

TRAFİK SIKIŞIKLIKLARININ ANALİZİ; SANAL ORTAMDA KATILIM DENETİMİ ÜZERİNE BİR EĞİTİM ÇALIŞMASI

Ahmet AKBAŞ¹, Necla TEKTAŞ², Mehmet TEKTAŞ³

1. GİRİŞ

Kentiçi ana (transit) yollar, başlangıçta sınırsız bir ulaşım serbestliği sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Ancak, hızla artan otomobil sahipliği, son yıllarda bu yollarda kilometrelerce uzunluklara varan kuyruklaşmaları ve trafik sıkışıklıklarını günlük hayatın kaçınılmaz bir gerçeği haline getirmiştir. Böylece başlangıçtaki ulaşım serbestliği beklentisi, yerini bu durumdan kaynaklanan çok sayıda soruna terketmiştir. Bu kapsamda, özellikle metropolitan alanlardaki ana yollarda, kazalar ya da yol bakımı gibi nedenlerle oluşan *tekrarlamayan* karakterdeki trafik sıkışıklıkları ile, bu yolların belirli kesimlerinde zirve saatlerde meydana gelen *tekrarlayan* karakterdeki trafik sıkışıklıkları, can kayıplarının yanı sıra büyük boyutlarda ekonomik kayıplara da neden olmaktadır. [5, 6]

Bu durumun doğal bir sonucu olarak, kentiçi karayolu ağlarında trafik güvenliği azalmaya; ulaşım süreleri, ulaşım maliyetleri ve egzoz emisyonundan kaynaklanan çevre kirliliği artmaya başlamıştır. Örnek olarak, ABD'nin otoyollarında her yıl ortalama 41000 ölüm ve 5 milyon yaralanma ile sonuçlanan kazaların oluştuğu; bu kazalarla oluşan ekonomik kayıpların değerinin, yaklaşık olarak 70 milyon dolar olduğu; dünya ölçeğinde atmosfere atılan karbon monoksit gazının %66'sının otomobiller tarafından üretilmekte olduğu not edilmektedir. Bunun gibi, 1990 yılı itibarıyla ABD'de kent içi otoyollardaki yıllık gecikmenin tahminen 2 milyon araç-saat, bunun neden olduğu verim kaybının da yaklaşık 100 milyon dolar olduğu hesaplanmıştır. Ülkemizde ise, 2000 yılı içerisinde büyük kısmı kent içi karayolu ağlarındaki sıkışıklıklardan kaynaklanan trafik kazalarında ölen insan sayısının, yaklaşık 7500 olarak gerçekleştiği bildirilmiştir. [4, 6, 7]

Diğer taraftan, yapılan son çalışmalar, trafik sıkışıklıklarının azaltılması amacıyla üst yapının genişletilmesini öngören yaklaşımların, ekonomik ve çevresel nedenlerin yanı sıra, metropolitan sahalardaki yer darlığı gibi diğer bir kısım nedenlerden dolayı çözüm için yeterli olamayacağını göstermiştir. Bundan dolayı, başlangıçta kent içi ana yolların sağlayacağı düşünülen sınırsız hareketliliğin artık bir hayal olduğu iddia edilebilir. [5]

Bu şartlar altında, artan sıkışıklıkların ve beraberinde gelen sorunların azaltılması için, üst yapının gelişmiş güzel kullanımı yerine, bütün

¹ Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 81040 Göztepe-İstanbul.

ahmetakbas@marmara.edu.tr

² Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 81040 Göztepe-İstanbul

³ tektas@marmara.edu.tr

kullanıcıların yararını amaçlayan güçlü optimal denetim teknikleri ile birleştirilmiş uygulamaların hayata geçirilmesi zorunludur. Bu kapsamda, kentiçi ana yollar üzerinde, özellikle çevre yollardan bu yollara katılımların olduğu kesimlerde yapılacak teknolojik denetimler (*katılım denetimi*) önemli bir işleve sahiptir.

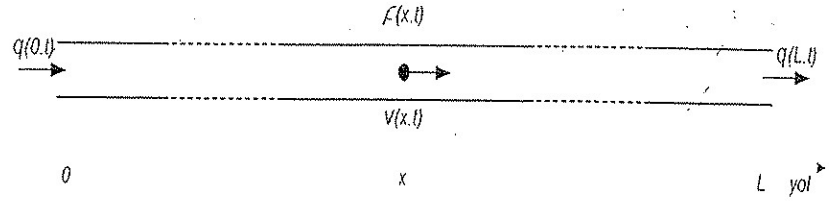
Bu çalışmada, ana yollardaki trafik sıkışıklıklarının analizi için kullanılan matematiksel modeller incelenmiş; bu yollara çevre yollardan katılımın olduğu kesimlerde oluşan sıkışıklıkların azaltılması amacıyla kullanılan katılım denetimi yöntemleri, sanal ortamdaki (VISSIM simülasyon ortamı) bir eğitim çalışması ile tanıtılmıştır. Bu kapsamda, İstanbul kentiçi karayolu ağlarında önemli bir yer tutan E5 (D100) transit yoluna TEM otoyolundan bir katılımın olduğu Kozyatağı kavşağında, akşam zirve saatlerde yaşanan trafik sıkışıklıklarının, katılım denetimi ile nasıl azaltılabildiği gösterilmiştir.

2. TRAFİK SIKIŞIKLIKLARININ ANALİZİ

Karayolu ağlarında trafiğin oluşumu, birbirini takip eden taşıtların uzunlamasına yol kesitleri (*şerit*) boyunca oluşturduğu kuyruklar şeklindedir. Her trafik şeridi için belirli bir yöne ve belirli yol kullanımı şartlarına haiz olan bu görüntüye *trafik akımı* ya da kısaca *akım* denir.

