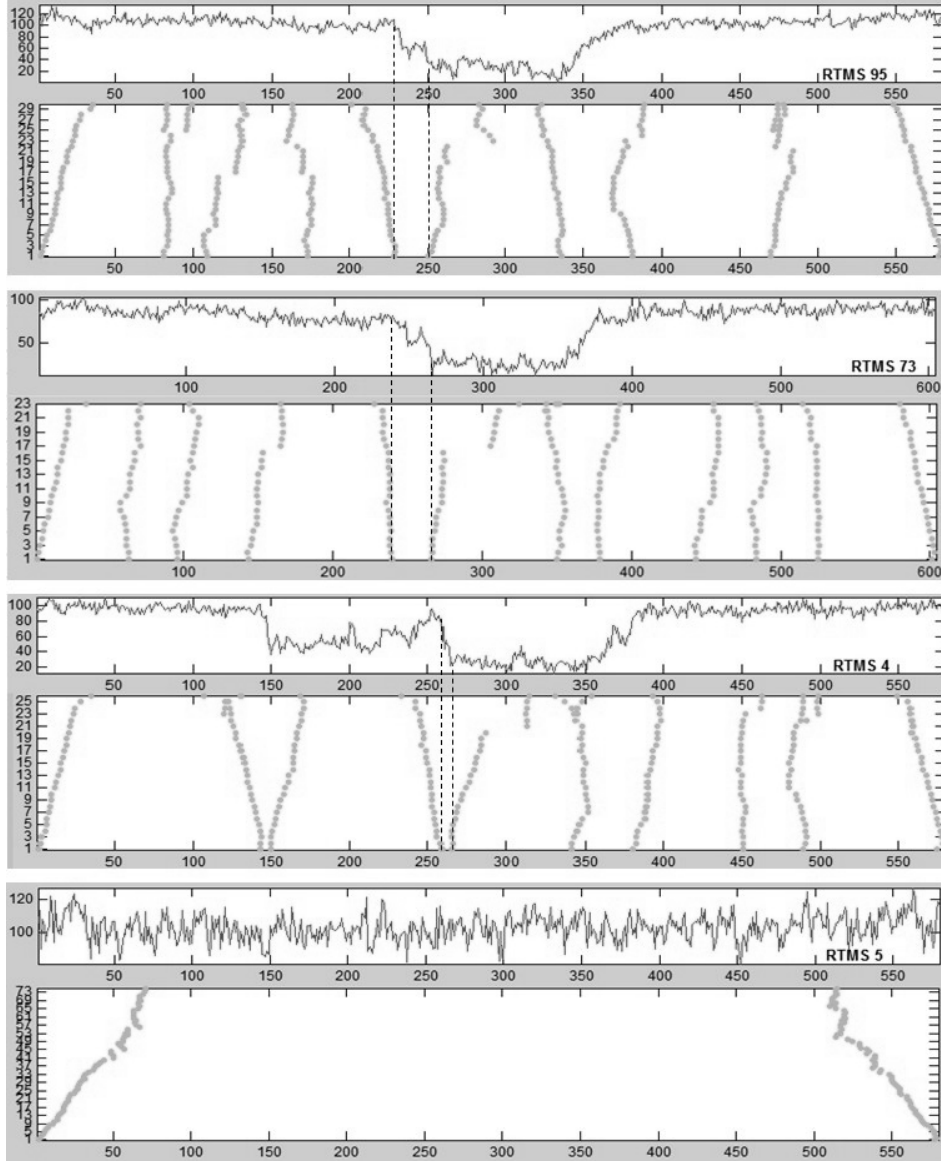
Şekil 7’de, incelenen altı RTMS’e ait hız–zaman serisi grafikleri (sinyalleri) üstte ve ilgili dalgacık dönüşümünden elde edilen yerel maksimum katsayı çizgileri altta gösterilmiştir. Kesimin en akım aşağısında bulunan 153 ve en akım yukarısında bulunan 5 no’lu RTMS kesitlerinde, belirgin bir hız azalması görülmemekte, akım yaklaşık 100 km/sa hızla hareket etmektedir (Şekil 7’de en üstte ve en altta). Bu radar istasyonlarına ait dalgacık dönüşümü katsayı grafiklerinden (sinyalin uçlarına karşılık gelen) alt köşelerinden uzanan çizgiler, literatürde “sınır etkisi” (boundary effect) adı verilen olgu nedeniyle görülür. İncelenen sinyal sonlu uzunlukta olup, sınırların dışında kalan değerler sıfır kabul edilir. Bu nedenle, sinyalin uç noktalarında sıfırdan gerçek sinyal değerine sıçrama olduğundan, bu noktalarda büyük dalgacık dönüşüm katsayıları elde edilir. Yerel maksimum katsayı çizgilerinin yataydaki zaman eksenini kestiği noktalar (yani $a = 1$ ölçeğinde), hızdaki ani değişikliğin başladığı anı ya da ani değişiklikten sonra, hızın yeniden durgunlaştığı (kararlı hale geldiği) anı işaretlemektedir [6]. Bu zamanlar, trafiğin serbest ve zorlamalı durumları arasındaki geçiş zamanlarını işaret ederler. Diğer RTMS istasyonlarından elde edilen hız–zaman serisi grafikleri incelendiğinde, en küçük ölçekteki yerel maksimum noktaların, zaman serilerinde gözlenen hız değişim anlarını oldukça yüksek bir hassasiyetle yakaladığı görülmektedir. Verilerden üretilen bu bilgi, trafik mühendisliği için kıymetli ve karayolu işletimindeki karar verme süreci bakımından önemli bir girdidir. Bu sonuç, şok dalgalarının ve/veya farklı akım durumları arasındaki arayüzlerin oluşma anlarını ve yayılma hızlarını hesaplamak için dalgacık dönüşümünün kullanılabilceğini göstermektedir.

RTMS kesitlerinde dalgacık dönüşümüyle belirlenen hız değişme zamanları (hızın ilk düşmeye başladığı ve ardından neredeyse sabitlendiği zamanlar) Çizelge 1’de verilmiştir. Dalgacık dönüşüm işleminden, ilgili radar istasyonlarında hızın ilk düşmeye başladığı ve ardından neredeyse sabitlendiği zamanlar elde edilebilmektedir. Radar istasyonlarının trafik akış yönündeki konumlarının (RTMS 5 başlangıç kabul edilerek) düşey ekseninde ve şok dalgalarının istasyonlardan geçiş zamanlarının yatay ekseninde bulunduğu bir saçılma grafiği çizildiğinde, ilgili veri çiftlerine karşılık gelen noktaların üzerine yerleştirilen eğilim (regresyon) doğrularının eğimi, ortaya çıkan şok dalgalarının (kinematik dalgaların) ortalama hızını verir. Bu işlemler yapıldığında Şekil 8’de gösterilen grafikler elde edilmiştir. Şekilde içi dolu yuvarlaklar (●) ilgili radar istasyonunda hızın ilk düşmeye başladığı noktaları, üçgenler (▲) ise hızın neredeyse sabitlendiği noktaları temsil etmektedir. Her iki eğilim doğrusu da yüksek belirlilik katsayılarına (R^2) sahiptir. Eğilim doğrularının eğimleri şok dalgalarının ortalama hızlarıdır (negatif hız, şok dalgalarının trafik akımının ters yönünde yayıldığını gösterir). Trafik akımı içinde oluşan şok dalgaları, akışın makroskobik büyüklüklerini etkileyebildiği gibi, kendi yayılma hızı da bir makroskobik büyüklüktür. Tahmin edilen şok dalga hızları, hızın ilk düşmeye başladığı ve sabitlendiği anlar (yani, serbest akımdan zorlamalı akıma geçiş) için, sırasıyla, –11,61 ve –10,73 km/sa olarak hesaplanmıştır. Bu hızlar [5] çalışmasında tahmin edilen hızlarla (sırasıyla –11,78 km/sa ve –11,71 km/sa) uyumludur.



Şekil 7. İncelenen RTMS'lere ait hız-zaman serileri ve yerel maksimum katsayı çizgileri

NOT: Üstteki hız-zaman serisi sinyalinde düşey ekseninde hız (km/s) ve yatay ekseninde zaman ($t \times 30$ sn); alttaki yerel maksimum katsayı grafiğinde düşey ekseninde ölçek (a) ve yatay ekseninde zaman ($t \times 30$ sn) gösterilmiştir.

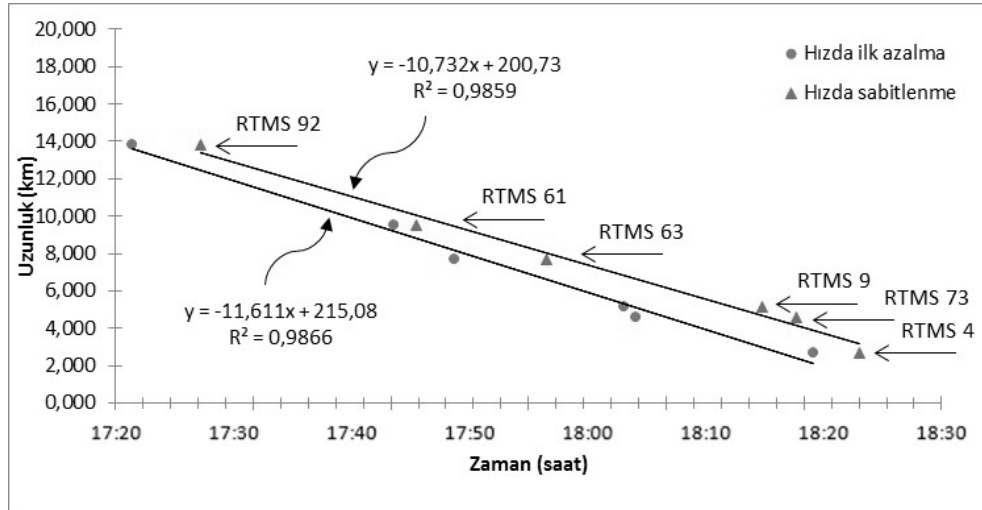


Şekil 7. İncelenen RTMS'lere ait hız-zaman serileri ve yerel maksimum katsayı çizgileri (devam)

NOT: Üstteki hız-zaman serisi sinyalinde düşey ekseninde hız (km/sa) ve yatay ekseninde zaman ($t \times 30$ sn); alttaki yerel maksimum katsayı grafiğinde düşey ekseninde ölçek (a) ve yatay ekseninde zaman ($t \times 30$ sn) gösterilmiştir.

Çizelge 1. RTMS kesitlerinde hız değişme zamanları

RTMS No	Hızın ilk düşmeye başladığı zaman	Hızın neredeyse sabitlendiği zaman
153	-	-
92	17:21:15	17:27:15
61	17:44:03	17:46:03
63	17:49:23	17:57:22
95	18:04:10	18:16:10
73	18:05:10	18:19:10
4	18:20:36	18:24:36
5	-	-



Şekil 8. RTMS km'lerine göre hız değişme zamanları saçılma diyagramı ve eğilim doğruları

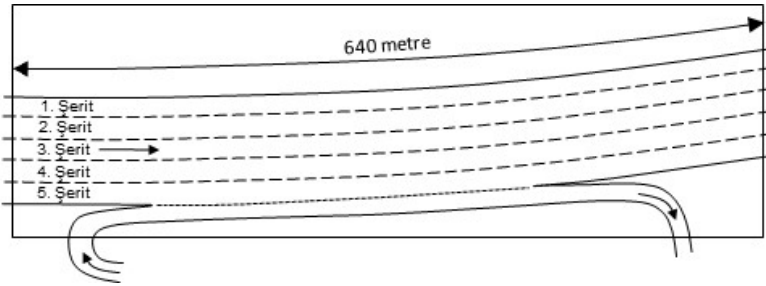
3.2. Trafik Akışında Salınımlar ve Şok Dalgaları – Mikroskobik Ölçek

Karayolu trafik akışında salınımlar (oscillations), akımın yavaşlaması ve sonra hızlanması süreçlerinin tekrarlı biçimde gerçekleşmesiyle ortaya çıkar. Makroskobik akım özelliklerinden yararlanarak trafikteki salınımların özellikleri (örneğin, oluşumu ve yayılması) incelenebilmektedir [3]. Salınımlar, mikroskobik ölçekte, taşıt yörüngeleri aracılığıyla da incelenebilir. Görüntü işleme tekniğindeki gelişmeler sayesinde, yüksek çözünürlüğe sahip taşıt yörüngeleri (vehicle trajectories) yakın geçmişte araştırmacıların kullanımına sunulmuştur [15]. Bu bölümde, taşıt yörüngelerinden elde edilen konum-