Bütün fiziksel olaylar gibi, trafik akımları da kendi karakteristik büyüklükleri cinsinden ifade edilen matematiksel modellere göre izah edilir ve yorumlanırlar. Bu kapsamda, trafik akımlarını karakterize eden temel büyüklükler; *akım*, *yoğunluk* ve *ortalama hız* kavramları ile temsil edilir. Şekil-1. Bu kavramlardan akım (q), yolun bir kesitinden birim sürede geçen taşıt sayısını (taşıt/saat); yoğunluk (ρ), yolun birim uzunluktaki bir parçasını meşgul eden taşıtların sayısını (taşıt/km); ortalama hız (v) da, yolun bir kesitinden belirli bir sürede geçen taşıtların ortalama hızını (km/saat) ifade eder. [2, 3]

Buna göre, bu makalenin ilgi sahasını oluşturan *trafik sıkışıklığı* olgusu, karayolu üzerindeki yoğunluğun belirli bir kritik değeri aşması haline karşılık gelen fiziksel durumdur. Trafik sıkışıklığı, yoğunlukla zirve saatler esnasında ve herhangi bir kaza veya benzeri durum olmaksızın oluşur. Bu türlü sıkışıklıklar *tekrarlayan sıkışıklık* olarak da adlandırılır. Bununla beraber sıkışıklığın bir diğer türü de, kazalar gibi, kapasite azalmasına neden olan olaylardan kaynaklanır ve *tekrarlamayan sıkışıklık* olarak adlandırılır. [5]



Şekil-1. Bir ana yol hattı üzerindeki trafik akımının karakteristik büyüklükleri.

Diğer taraftan, bir trafik akımının dinamiği (akım karakteristiklerinin yol ve zamana göre değişimi), taşıt sürücülerinin psikolojik şartlarının yanı sıra; toplam talep, komşu şeritlerdeki akımların yapısı, yolun hizmet düzeyi ve iklim şartları gibi bir çok etkene bağlıdır. Bu nedenle, her trafik akımı, taşıt hareketlerinin sürücü davranışı ve çevresel kısıtlar tarafından sınırlandırıldığı, tamamen ihtimallere bağlı bir olay olarak gerçekleşir. Bununla beraber, trafik akımlarının dinamiği ile ilgili gelişmelerin analizi ve akımların denetimi için, karakteristik büyüklüklere ilişkin verilerin elde edilmesi ve bunların çeşitli matematiksel modeller çerçevesinde yorumlanması şarttır. Günümüzde bu amaçla, gerçek zamanlı olmayan geleneksel ölçme yöntemlerinin yerine, gerçek zamanlı verilerin üretilmesine imkan sağlayan modern yöntemlere ağırlık verilmektedir. Bu amaçla, pratikte, yol kaplamasının altına yerleştirilen trafik dedektörleri üzerinden elde edilen mikroskopik akım parametrelerinden (taşıt takip süresi, taşıt takip aralığı, meşguliyet süresi) yararlanılmaktadır. [3]

2.1. Trafik Akımlarının Matematiksel Modelleri

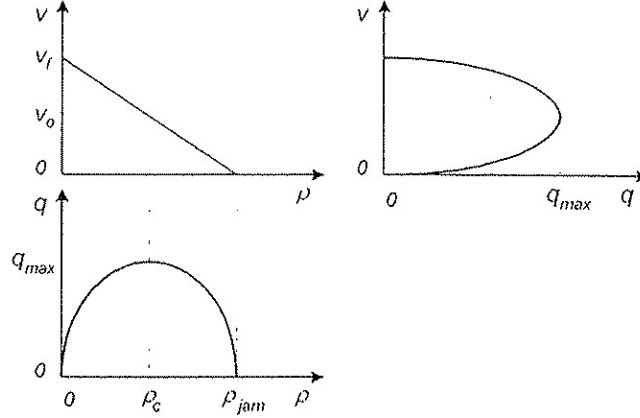
Bir trafik akımına ilişkin karakteristik büyüklüklerin, yolun herhangi bir kesitinde ve herhangi bir andaki ilişkisini izah eden temel matematiksel model, aşağıda verilmiştir:

$$q(x,t) = \rho(x,t) * v(x,t) \quad (1)$$

Bu ifadede x yol, t zaman değişkenlerini temsil eder. (1) eşitliği ile ifade edilen ilişkinin yanı sıra, literatürde akım karakteristikleri arasındaki ikili ilişkileri izah eden $(q(\rho), v(\rho), v(q))$ matematiksel modeller de önemli bir yer tutar. Bu kapsamdaki modellerin hemen hepsi, akım değişkenleri arasındaki ilişki için Şekil-2'deki grafiklerle özetlenen değişim şekillerini benimsemektedir. [3] Buna göre, akım değişkenleri arasındaki ilişki şöyle yorumlanabilir: Her trafik akımının bir *optimum hız* (v_o) ve bu hıza karşılık gelen bir *kritik yoğunluk* (ρ_c) değeri vardır. Akımın yoğunluğu arttıkça ortalama hızı azalmakta ve *durma yoğunluğu* olarak da adlandırılan yoğunluk değerinde ($\rho = \rho_{jam}$) hız sıfır olmaktadır. Kritik yoğunluk değerine karşılık gelen akım q_{max} maksimum değerli akımdır. Maksimum akım aynı

zamanda, yolun hizmet düzeyine ve çevre şartlarına bağlı olarak belirlenen *yol kapasitesi* olarak da tanımlanır: $q_{cap} = q_{max}$.

Şekil-2'de gösterilen ikili ilişkilere göre, akımın yoğunluğa göre değişimi, parabolik bir karakter arzeder. Buna göre, akım, kritik yoğunluğun altındaki veya üstündeki yoğunluklarda kapasitenin altına düşmekte, dolayısıyla bu yoğunluklarda yol kapasitesinin kullanımı kötüleşmektedir. Bununla beraber, performans azalmasına neden olan sıkışıklık şartları, ancak kritik yoğunluk değerinin aşıldığı hallerde ($\rho > \rho_c$) oluşmaktadır. Bütün bu yorumlardan da anlaşılacağı üzere, literatürde trafik akımlarının sıkışıklık analizleri için, $f=q(\rho)$ ilişkisi esas alınmaktadır. [9]



Şekil-2. Akım karakteristikleri arasındaki ikili ilişkilerin grafik gösterilimi. [3]