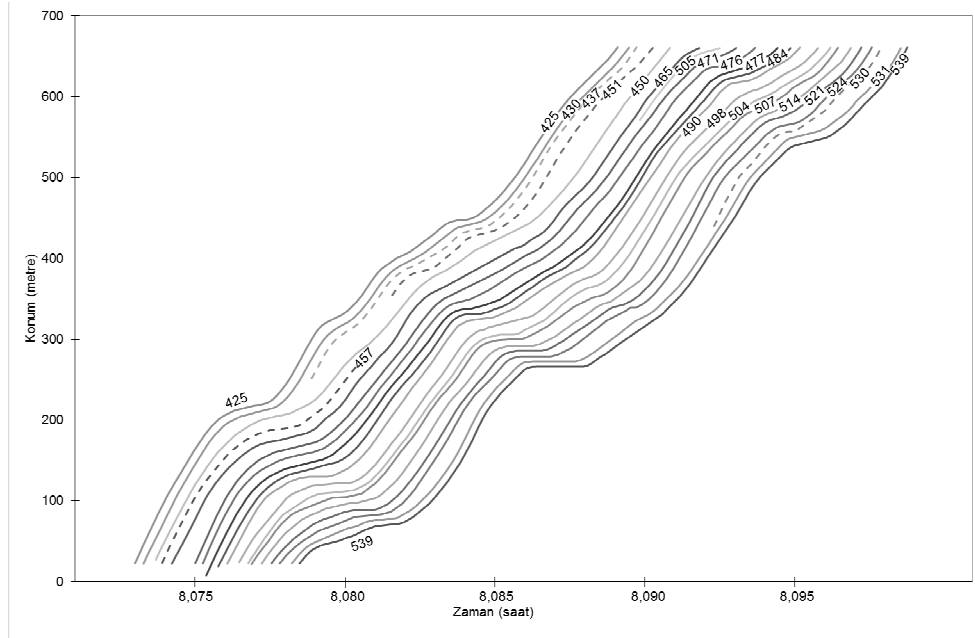
zaman serisi bilgilerinin dalgacık dönüşümü yapılarak, taşıtların hız değiştirme zamanları, şok dalgalarının oluşma nedenleri ve dalgaların yayılma hızları incelenmektedir.

Çalışılan saha ve veriler

Bu bölümde kullanılan taşıt yörüngesi verileri, ABD Ulusal Karayolları İdaresi (Federal Highway Administration, FHWA) tarafından yürütülen NGSIM (Next Generation Simulation) adlı program kapsamında, internet üzerinden araştırmacıların kullanımına sunulan verilerdir [15]. Taşıt yörüngesi verilerinin toplandığı, Los Angeles Kaliforniya’da bulunan US-101 karayolunun 640 metre uzunluğundaki güney yönüne ait kroki Şekil 9’da gösterilmiştir. Yörünge verileri saniyede 10 kayıt çözünürlükte olmak üzere 15 Haziran 2005’te sabah 7:50 ve 8:35 saatleri arasında toplanmıştır.

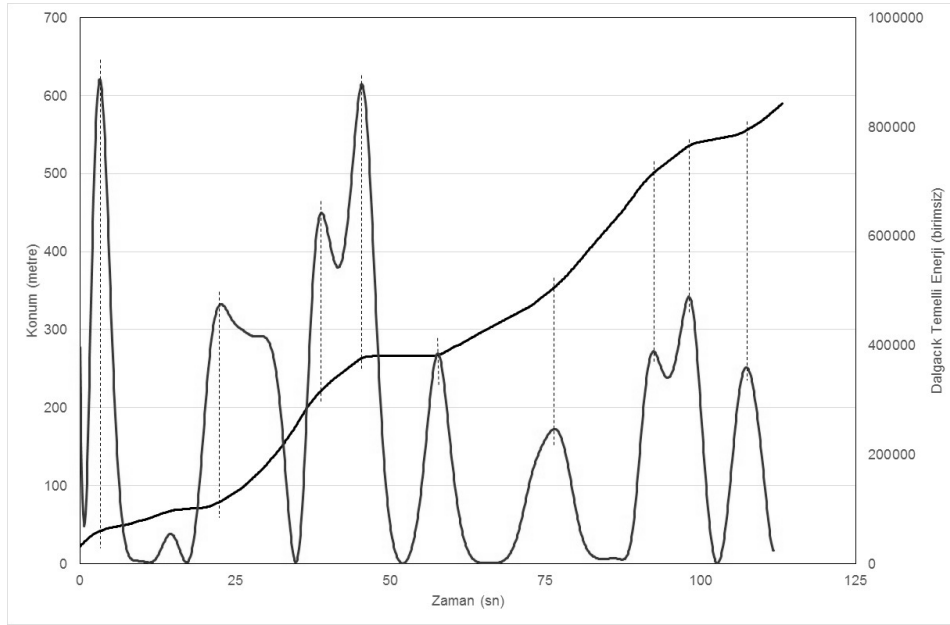


Şekil 9. US-101 karayolunun 640 metre uzunluğundaki kesiminin krokisi



Şekil 10. NGSIM kayıtlarında salınan bir grup taşıtın yörüngeleri (US-101, 1. şerit)

Taşıt hızının değişmesine bağlı olarak taşıt yörüngesindeki dalgacık enerjisinin dağılımı aracılığıyla, yavaşlama (hızlanma) dalgalarının tetiklenmesi ve yayılması saptanabilmektedir [5]. Bu bölümde, hız yerine taşıt yörüngelerinin konum bilgileri kullanılarak, benzer saptamaların yapılabileceği gösterilmektedir. Bir taşıtın yörüngesinin taşıdığı bilgilerden, konumunun (yani, taşıtın belirli bir başlangıca göre yer değiştirme büyüklüğü ya da kat ettiği yolun uzunluğunun) eğilimindeki ani bir değişme, dalgacık çerçevesinde bir enerji sıçraması üretir. Aslında, yörünge grafiğinin herhangi bir noktasındaki teğetin eğimi, taşıtın o noktaya karşılık gelen zamandaki ve konumdaki noktasal hızıdır. Taşıt hızının ani sayılabilecek şekilde değişmesi, bu enerji sıçramasının ana kaynağıdır. Ardışık taşıtların konumlarına ilişkin enerji sıçramaları takip edilerek, yavaşlama/hızlanma dalgasına neden olan ilk taşıt (ilk enerji sıçraması) ve dalganın yayılma hızı saptanabilir. Şekil 10'da US-101 karayolunun en soldaki 1. şeridinde seyreden bir grup taşıtın yörüngeleri (yol-zaman diyagramları) görülmektedir.