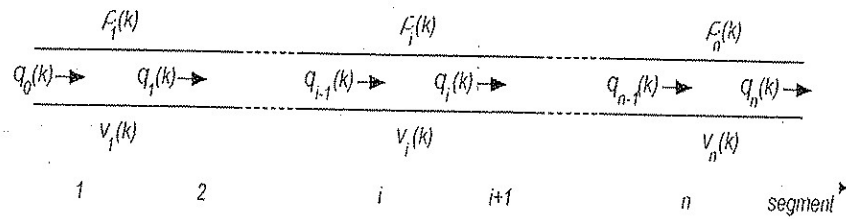
Diğer taraftan, trafik akımlarının denetlenebilmesi için, akım karakteristiklerinin yol ve zamana göre nasıl değiştiğinin yorumlanabilmesinin yanı sıra, nasıl gelişeceğine ilişkin tahminlerin yapılması da gerekir. Bu amaçla trafik akımlarının yol ve zamana göre değişimini (akım dinamiği) belirten matematiksel modellerden yararlanılır. Literatürde bu amaçla akışkan modeli, şok dalgaları modeli, lineer taşıt takip modeli, lineer olmayan taşıt takip modeli gibi, çok sayıda akım modeli kullanılmaktadır. Bununla beraber, trafik akımlarının analizi için en yaygın olarak kullanılan model, trafik akımlarının dinamiğini bir akışkanın dinamiğine benzeştirerek yorumlayan '*akışkan modeli*'dir. Akışkan modeli, *kütlenin korunumu kanunu* esas alınarak geliştirilmiştir. Buna göre, akım ve yoğunluğun yol ve zamana bağlı değişimi, aşağıda verilen birinci dereceden kısmi diferansiyel denklemle (hiperbolik model) yorumlanmaktadır:

$$\frac{\partial}{\partial x} q(x,t) + \frac{\partial}{\partial t} \rho(x,t) = 0 \quad (2)$$

(2) eşitliği ile ifade edilen model, aynı zamanda trafik akımlarının bir sürekli-yol/zaman modelidir. Yani bu modelde yol (uzay) ve zaman değişkenleri sürekli değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Buna karşılık,

pratikte yoğunluk, belirli uzunluktaki bir yol segmenti ($L=\Delta x$); akım, belirli süredeki bir zaman aralığı ($T=\Delta t$); hız da, belirli uzunluktaki bir yol segmenti ve belirli süredeki bir zaman aralığı dikkate alınarak ölçülebilmekte ve anlamlandırılabilir. Bu nedenle akımların dinamiğini ayırık-yol ve/veya ayırık-zaman modelleri (fark denklemleri) ile temsil etmek, daha doğal bir yaklaşımdır.

Literatürde hem yol ve hem de zamanın ayırık değişkenler olarak kullanıldığı çeşitli matematiksel modellerin yanı sıra, yalnız yol veya yalnız zaman değişkenlerinin ayırık olarak kullanıldığı modellere de raslanmaktadır. Buna göre, Şekil-1'dekine benzer bir ana yol hattı, ayırık-yol/zaman modelleri için Şekil-3'de gösterildiği gibi segmental (parçalı) şekilde dikkate alınmaktadır. Bu yapı içerisinde ayırık akım parametrelerinin belirlenmesi için esas alınan yol aralığı Δx , doğrudan yol segmentinin uzunluğudur ve her yol segmenti bir segment indeksi ' i ' ile karakterize edilir ($L_i=\Delta x=x(i+1)-x(i)$). Bunun gibi, ayırık akım parametrelerinin belirlenmesi için esas alınan zaman aralığı Δt 'de, zaman indeksi ' k ' ile karakterize edilir ($T=\Delta t=(k+1)T-kT$).



Şekil-3. Bir ana yol hattının ayırık-yol/zaman modellerince dikkate alınan segmental (parçalı) yapısı.

Trafik akımlarının ayırık-yol/zaman modellerine bir örnek olarak, aşağıda durum denklemleri ile temsil edilen METANET modeli gösterilebilir:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L \cdot \lambda} [q_{i-1}(k) - q_i(k)] \quad (3)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} [V(\rho_i(k)) - v_i(k)] + \frac{T}{L} \cdot v_i(k) \cdot [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{v_i T [\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)]}{\tau L [\rho_i(k) + \kappa]} \quad (4)$$

$$q_i(k) = \rho_i(k) \cdot v_i(k) \cdot \lambda \quad (5)$$

Buna göre, (3) eşitliği ile ifade edilen yoğunluk fonksiyonu, taşıtların korunumu ilkesine göre belirlenen ve yolun herhangi bir segmentindeki yoğunluğun bir sonraki zaman adımında ($k+1$) nasıl gelişeceğini tahmin

edilmesine imkan sağlayan bir durum denklemidir. Burada i segment (ayrık-yol) indeksini, k ayrık-zaman indeksini, ρ_i yoğunluğu, q_i ve q_{i-1} sırasıyla ilgili yol segmentinin ve bir önceki yol segmentinin çıkış noktasından ölçülen akım değerini, λ yolun şerit sayısını, L yol segmentinin uzunluğunu, T ayrık-model için esas alınan zaman aralığını göstermektedir. Bunun gibi, (4) eşitliği, ampirik olarak belirlenen ve yolun herhangi bir segmentindeki ortalama taşıt hızının bir sonraki zaman adımında nasıl gelişeceğini tahmin edilmesine imkan sağlayan durum denklemidir. Burada v_i ilgili yol segmentindeki ortalama hızı; τ , ν ve κ yolun geometrisi, taşıt karakteristikleri, sürücü davranışı gibi çevresel faktörlere bağlı olarak seçilen sabit değerleri sembolize eden model parametrelerini göstermektedir. Bu durum denkleminde kullanılan $V(\rho_i(k))$ fonksiyonu, ilgili yol segmentinin o anki yoğunluğuna karşılık gelen ulaşım hızının göstermektedir. Bu fonksiyonun ifadesi,

$$V[\rho_i(k)] = v_i \cdot \left[-\frac{\left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_c} \right)^a}{a} \right]$$

(6)

şeklinde, (6) eşitliğinde v_i serbest ulaşım hızını, a çevresel faktörlere bağlı olarak seçilen sabit bir değeri sembolize eden model parametresini göstermektedir. [5]

METANET modeline göre, (5) eşitliği ile temsil edilen durum denklemi ise, (1) eşitliği ile ifade edilen temel matematiksel modelden yararlanarak belirlenmiştir. Bu ifade, (3) ve (4) eşitliklerine göre hesaplanan yoğunluk ve hız değerlerine bağlı olarak, akımın ilgili zaman adımındaki değerini hesaplamak için kullanılır. [5]

2.2. Simülasyon Programları

Matematiksel modeller, trafik akımlarının analizi için önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bununla beraber, ulaşım sistemlerinin boyutlarının büyümesi ile, matematiksel modellerin daha yoğun ve daha etkili olarak kullanılabildiği yeni arayışlar gündeme gelmiştir. Simülasyon programları, bu arayışların bir sonucu olarak gelişmeye başlamıştır. Bu programlar, sahada yapılması gereken denemelerin daha emniyetli, daha ucuz ve daha hızlı bir şekilde yapılabilmesine imkan sağlamakta; böylece, çeşitli ulaşım problemlerinin tespit edilmesi ve performans değerlendirmeleri amacıyla da sıklıkla kullanılmaktadır [3, 7, 8]

Günümüzde özellikle PC teknolojileri ve programlama tekniklerindeki gelişmelere bağlı olarak, sanal ortamda trafik akımlarının üretilmesi için çeşitli matematiksel modellerin esas alındığı simülasyon programları giderek daha yaygın bir kullanıma kavuşmaktadır. Bu çalışmada, ana yollara katılım noktalarında oluşan sıkışıklığın analizi ve katılım denetimi ile sağlanan performans gelişmelerinin tespit edilebilmesi için, böyle bir simülasyon programı olan VISSIM kullanılmıştır. VISSIM, davranış tabanlı ve ayrık

zamanlı bir mikroskopik simülasyon programıdır. İki parçadan oluşmaktadır: trafik simülatörü ve sinyal durumu üretici. *Trafik simülatörü*, Weidmann taşıt takip modelini esas alan bir mikroskopik simülasyon programıdır. *Sinyal durumu üretici* ise, trafik simülatöründen birer saniyelik zaman aralıkları ile alınan verilerin işlendiği ve bir sonraki saniye için sinyal (trafik ışığı) durumlarının ne olacağına ilişkin kararların üretildiği bir kontrol programıdır. Şekil-4. [8]

Programda simülasyon sürecine ilişkin performans verileri, on-line (gerçek zamanlı) olarak trafiğin değişimine ilişkin görüntülerin ekranda canlandırılması; off-line olarak da, istatistiksel verilerin arka plandaki veri dosyalarına aktarılması suretiyle elde edilmektedir. Bu çalışmadaki örnek uygulama için sabit-zamanlı katılım denetimi yöntemi kullanılmıştır. Bu nedenle sinyal durumu üretici, önceden hesaplanarak programa girilen sabit yeşil sürelerini yürürlüğe koyacak şekilde programlanmıştır.



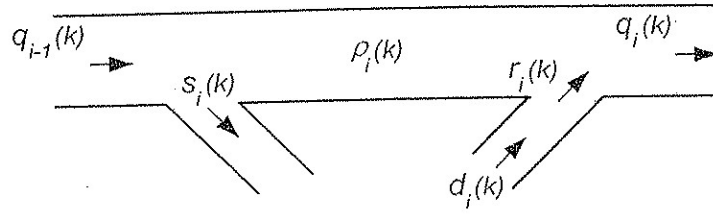
Şekil-4. VISSIM simülasyon programında simülasyon sürecini gösteren blok şema. [8]

3. KATILIM DENETİMİ

Katılım denetimi, bir ana yol hattına katılım kolundan gelen talebin, ana yol akımları üzerindeki bozucu etkilerini azaltarak, ana yol üzerinde kapasite kullanımını iyileştirmeyi amaçlayan bir optimizasyon yöntemidir. Bu bölümde katılım denetimi ile elde edilebilecek faydaları göstermek için basit bir analiz yapılmış ve çeşitli katılım denetimi yöntemleri kısaca tanıtılmıştır. [5]

3.1. Katılım Denetimi Neden Gerekli ?

Trafik akımlarının ayrık-yol/zaman modellerine göre, ana yolun bütün segmentlerini temsil eden bir geometrik yapı ve bunun k ayrık-zaman adımına ilişkin değişken atamaları Şekil-5'de gösterilmiştir. Burada kullanılan akım sembolleri, ilgili kesitten k ayrık-zaman süresince $[kT, (k+1)T]$ geçen taşıt sayısının T ayrık-zaman süresine (periyot) bölünmesiyle tespit edilen 'taşıt/saat' boyutundaki segment akımlarını; yoğunluk sembolü, 'taşıt/km' boyutundaki segment yoğunluğunu; hız sembolü de, 'km/saat' boyutundaki ortalama hızı göstermektedir. Buna göre, $q_i(k)$, segmentin çıkış noktasından ölçülen ana yol akımını (çıkış akımı veya aşağı akım: $q_{out}=q_i$); $q_{i-1}(k)$, bir önceki segmentin çıkış noktasından ölçülen ana yol akımını (giriş akımı veya yukarı akım: $q_{in}=q_{i-1}$); $\rho_i(k)$, segment yoğunluğunu; $r_i(k)$, katılım kolundan ana yola aktarılan giriş akımını (katılım akımı); $d_i(k)$, katılım kolundan gelen talebi; $s_i(k)$, ana yoldan ayrılma koluna aktarılan çıkış akımını (ayrılma akımı) temsil eder. [5]



Şekil-5. Katılım ve ayrılma kollarını da kapsayan bir ana yol segmentinin yapısı.

Böyle bir yol segmentinin bir sonraki ayrık-zaman adımındaki $(k+1)$ yoğunluğunu tespit etmek amacıyla kullanılabilecek bir durum denklemi, (3) eşitliğine katılım ve ayrılma akımlarını temsil eden bileşenlerin eklenmesi ile aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i} \cdot [q_{i-1}(k) - q_i(k) + \chi(i) \cdot r_i(k) - \xi(i) \cdot s_i(k)] \quad =$$

(7)

Burada $\chi(i)$ ve $\xi(i)$, segmentin geometrik yapısında sırasıyla katılım kolu ve ayrılma kolunun olup olmadığını gösteren durum fonksiyonlarıdır. Her iki fonksiyon da ilgili kolun varlığı halinde 1, yokluğu halinde ise 0 değerini alır. Katılım denetimi ya da diğer optimizasyon yöntemlerinin en önemli amaçlarından birisi, denetlenen yol ağına taşıtlar tarafından harcanan 'toplam ulaşım süresi'nin (taşıtların yol ağına harcadığı toplam süre) en aza indirilmesidir. Buna göre, bir karayolu ağına harcanan toplam sürenin basitçe bir analizini yapabilmek için, ağın, her biri Şekil-5'deki genel yapı ile temsil edilen n segmentli bir ana yol hattı ile, bunun n_m ($n_m \leq n$) adet katılım kolu ve n_l ($n_l \leq n$) adet ayrılma kolunu kapsadığını varsayalım. Ayrıca, ağdaki talep seviyesinin herhangi bir denetim sürecinden bağımsız

olarak ve doğal seyri ile oluştuğunu da varsayalım. Bu durumda, $[kT, (k+1)T]$, ayrık-zaman aralığında ağa giriş yapan akımların toplamı (toplam talep), $d(k)=d_1(k)+d_2(k)+\dots+d_m(k)$; ağdan (ana yol hattından) çıkış yapan akımların toplamı da $s(k)=s_1(k)+s_2(k)+\dots+s_m(k)$ olacaktır. Buna göre, bir test sürecinin başlangıcından bu zaman aralığına kadar ağı meşgul eden taşıtların toplam sayısı, taşıtların korunumu ilkesine dayanarak $N(k)=N(k-1)+T[d(k-1)-s(k-1)]$ eşitliği ile ifade edilebilir. Test sürecinin başlangıcında ağdaki toplam taşıt sayısının $N(0)$ olduğu kabul edilirse, bu ifade, aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$N(k) = N(0) + T \sum_{\kappa=0}^{k-1} [d(\kappa) - s(\kappa)]$$