Şekil 11. NGSIM kayıtlarında 539 no'lu taşıtın yörüngesi (salınarak sürekli artan eğri) ve dalgacık dönüşümü temelli enerji dağılımı (dalgalı eğri) (US-101, 1. şerit)

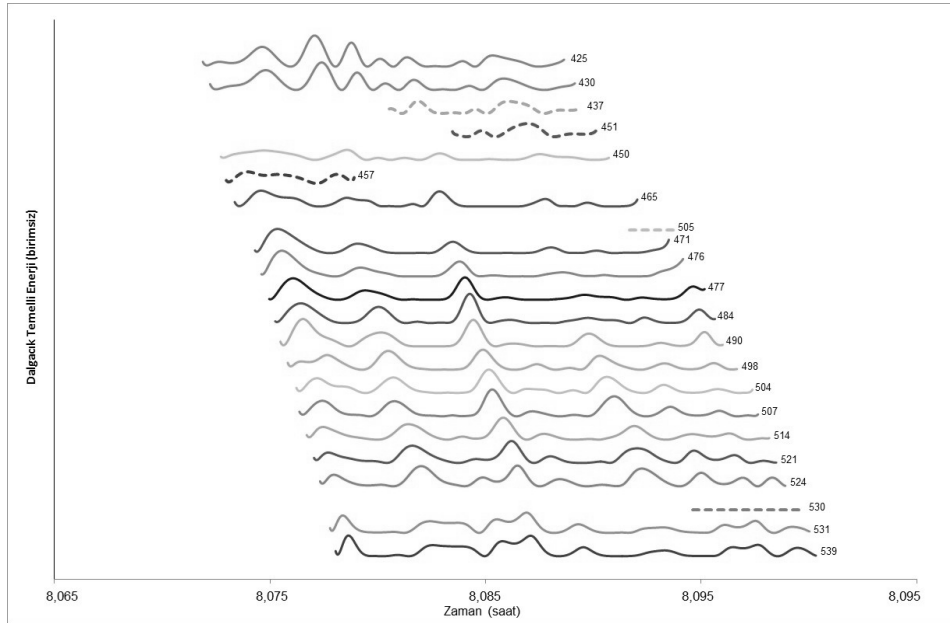
Bir taşıtın konum-zaman serisi yukarıda belirtilen dalgacık araç kitine bir sinyal fonksiyonu olarak tanıtılırsa, paket, kullanıcı tarafından belirlenmiş en büyük ölçek (burada, $a_{maks}=32$) ile kullanıcı tarafından belirlenmiş türdeki (bu çalışmada, Mexican Hat) dalgacık dönüşümünü otomatik olarak gerçekleştirir. (NGSIM taşıt yörüngeleri veri kümesinde zaman çözünürlüğü 0,1 sn olduğundan, $a_{maks}=32$ ölçeği zaman düzleminde 3,2 sn değerine karşılık gelir ve dalgacık penceresi birden çok yavaşlama ve hızlanma içermez.) Taşıt yörüngelerinin Eşitlik 8'de verildiği gibi hesaplanan dalgacık temelli enerjisinin zamansal dağılımından faydalanarak, taşıt yörüngelerindeki ani eğim (noktasal hız) değişimleri belirlenebilmektedir. Şekil 11'de 539 no'lu taşıtın yörüngesinin dalgacık

temelli enerjisinin zamansal dağılımı görülmektedir. Konum–zaman serisini temsil eden yörüngenin eğim değiştirdiği zamanlar ile enerji grafiğinin tepe noktaları arasında uyum olduğu görülmektedir. Böylece, zamansal enerji dağılımının tepe (maksimum) noktaları, taşıt hareketindeki salınımları (yavaşlama veya durma ve hızlanma veya kalkma durumlarını) işaret etmektedir. Buradan hareketle, trafik akımı içindeki salınımların (ya da kinematik/şok dalgaların) oluşma yerleri ve nedenleri ile yayılma hızları saptanabilmektedir.

Dalgacık dönüşümü uygulaması: Mikroskobik ölçek

Bir taşıtın yavaşlaması, yörüngesindeki (ani) eğim azalmasıyla temsil edildiğinde, yörüngedeki bu eğim değişimi dalgacık penceresinde bir enerji sıçraması üretir. Dalgacık temelli enerji kullanılarak, trafik akımı içindeki yavaşlama/hızlanma dalgaları saptanabilmektedir. Enerji tepecikleri takip edilerek ilk enerji sıçramasını yaratan taşıtı, yani yavaşlama dalgasının kaynağını saptamak olanaklıdır. Hızlanma dalgaları da benzer şekilde takip edilebilir.

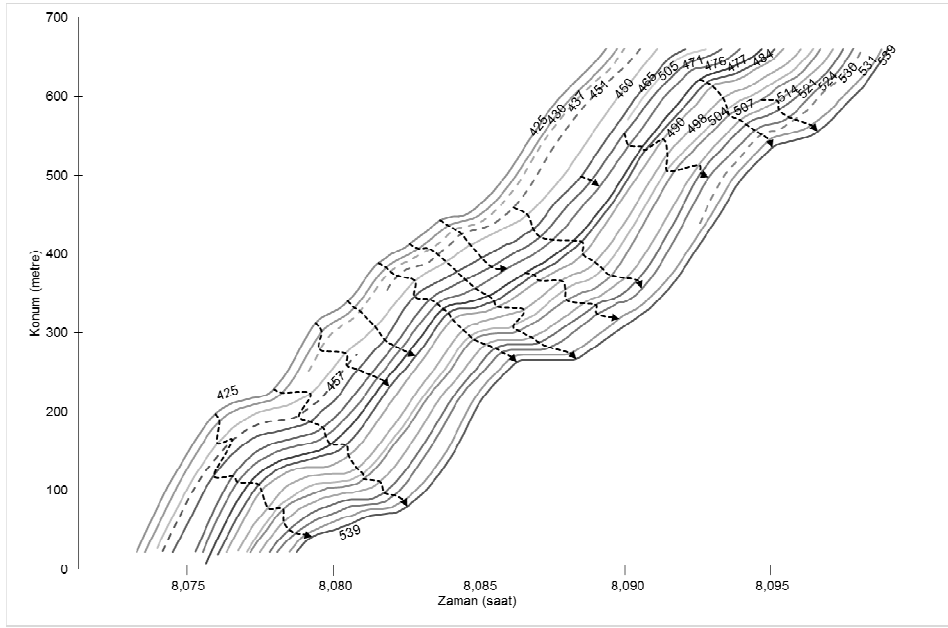
Şekil 10’da gösterilen 22 taşıtın konum–zaman serilerinin dalgacık dönüşümü gerçekleştirilmiş ve elde edilen dalgacık dönüşüm katsayılarından, Şekil 12’de gösterilen dalgacık temelli enerji dağılımı grafikleri elde edilmiştir. Her taşıt bir enerji grafiği ile temsil edilmiş ve enerjilere sabit değerler eklenerek grafikler dikey yönde birbirlerinden ayrılmıştır. (505 ve 530 no’lu taşıtların yörünge uzunlukları kısa olup anlamlı enerji dağılımı vermediğinden, bu taşıtların enerji eğrileri, taşıtların grafikteki konumunu belirtmek amacıyla kısa yatay doğrularla temsil edilmiştir.)