(8)

Buna göre, K ayrık-zaman indisi ile belirtilen bir test süresi boyunca ağdaki

bütün taşıtlar tarafından harcanan toplam süre, $Ts = T \sum_{k=0}^{K-1} N(k)$ eşitliği ile

ifade edilebilir. Bu eşitlik, (8) ifadesi ile belirlenen $N(k)$ değişkeninin kullanılmasıyla aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$Ts = T \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ N(0) + T \sum_{\kappa=0}^{k-1} [d(\kappa) - s(\kappa)] \right\}$$

(9)

Dolayısıyla, (9) ifadesi, katılım denetimi için değeri minimize edilmesi gereken bir amaç fonksiyonudur. Bu amaç fonksiyonu üç bileşenden oluşmaktadır. Bunların ilk ikisi, test süresinin başlangıcında ağda bulunan taşıt sayısı ve toplam taleple ilgilidir. Ağdaki talep seviyesinin doğal seyri ile oluştuğu varsayıldığından, bu iki bileşenle belirlenen zaman harcamasının, herhangi bir denetim sürecinde değiştirilmesi söz konusu olamaz. O halde, katılım denetiminin amacı, (9) ifadesini oluşturan üçüncü bileşenin yeniden düzenlenmesi ile elde edilen aşağıdaki ifadenin, maksimize edilmesi şeklinde sunulabilir:

$$S = T^2 \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{\kappa=0}^{k-1} s(\kappa) = T^2 \sum_{\kappa=0}^{K-1} (K - \kappa) \cdot s(\kappa)$$

(10)

Buna göre, (10) ifadesi, bütün çıkış akımlarının ayrık-zaman periyoduna göre ağırlık kazandırılmış bir fonksiyonudur. Bu ifadenin maksimize edilebilmesi için, ağdaki bütün çıkış akımlarının maksimize edilmeye çalışılması gerekir. Böylece taşıtların yol ağında harcadığı toplam süre en aza indirilmiş olacaktır. O halde, bu amaçla gerçekleştirilecek bir denetim süreci, çıkış akımlarının ağı daha çabuk terk edebileceği mekanizmaları hayata geçirmelidir. Katılım denetimi bu mekanizmayı, ana yol üzerindeki akımların kritik yoğunluğu aşmaması prensibine göre oluşturur. Bu amaçla,

katılım kolundan gelen talep (d_i), bir trafik ışığının yeşil süresinin ayarlanması suretiyle kısılmakta ve ana yola bu şekilde aktarılmaktadır (r_i).

Yukarıdaki açıklamalara bağlı olarak, katılım denetimi ile sağlanabilecek zaman tasarrufunun belirlenmesi amacıyla basit bir analiz yapılabilir. Buna göre, Şekil-5'deki genel yapı ile temsil edilen bir ana yol segmentinde yalnız bir katılım kolunun olduğu ve çıkış akımının sıkışıklık akımına ($q_i = q_{con}$) ulaştığı varsayılın (bir sonraki ana yol segmentinde sıkışıklığın oluşması hali). Şekil-2'de gösterilen $f=q(\rho)$ ilişkisinden hareketle bilinmektedir ki, bu durumdaki segment çıkış akımı, kapasite akımından (q_{cap}) %5-10 oranında daha azdır. Bu durumda segment giriş akımı (bir önceki ana yol segmentinin çıkış akımı) $q_m = q_{i-1}$, katılım kolundan gelen talep de d_i olmak üzere, (9) ifadesi ile verilen amaç fonksiyonuna göre katılım denetimi ile sağlanabilecek zaman tasarrufu (%) olarak) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanabilir [5]:

$$\Delta T_s = \frac{q_{cap} - q_{con}}{q_{i-1} + d_i - q_{con}}$$

(11)

Örneğin, toplam talebin otoyol kapasitesini %20 aştığı ($q_{i-1} + d_i = 1.2 q_{cap}$) ve sıkışıklıktan dolayı kapasite azalmasının % 5 ($q_{con} = 0.95 q_{cap}$) olduğu varsayılırsa, katılım denetimi ile elde edilebilecek zaman tasarrufu $\Delta T_s = \% 20$ olacaktır.

Diğer taraftan, Şekil-5'deki genel yapı ile temsil edilen bir ana yol segmentinde, bir katılım kolu ile beraber bir de ayrılma kolunun olduğu ve ana yol akımında sıkışıklıktan dolayı hiçbir kapasite düşümünün olmadığı varsayılın ($q_{con} = q_{cap}$). Bu durumda, γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) ana yol akımının çıkış koluna aktarılan oranını belirten ve 'çıkış oranı' olarak tanımlanan bir katsayıyı belirtmek üzere, herhangi bir denetimin olmadığı şartlardaki çıkış akımı, aşağıdaki gibi hesaplanır [5]:

$$s_i^{nc} = \frac{\gamma}{-\gamma} (q_{cap} - d_i)$$

(12)

Buna karşılık katılım denetiminin uygulanması ile $(1-\gamma) q_{i-1} + d_i > q_{cap}$ şartı her zaman gerçekleşebileceğinden (sıkışıklığın gerçekleşmemesi hali), ayrılma koluna aktarılan çıkış akımı,

$$s_i^{m} = \gamma \cdot q_{i-1}$$

(13)

olacaktır. Buna göre, açıkça görülmektedir ki, katılım denetiminin uygulanması halinde elde edilebilen çıkış akımının büyüklüğü, denetimsiz şartlara göre arttırılabilmekte ve yol ağında taşıtlar tarafından harcanan süre

böylece azaltılabilmektedir. Bu durumda, (9) ifadesi ile verilen amaç fonksiyonuna göre katılım denetimi ile sağlanabilecek zaman tasarrufu (%) olarak) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanabilir [5]:

$$\Delta T_v = \gamma \cdot 100$$

(14)

Örneğin, çıkış oranının $\gamma=0.05$ olduğu varsayılırsa, katılım denetimi ile elde edilebilecek zaman tasarrufu $\Delta T_v = \%5$ olacaktır. Bu sonuçlara göre, Şekil-5'deki genel yapı ile temsil edilen bir ana yol segmentinde, hem katılım kolu hem de ayrılma kolunun olduğu varsayılırsa, yol ağında taşıtlar tarafından harcanan sürenin azaltılma oranı, katılım denetimi ile (11) ve (14) ifadelerine göre belirlenen yüzdelik oranların en büyüğünden de büyük bir oran olarak gerçekleşecektir. Yukarıda verilen örneklere göre bu oran, %50 mertebelerine (ortalama ulaşım süresinin yarısı) rahatlıkla ulaşabilir.