Şekil 12. Dalgacık temelli zamansal enerji dağılımı grafikleri

Şekil 12’de gösterilen taşıt yörüngelerinin dalgacık enerji dağılımı eğrilerinin tepe noktalarının (hız değişme noktalarının) konum ve zaman verileri elde edilmiştir. Bu veriler Şekil 13’te gösterilen taşıt yörüngelerinin üzerinde işaretlenmiştir. Ardışık taşıtlar üzerinde işaretlenen noktaların birleştirilmesiyle yavaşlama ve hızlanma dalgalarının yörüngeleri elde edilmiştir (şekil üzerinde kesikli oklar ile gösterilmiştir). İncelenen zaman diliminde trafik zorlamalı akım (forced flow) koşullarında aktığından, dalgalar, akımın (taşıt hareketlerinin) ters yönünde yayılmaktadır.

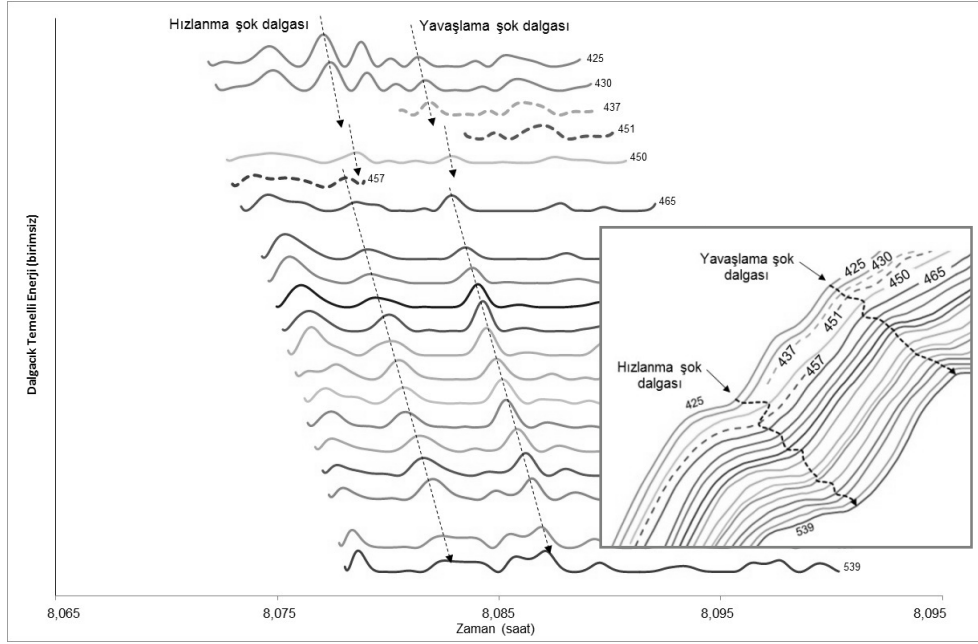
Kinematik dalgalar (şok dalgaları) çeşitli nedenlerle oluşabilmektedir. Taşıtların şerit değiştirmesi veya taşıt takibindeki sürücü davranışları, zorlamalı koşullardaki trafik akımlarında oluşan kinematik dalgaların ana kaynakları arasındadır. Ancak, bu sebepler dışında, dalgalar, anlık olarak da ortaya çıkabilmektedir [12]. Bu çalışma kapsamındaki taşıt yörüngeleri ve bunların dalgacık temelli enerji grafikleri incelendiğinde, ortaya çıkan kinematik dalgalar için benzer kaynakların varlığı gözlemlenmiştir. İzleyen paragrafta, Şekil 14’te (kutu içinde) gösterilen taşıt yörüngeleri, ortaya çıkan hızlanma ve yavaşlama dalgalarıyla birlikte incelenmiştir.



Şekil 13. İncelenen taşıt yörüngeleri ve dalgacık enerji dağılımından bulunan kinematik/şok dalgaların yörüngeleri (kesikli oklar)

Şekil 14’te, belirlenen kinematik dalgalarından hızlanma ve yavaşlama dalgalarına ait birer örnek gösterilmiştir. (Taşıt yörüngeleri, kutu içinde, yörüngelerin dalgacık temelli enerji dağılımları grafiğinin sağ alt bölümüne yerleştirilmiştir.) Hızlanma dalgası, incelenen yörüngelerden 425 no’lu taşıtın hızlanması ile başlamaktadır. 450 no’lu taşıt bu dalgaya gecikmeli tepki verse de, takip eden 457 ve sonraki taşıtlar bu hızlanma dalgasına uyum