Diğer yandan, katılım denetiminin bir tek yol segmenti için yapılan *izole denetim* şekli, diğer yol segmentlerindeki akımları olumsuz yönde etkileyebilir. Bunun için, ana yol hattındaki bütün segment akımlarının yanı sıra, bütün katılım ve ayrılma akımlarını da dikkate alan *koordineli denetim* şekli, daha etkili bir denetim şeklidir.

Bununla beraber, katılım denetimi trafik akımlarının denetimi için kullanılan biricik denetim yöntemi de değildir. Örneğin, bir yol ağında taşıt sürücülerinin varış noktalarına göre bireysel rotalarını kendi seyahat zamanlarını minimize edecek şekilde seçeceği gerçeğinden hareketle; bu yol ağını oluşturan ana yollardaki trafik şartlarının sürücülere önceden bildirilmesi şeklinde oluşturulabilecek bir denetim mekanizması (rota seçimi ya da trafik atama problemi), ana yollardaki yoğunluğun dengeli bir şekilde dağılımına katkı sağlayarak, sıkışıklıkların önlenmesine yardımcı olur.

3.2. Katılım Denetimi Yöntemleri

Günümüzde kullanılan ve literatürde yer bulan başlıca katılım denetimi yöntemleri, 3 ana başlık altında toplanmaktadır: *sabit-zamanlı denetim yöntemleri*, *trafik-uyarımli regülasyon yöntemleri* ve *lineer olmayan optimal denetim yöntemleri*. Sabit-zamanlı yöntemler, gerçek zamanlı olmayan (off-line) denetim yöntemleridir. Buna göre; bir katılım kolundan gelen talebin (d_i), ana yola hangi oranda katılacağına (r_i) ilişkin karar, önceden yapılan gözlemlere bağlı olarak günün saatlerine göre hazırlanmış yeşil ışık sürelerinin trafik ışıklarına aktarılması suretiyle hayata geçirilir.

Trafik-uyarımli regülatörler, gerçek zamanlı (on-line) ölçümlere bağlı olarak, ana yol akım şartlarını önceden tespit edilmiş değerler civarında tutmayı amaçlayan taktik seviyedeki denetim yöntemleridir. Bu yöntemler katılım kollarının ana yola yakın kesimlerinde yapılan gerçek zamanlı ölçümlerden yararlanarak lokal veya bölgesel denetimler için

kullanılabilmektedir. Bu kapsamda kullanılan yöntemlerden 'talep-kapasite' yöntemi, Kuzey Amerika'da çok popülerdir. Bunun gibi, meşguliyet (occupancy) ölçümlerine dayanan ve lokal denetimler için kullanılan ALINEA yöntemi ile, bunun çok segmentli ana yol hatlarındaki denetimler için kullanılan şekli olan METALINE yöntemi de dünyanın bir çok yerinde kullanılmaktadır. [5]

Lineer olmayan optimal denetim yöntemleri ise, stratejik seviyedeki denetim yöntemleridir. Özellikle, sürekli olarak kapasitesine yakın talep alan otoyollar üzerinde gereken koordineli denetim şartlarında çok etkili olduğu, literatürde çok sayıda simülasyon çalışması ile gösterilmiştir. Buna paralel olarak saha çalışmalarına ilişkin örnekler de gelişmektedir.

Bu çalışmadaki örnek uygulama ile, sanal ortamda sabit-zamanlı bir katılım denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle aşağıda yalnızca bu yöntem kısaca tanıtılmıştır. Buna göre, çok sayıda katılım ve ayrılma kolunu kapsayan bir ana yol, her biri bir katılım kolunu kapsayan segmentlere ayrılır. r_i , i segmentindeki katılım akımını (taşıt/saat), $\alpha_{ij} \in [0,1]$ ana yolun j segmentinden önceki bir i segmentinden giren ve j segmentinden önceki segmentlerde çıkış yapmayan taşıt sayıları için önceden tespit edilen oranları belirtmek üzere; j segmentindeki ana yol akımı q_j , aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$q_j = \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} r_i$$

(15)

Sıkışıklıkları önlemek için, r_i katılım akımları $r_{j,\min} \leq r_i \leq \min[r_{j,\max}, d_j]$ kısıtları dikkate alınarak, bütün segmentler için $q_j \leq q_{cap,j}$ şartını sağlayacak şekilde hesaplanmalıdır. Bu ifadelerde $q_{cap,j}$, j segmentinin kapasitesini; $r_{j,\max}$, bu segmentteki katılım akımının maksimum değerini (katılım kapasitesi); $r_{j,\min}$, bu segmentteki katılım akımının minimum değerini; d_j , bu segmentin katılım kolundaki talebi göstermektedir. Buna göre, sabit zamanlı katılım denetimleri için, denetlenen yol ağındaki bütün taşıtlar tarafından harcanan toplam süresinin minimize edilmesine eşdeğer bir amaç fonksiyonu; bu süreçte hizmet götürülen taşıtların sayısını maksimize etmeyi amaçlayan $\sum_j r_j \rightarrow$, taşıtlar tarafından katedilen toplam mesafeyi maksimize