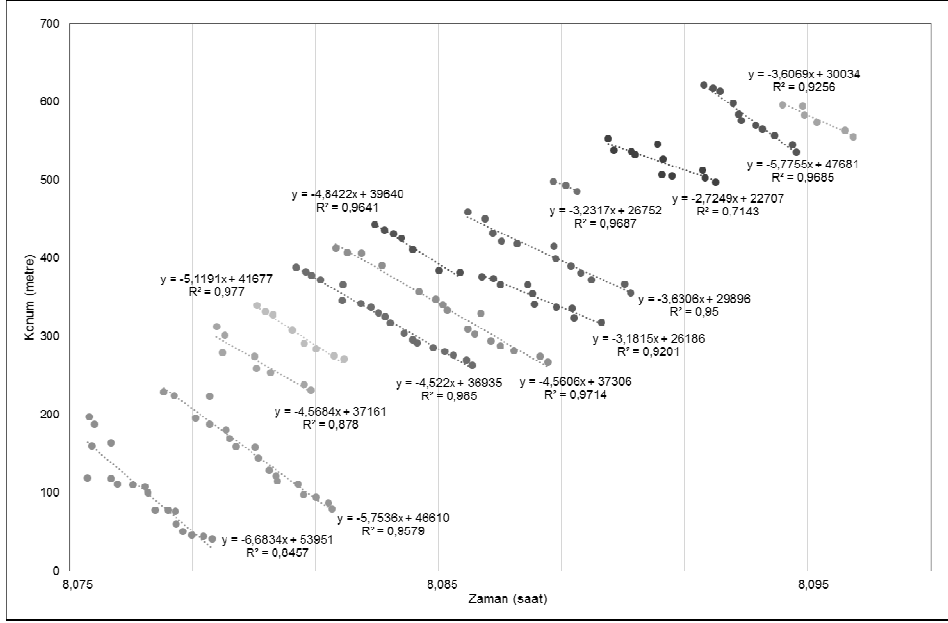
sağlayarak, hızlarını arttırmışlardır. 450 no'lu taşıtın hızlanmadaki gecikmesi, önündeki 430 no'lu taşıtla arasındaki takip mesafesini uzatmıştır. 457 no'lu taşıtın hızlanmaya, (muhtemelen) 430 no'lu taşıtı referans alarak başladığı, hızlanmakta kısmen geciken 450 no'lu taşıta çok yaklaştığı ve kısa bir süre sonra da şeritten ayrıldığı görülmektedir (457 no'lu taşıtın yörüngesi hızlanma dalgasından sonra sonlanmıştır). Bu hızlanma dalgasında ana etkenin taşıt takip mekanizması olduğu anlaşılmaktadır. Yavaşlama dalgasında ise başrolü yine 450 no'lu taşıt oynamaktadır. Önceki hızlanma dalgasına 450 no'lu taşıtın geç tepki vermesi, bulunduğu 1. şeritte (akım aşağıda) boşluk oluşturmuştur. Bu boşluk komşu şeritlerde seyretmekte olan 437 ve 451 no'lu taşıtların şerit değiştirerek, 450 no'lu taşıtın önünde 1. şeride geçmelerine yol açmıştır. Önünde iki yeni taşıt beliren 450 no'lu taşıtın sürücüsü, bunlardan 451 no'lu taşıtın yavaşlamasına yine gecikmeli olarak tepki vererek yavaşlamıştır. 450 no'lu taşıtı takip eden 465 no'lu taşıtın sürücüsü, 451 no'lu taşıtın yavaşladığını fark edip, buna erken tepki vermiş ve yavaşlayarak 450 no'lu taşıt ile arasındaki takip mesafesini kısmen arttırmıştır. 451 no'lu taşıttan 465 no'lu taşıta aktarılan yavaşlama dalgası akım yukarı yönde (trafiğin ters yönünde) yayılmasını sürdürmüştür. Bu yavaşlama dalgasını tetikleyen ana neden, 437 ve 451 no'lu taşıtların şerit değiştirerek, 1. şeritteki yoğunluğu arttırmasıdır.



Şekil 14. Hızlanma ve yavaşlama şok dalgalarının taşıt yörüngeleri ve enerji dağılımı grafiklerindeki görünümü

Yörüngelerin dalgacık temelli zamansal enerji dağılımları ve taşıt yörüngeleri arasındaki ilişkiden, yavaşlama ve hızlanma dalgalarının yayılma hızları regresyon ile tahmin

edilebilir. Şekil 13'te gösterilen şok dalgalarının yörüngeleri konum–zaman düzleminde işaretlenmiş ve ilgili ardışık hız değişme noktaları arasında yapılan regresyon çalışması Şekil 15'te gösterilmiştir. Bu şok dalgalarının yörüngeleri için bulunan doğrusal regresyon eşitlikleri ve herbir regresyon doğrusunun verilerle uyumunu gösteren belirlilik katsayıları (R^2) şekil üzerinde gösterilmiştir. Hesaplanan belirlilik katsayıları 0,7143 ve 0,9850 arasında değişmekte, genel olarak, regresyon doğrularının veriler ile yüksek derecede uyumlu olduğu görülmektedir. Regresyon doğrularının eğimleri, kinematik/şok dalgalarının hızlarıdır. Buna göre, trafik akımının tersi yönünde yayılan dalgaların hızları 2,72 m/sn (9,79 km/sa) ve 6,68 m/sn (24,05 km/sa) arasında değişmekte, dalgalar, ortalama 4,48 m/sn (16,13 km/sa) hızla yayılmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalarda, taşıt yörüngelerinden elde edilen şok dalgaları için tahmin edilen ortalama yayılma hızları 18,3 km/sa [16], 14,07 km/sa ile 16,96 km/sa arasında [5], 12,87 km/sa ve 18,67 km/sa [12] değerlerini almıştır. Yayılma hızları merteye olarak benzerlik göstermektedir; ancak, hızlardaki değişkenliğin incelenmesi devam eden araştırma konuları arasındadır.



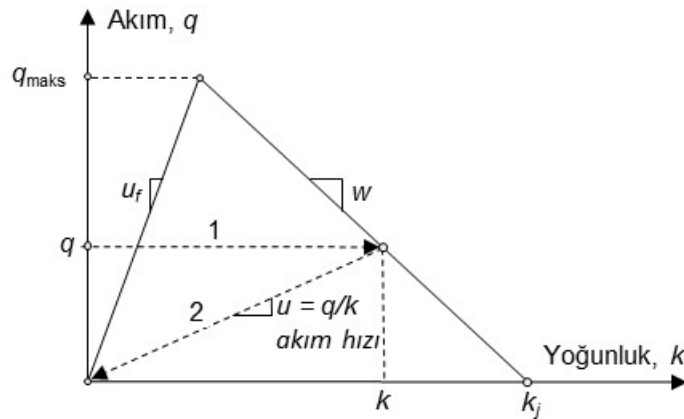
Şekil 15. Dalgacık temelli enerji dağılımı noktaları arasında regresyon çalışması ve kinematik/şok dalgalarının yayılma hızları

4. SADELEŞTİRİLMİŞ TRAFİK AKIM KURAMI VE ŞOK DALGALARI

Şok dalgaları kuramı trafik akımlarının modellenmesinde önemli bir yere sahiptir. Karayolu trafik akımlarının sadeleştirilmiş kuramı Prof. Newell [17] tarafından önerilmiştir. Bu kuram, 1955-56 yıllarında önerilen ve kısaca LWR (Lighthill and Whitham, 1955; Richards, 1956) olarak bilinen orijinal teorisinin sadeleştirilmiş bir versiyonudur. Orijinal

teori, trafiği sürekli bir ortam olarak kabul eder; yani, trafik akımı içindeki taşıt hareketleri hep birlikte, ortalamayla tanımlanabilen modellerle temsil edilebilir. Newell'in sadeleştirilmiş nitelemesi, kısmen, trafik akımının büyüklüğü ve seyahat süresi arasında kabul ettiği ilişki nedeniyledir [18]. Bu şekilde kabul edilen ilişki, karayolu boyunca değişebilmekte, fakat zamana göre değişiklik göstermemektedir. Kabul edilen bu ilişkiler tamamen ampirik olup, saha ölçümlerinden elde edilir. Söz konusu ilişkiler karayolunun geometrisine bağlı olmakla birlikte, hava koşulları gibi çevresel etmenler ve trafik akımının özelliklerine de (örneğin, ağır taşıt oranı ve sürücülerinin davranışlarına) bağlıdır.

Sürekli akım modelleri için çeşitli trafik büyüklükleri arasında sınır koşulları tanımlayan ikili ilişkiler kurulabilmekle birlikte, yaygın olarak akım (q) ve yoğunluk (k) arasındaki ilişki kullanılır. Sadeleştirilmiş kuram, temel diyagram olarak da bilinen, $q-k$ ilişkisinin Şekil 16'da gösterildiği gibi üçgen biçimli olduğunu kabul eder. Bu ilişkinin sol bölümü serbest akan trafiği ve sağ bölümü ise tıkanmış/kuyruklanmış trafiği temsil eder. Trafığın temel eşitliğine göre akım hızı (u), akımın yoğunluğa bölünmesiyle (q/k) elde edilir. Bu nedenle, sadeleştirilmiş akım kuramı, ilişkinin sol bölümüne, serbest hareket eden taşıtların hızı olan u_f eğim değerini atar. Bu bölümde eğimin sabit olması, (q, k) durumlarındaki değişikliklerin, serbest akan trafik içinde taşıtlarla birlikte ileri yönde hareket ettiğini gösterir. İkili ilişkinin sağ bölümünde, artan yoğunlukla birlikte akım azalır. Durgun trafik akımı durumları arasındaki arayüz (interface) hızının (w), akım farkının yoğunluk farkına oranı $[(q_2 - q_1)/(k_2 - k_1)] = (\Delta q / \Delta k)$ olduğu bilinmektedir. Buna göre, ikili ilişkinin sağdaki bölümünün de doğrusal (linear) olduğu, kuyruklanmış trafik durumları arasındaki arayüzlerin, tekil (sabit) bir hızla yayıldığı kabul edilmiştir [18]. Bu kabullerden hareketle, kinematik dalgaların yayılma hızlarının yönüne bağlı olarak, trafiğin serbest veya zorlamalı koşullarda aktığı saptanabilir. Belirli bir karayolu kesimine ait üçgen biçimli temel diyagram, bu kesimdeki kapasitesi (q_{maks}), tıkanma yoğunluğu (k_j), serbest akım hızı (u_f) ve şok dalgalarının yayılma hızına (w) göre kalibre edildikten sonra, örneğin akım değerine bağlı olarak (Şekil 16'da 1 no'lu kesikli ok), trafik akım hızlarının (Şekil 16'da 2 no'lu kesikli ok) ve taşıt seyahat sürelerinin tahmin edilmesinde kullanılabilir.



Şekil 16. Üçgen biçimli akım-yoğunluk ilişkisi

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Veri toplama teknolojilerinin gelişmesi ve kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte veri işleme tekniklerini uygulama olanakları artmaktadır. Karayolu planlaması ve işletimine ilişkin modellerin geliştirilmesi ve sınanması için sahadan toplanan bu “büyük veri” (big data) topluluğu, çeşitli trafik yönetim stratejilerinin geliştirilmesi ve sınanması için de benzersiz olanaklar sunmaktadır. Teknolojinin sunduğu büyük veri olanağı toplanan verinin nitelikleri (örneğin, doğruluğu ve ayrıntı düzeyi) ile sınırlıdır. Bu çalışmada kullanılan RTMS radar verileri 2 dakika ve NGSIM taşıt yörüngeleri verileri 0,1 sn çözünürlüğe sahiptir. Radar teknolojisinin günümüzdeki sınırları nedeniyle ölçme aralığını kısaltmak (çözünürlüğü arttırmak) belirli ölçüde olanaklıdır. Çözünürlüğün yükselmesiyle birlikte hacmi artan veriyi saklamanın maliyeti de artmakta, ancak daha hassas/incecikli analizler yapmak olanaklı hale gelmektedir. Günümüzde loop detektörleri ile 20 sn çözünürlükte (makroskobik) trafik verisi toplamak olanaklıdır. Veri toplama teknolojilerine yatırım yapılırken, maliyet ve nitelik arasında uygun bir ödünleşme (trade-off) dengesi aranmalıdır.

Görüntü işleme yöntemiyle özel olarak araştırmacılara dönük toplanmış, çözünürlüğü oldukça yüksek (örneğin 0,1 sn) taşıt yörüngesi verileri de, trafik/karayolu mühendisliği çalışmaları için benzersiz araştırma olanakları sunmaktadır. Günümüzde görüntü işleme teknikleri yanında küresel konumlandırma sistemleri (GPS) sayesinde, taşıt hareketlerine ilişkin zaman, konum, hız vd. veriler yüksek çözünürlükte toplanabilmektedir. Bu niteliğe sahip veriler, akıllı ulaşım sistemleri (AUS; Intelligent Transportation Systems, ITS) bileşenlerinin işlevselliğini artırması bakımından gereklidir. Karayolu trafik planlaması ve işletim süreçlerinin başarımı (performansı), bu tür verilerin toplanması ve analiziyle birlikte artma potansiyeline sahiptir.