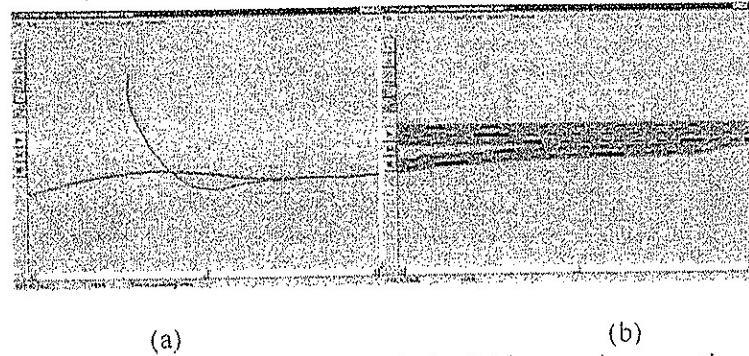
etmeyi amaçlayan $\sum_j q_j \rightarrow$ (burada j segmentinin uzunluğunu göstermektedir) veya katılım kollarındaki kuyruklaşmaları minimize etmeyi amaçlayan $\sum_j (d_j - r_j)^2 \rightarrow$ eşitliği şeklinde ele alınabilir. Sabit

zamanlı denetimle ilgili bütün bu formülasyon, günümüzde bilgisayar programları ile kolayca çözülebilen lineer-programlama yada quadratik programlama problemlerine öncülük etmektedir. [5]

4. SANAL ORTAMDA SABİT ZAMANLI BİR KATILIM DENETİMİ ÖRNEĞİ

Katılım denetimi, bu çalışmada, sahadaki yol ve trafik şartlarının aynen kullanıldığı VISSIM simülasyon ortamında ve sabit bir zaman planı kullanılarak gerçekleştirildi. Bu amaçla önce, teste konu olan 3 şeritli ana yol hattı (link-1) ile, TEM otoyolundan gelen 2 şeritli katılım kolunun (link-2) geometrik yapısı arka plandaki yol haritasından yararlanarak simülatörde oluşturuldu (yalnız Harem-Gebze gidiş yönü için). VISSIM'de katılım noktasını da kapsayan ana yolun 1.5 km uzunluğundaki bir segmenti ile, katılım yolunu gösteren test ekranının görünümü Şekil-6.a'da; bu görünüşte katılım denetiminin yapıldığı Kozyatağı mevkiinin yakın plandan görünümü ise Şekil-6.b'de görülmektedir.

Testler için sahada akşam zirve saatlerinde yapılan gözlemler sonucunda elde edilen trafik kompozisyonu ve makroskopik akım bilgileri kullanıldı. Buna göre, trafik kompozisyonu (taşıt hacmi içerisindeki ağır yük taşıtlarının oranı) 0.20, taşıt boyutları 5-18 metre ve taşıtların serbest ulaşım hızları 80-100 km/saat aralığında doğrusal bir dağılım gösterecek şekilde seçildi. 2.5 saat süreli test boyunca katılım noktasına doğru her iki yaklaşımdan gelen taleplerin dağılımı; ana yol hattı (link-1) için, Şekil-6a'daki test ekranının en solunda görünen giriş noktasında; katılım kolu (link-2) için, ekranın en üstünde görünen giriş noktasında yapılan gözlemlere bağlı olarak Tablo-1'de verildiği şekilde düzenlendi.



Şekil-6. (a)-VISSIM'de 1.5 km uzunluğundaki ana yol segmenti ve katılım yolunu gösteren test ekranının görünümü, (b)- Ana ekranda katılım denetiminin yapıldığı Kozyatağı mevkiinin yakın plandan görünümü.

Bu şartlar altında her biri 2.5 saatlik süreyi kapsayan iki ayrı test gerçekleştirildi. İlk testte, sahadaki denetimsiz şartlar, ikinci testte ise sabit zamanlı katılım denetiminin yapıldığı şartlar simüle edildi. Her iki test için sahada gözlenen trafik kompozisyonu ve akım verileri aynen kullanıldı. İkinci test için kullanılan sinyal zamanlaması, Tablo-1'de verilen zaman aralıklarının her biri için, ilk test sonucunda katılım noktasında oluşan

kuyruk uzunluğuna bağlı olarak değiştirildi. Buna göre, ikinci test için katılım denetiminde kullanılan trafik ışığının çevrim süresi (devre) 100 saniye; yeşil ışık süreleri ise sırasıyla 95, 75 ve 90 saniye olarak seçildi.

Tablo-1. Katılım noktasına doğru her iki yaklaşımdan gelen taleplerin 2.5 saatlik test süresi boyunca değişimi.

simülasyon süresi (saniye)	ana yol (link-1) taşıt girişi (taşıt/saat)	katılım kolu (link-2) taşıt girişi (taşıt/saat)
0-3000	2500	2500
3001-6000	3100	2500
6001-9000	2800	2500

Test süresi boyunca taşıt başına ortalama gecikmeler ve taşıt başına ortalama duruş sayıları simülatörden 600 saniyelik (10 dakika) aralıklarla alındı ve grafikler halinde düzenlendi. Bu amaçla, ana yol ve katılım kolu üzerinde seçilen 2 ayrı yol segmenti boyunca oluşan taşıt başına gecikmelerin ve taşıt başına duruş sayılarının ortalaması dikkate alındı. Ana yol ve katılım kolu üzerinde seçilen ve katılım noktasını da içine alan bu yol segmentlerinin başlangıç ve bitiş noktaları ile uzunlukları Tablo-2’de verilmiştir.

Tablo-2. Performans analizi için esas alınan yol segmentlerinin uzunlukları ve konumları.

segment no	başlangıç yolu ve konumu	bitiş yolu ve konumu	segment uzunluğu
1	1 - 10.0 m.	1 - 1003.2 m.	993.2 m.
2	2 - 10.7 m.	1 - 989.0 m.	887.7 m.

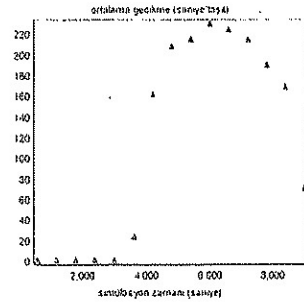
5. SONUÇLAR

Taşıt başına ortalama gecikmelerin ve duruş sayılarının 2.5 saatlik testler boyunca değişimi, Şekil-7 ve Şekil-8’deki grafiklerde gösterilmiştir. Şekil-7.a sahadaki denetimsiz şartları yansıtan ilk test sonucunda elde edilen taşıt başına ortalama gecikmelerin; Şekil-7.b ise, katılım denetiminin yapıldığı şartları yansıtan ikinci test sonucunda elde edilen taşıt başına ortalama gecikmelerin değişimini göstermektedir.

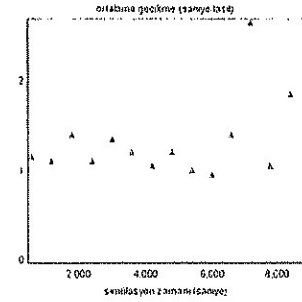
Bunun gibi, Şekil-8.a sahadaki denetimsiz şartları yansıtan ilk test sonucunda elde edilen taşıt başına ortalama duruş sayılarının; Şekil-8.b ise, katılım denetiminin yapıldığı şartları yansıtan ikinci test sonucunda elde edilen taşıt başına ortalama duruş sayılarının değişimini göstermektedir. Testlerin sonuçlarını yorumlamak için esas alınan ortalama yol uzunluğu, Tablo-2’de verilen 1 ve 2 nolu yol segmentlerinin uzunluklarının ortalaması olarak (940 m.) dikkate alındı. Bu ortalama yol uzunluğunu kateden toplam taşıt sayısı ilk test sonucunda 11295, ikinci test sonucunda ise 12636 olarak gerçekleşti.

Şekil-7 ve Şekil-8'de verilen taşıt başına gecikme ve taşıt başına duruş sayılarının anlık değerlerinin 2.5 saatlik test süresi boyunca değişiminden de anlaşılacağı üzere, bu ortalama yol uzunluğu için ilk test sonucunda gerçekleşen taşıt başına ortalama gecikme yaklaşık olarak 92 saniye, taşıt başına ortalama duruş sayısı yaklaşık olarak 1.4; ikinci test sonucunda gerçekleşen taşıt başına ortalama gecikme yaklaşık olarak 1.3 saniye, taşıt başına ortalama duruş sayısı ise yaklaşık olarak 0.0005'dir. Yine bu mesafedeki taşıt başına gecikmesiz ulaşım süresi, test sonuçlarına göre yaklaşık 41 saniye olarak tespit edildi. Bu sonuçlara göre, 2.5 saatlik test süresi boyunca bütün taşıtların katettiği toplam yol uzunluğu; ilk test için, 10617 km; ikinci test için, 11876 km.'dir. 940 metrelik ortalama yol uzunluğu boyunca bütün taşıtlar için ilk test sonucunda gerçekleşen toplam gecikme süresi, 288.9 saat; ikinci test sonucunda gerçekleşen toplam gecikme süresi, 4.56 saat; bütün taşıtlar için ilk test sonucunda gerçekleşen toplam duruş sayısı, 15813; ikinci test sonucunda gerçekleşen toplam duruş sayısı ise, 6.3'dür.

Yukarıda yapılan hesaplamalara bağlı olarak, katılım denetimi ile elde edilen taşıt başına ortalama gecikme, $[(92 - 1.4) - 41] / 41 = \% 113$ oranında azalmıştır. Bununla beraber, gecikme için ortalama değerlere göre elde edilen bu iyileşme, anlık değerler dikkate alındığında daha büyük oranlara çıkabilmektedir.

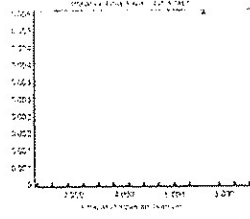


(a)

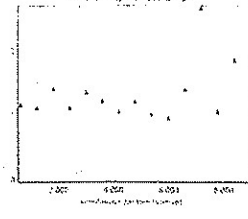


(b)

Şekil-7. (a)-Sahadaki denetimsiz şartlar altında (1.test), (b)- Katılım denetiminin yapıldığı şartlar altında (2.test) oluşan taşıt başına ortalama gecikmelerin, 2.5 saatlik test süresince değişimi.



(a)



(b)

Şekil-8. (a)-Sahadaki denetimsiz şartlar altında (1.test), (b)- Katılım denetiminin yapıldığı şartlar altında (2.test) oluşan taşıt başına ortalama duruş sayılarının, 2.5 saatlik test süresince değişimi.

6. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, trafiğin denetimi ile elde edilecek çok sayıda ekonomik ve toplumsal faydaya bir örnek olarak, ana yollar üzerindeki trafik akımlarının denetimi ile, çeşitli fayda kriterine göre ne kadar önemli iyileşmelerin yapılabileceğini göstermiştir. Denetimin bu örnek çalışmada olduğu gibi, izole katılım denetimi olarak ele alınması yerine, ana yol üzerindeki diğer katılım denetimleri ile koordineli olarak ele alınması halinde, çok daha iyi sonuçların elde edilebileceği açıktır. Bu kapsamda yeni çalışmalar planlanabilir.

Diğer taraftan, ülkemizde yaklaşık 10 milyon olan toplam taşıt sayısının 2.5 milyonluk kısmını ihtiva etmesi ile, taşıt sayısının en fazla olduğu il İstanbul'dur. Bu sayı, gelişmiş batılı ülkelerle kıyaslandığında, yine de çok küçük boyutlarda kalmaktadır. Dolayısıyla İstanbul'da ileriki yıllarda taşıt sayısının hızla artmasına bağlı olarak, yollarda teknolojik trafik denetiminin gerekliliği ağırlığını daha da çok hissettirecektir. Bu nedenle, trafik akımlarının denetimi için gerekli hazırlık çalışmalarının hızlandırılması, bu açıdan da önem arz etmektedir. Bu çalışmaya benzer çalışmalar, söz konusu hazırlıklar kapsamında değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- 1-Haj-Salem, H., v.d.; 'Ramp Metering Impact On Urban Corridor Traffic: Field Results', Transportation Research, A. Vol. 29, pp. 303-319, 1995.
- 2-Hiroshi I., Takashi H.; Road Traffic Control, University of Tokyo Press, 1975.
- 3-May, A.D.; Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall, New Jersey, 1990.

- 4-Pampal, S., Açılış Konuşması, Traffic-2002 Uluslar arası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi. 8-12 Mayıs. Ankara, 2002.
- 5-Papageorgiou M., v.d.; 'Freeway Ramp Metering: An Overview', IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, October1-3, Dearborn (MI), USA, 2000.
- 6-Schibata, J., 'A Comparision of ITS Progress Around the World', 4th.World Congress on ITS Spécial Session 17, 21-24 October-ICC Berlin, 1997.
- 7-Transyt-7F Users Guide, University of Florida Transportation Research Center, 1998.
- 8-VISSIM-User Manual: PTV system Software and Consulting GmbH; Stumpfstraße 1
D-76131 Karlsruhe, Germany, 2000.
- 9-Zhang, H., v.d.; 'Some General Results On The Optimal Ramp Control Problem', Transportation Research, C. Vol. 4, No. 2, pp51-69, 1996.