Karayolu trafik mühendisliği disiplini içinde, uyarlanmış çeşitli veri analiz teknikleri kullanılır. Bu tekniklerin birbirlerine göre olumlu ve olumsuz yanları bulunmaktadır. Kullanılan analiz teknikleri yelpazesini genişletmek, trafik planlaması ve işletimi konularında yeni olanaklara kapı aralamaktadır. Bu çalışmada ele alınan dalgacık dönüşümü (wavelet transform) tekniği, son yıllarda trafik mühendisliği literatüründe rastlanan analiz teknikleri arasındadır. Sahip olduğu matematiksel temeller ve kullanım esnekliği nedeniyle uygulama kolaylıkları sunmaktadır. Karayolu şok dalgalarının oluşma ve yayılma özelliklerini (makroskobik ve mikroskobik ölçeklerde) incelemek için uyguladığımız dalgacık dönüşüm tekniği ileriye dönük ümit verici sonuçlar sunmuştur. Tekrarlı (zirve saat; recurrent) ve tekrarlı olmayan (kaza-arıza; non-recurrent/incident) tıkanıklık koşullarında darboğazların incelenmesine olanak veren bu teknik, karayolu trafik yönetimi ve işletiminde güvenlik ve verimlilik artışı yönündeki çabalara destek olma potansiyeline sahiptir.

Dalgacık dönüşümü yöntemiyle trafik içindeki salınımlar tutarlı denebilecek ölçülerde saptanabilmektedir. Sonuçlardaki kısmi değişkenlik, tekniğin iyileştirmeye açık yönlerinin bulunduğunu göstermekle birlikte, trafiğin doğası gereği, sürücü davranışlarındaki farklılıklardan da kaynaklanabilmektedir. Trafik akımı içindeki dalgalanmalar, kaynakların verimli kullanımı ve sürüş güvenliği ile ilgili sorunlara neden olmaktadır. Trafik akımlarını durgunlaştırmaya dönük çalışmalar, hem kullanılan analiz teknikleri hem de akışa ilişkin model ve algoritmaların geliştirilmesi doğrultusunda sürecektir. Kinematik dalga temelli trafik akım hızlarının ve yolculuk sürelerinin tahmin edilmesi de potansiyel araştırma konuları arasındadır.

Teşekkür

RTMS radar verilerinin temini konusunda yardımcı oldukları için İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), Ulaşım Daire Başkanlığı, Trafik Müdürlüğü'ne ve özellikle Y. Müh. Y. Batuhan ALTUN'a; NGSIM (Next Generation Simulation) programı kapsamında yüksek çözünürlüklü karayolu trafik verilerini hazırlayıp genel kullanıma sundukları için ABD Ulaştırma Bakanlığı, Ulusal Karayolları İdaresi'ne (FHWA, Federal Highway Administration) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Şahin, İ., Akyıldız, G., Zorer, A., Gedizlioğlu, E., “Uzun Otoyol Kuyruklarının İncelenmesi ve İyileştirme Stratejilerinin Araştırılması”, Araştırma Projesi Sonuç Raporu, TÜBİTAK, İnşaat ve Çevre Teknolojileri Araştırma Grubu Proje No. İÇTAG-1920 ve YTÜ Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Proje No. 22-05-01-0, 2004.
- [2] Şahin, İ., Akyıldız, G. “Bosporus Bridge Toll Plaza in Istanbul, Turkey: Upstream and Downstream Traffic Features”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1910, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 99-107, 2005.
- [3] Şahin, İ., “Some Observed Features of Freeway Traffic Oscillations”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2124, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 186–193, 2009.
- [4] Adeli, H., Karim, A., “Wavelets in Intelligent Transportation Systems”, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [5] Zheng, Z., Ahn, S., Chen, D., Laval, J., “Applications of Wavelet Transform for Analysis of Freeway Traffic: Bottlenecks, Transient Traffic, and Traffic Oscillations”, Transportation Research Part B: Methodological, 45(2), 372-384, 2011.
- [6] Zheng, Z., Washington, S., “On Selecting an Optimal Wavelet for Detecting Singularities in Traffic and Vehicular Data”, Transportation Research Part C, Vol. 25, 18-33, 2012.
- [7] Taylor, M.A.P., Bonsall, P.W., Young, W., “Understanding Traffic Systems: Data, Analysis and Presentation”, second edition, Ashgate Publishing Ltd, 2000.
- [8] Washington, S.P., Karlaftis, M.G., Mannering, F.L., “Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis”, Chapman & Hall/CRC Press, 2003.
- [9] Machiwal, D., Jha, M.K., “Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice”, Copublished by Springer, Capital Publishing Company, India, 2012.
- [10] Kijewski, T., Kareem, A., “Wavelet Transforms for System Identification in Civil Engineering”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 18, 339-355, 2003.

- [11] Jansen, M., Oonincx, P., “Second Generation Wavelets and Applications”, Springer-Verlag London Limited, 2005.
- [12] Zheng, Z., Ahn, S., Chen, D., Laval, J., “Freeway Traffic Oscillations: Microscopic Analysis of Formations and Propagations Using Wavelet Transform”, *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(9), 1378-1388, 2011.
- [13] Addison, P.S., “The Illustrated Wavelet Transform Handbook - Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance”, IOP Publishing Ltd, 2002.
- [14] Aydın, F., “Fatih Sultan Mehmet Köprüsü’ndeki Ek Şerit Uygulamasının Simülasyon Modeli ile İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [15] NGSIM, 2010, “Next Generation Simulation”, <http://ngsim-community.org/>, Erişme tarihi: 28.06.2011.
- [16] Lu, X.-Y., Skabardonis, A., “Freeway Traffic Shockwave Analysis: Exploring the NGSIM Trajectory Data”, TRB Annual Meeting, Paper #07-3016, January 2007.
- [17] Newell, G.F., “A Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic I: General Theory, II: Queuing at Freeway Bottlenecks, III: Multi-destination flows”, *Transportation Research*, 27B, 281-313, 1993.
- [18] Cassidy, M.J., “Traffic Flow and Capacity”, In *Handbook of Transportation Science* (Ed. R.W. Hall), Kluwer Academic Publishers, 151-186, 1999.