

MAKROSKOPİK AKIM KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN BİR ÖLÇME VE DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ; TRAFİK OPTİMİZASYONU

Necla TEKTAŞ¹, Ahmet AKBAŞ²

¹Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Dr.
²Marmara Üniversitesi, T.B.M.Y.O., Öğretim Görevlisi, Dr.

A MEASURING and EVALUATION METHOD FOR ACQUIRING MACROSCOPIC FLOW CHARACTERISTICS; TRAFFIC OPTIMIZATION

Abstract: For the real time control applications, the macroscopic characteristics of traffic flows are determined by using various evaluation methods which use the microscopic flow parameters obtained from the traffic detectors. In this study, such a measuring and evaluating method has been proposed. The aim of the proposed method is to obtain the macroscopic characteristics with their minimum error. The proposed method has also a meaning for other control techniques which refer the space and time variables as discrete variables. Due to this method the macroscopic variables which are characterize the traffic flows are determined as accumulation of measured microscopic variables during the discrete time periods. The proposed method has been used in the simulation based tests related to a ramp metering process which uses dynamic optimization model developed by this study. Obtained performance developments are satisfied.

Keywords: Traffic, Optimization

I. GİRİŞ

Günümüzde karayolu ağlarında giderek yaygınlaşma eğiliminde olan sıkışıklıklar, trafik akımlarının güçlü optimizasyon yöntemleriyle birleştirilmiş teknikler kullanılarak denetimini zorunlu hale getirmiştir. Bu amaçla, trafik akımlarının karakteristiklerinin gerçek zamanlı olarak belirlenmesi gerekir. Modern trafik kontrol sistemlerinde bu amaçla yol kaplamasının altına yerleştirilen trafik dedektörlerinin ürettiği mikroskopik akım parametrelerinden yararlanılır.

Makroskopik akım karakteristikleri, bu yolla ölçülen mikroskopik akım parametrelerinin çeşitli yaklaşımlarla değerlendirilmesi sonucunda belirlenir. Literatürde bu amaçla kullanılan çeşitli değerlendirme yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemlerin bir çoğuna göre, makroskopik akım karakteristikleri anlık meşguliyet süresi (occupancy time) ve anlık taşıt takip süresi (time headway) ölçümleri esas alınarak belirlenir.

MAKROSKOPİK AKIM KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN BİR ÖLÇME ve DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ; TRAFİK OPTİMİZASYONU

Özet: Gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında, trafik akımlarının makroskopik karakteristikleri, trafik dedektörleri üzerinden elde edilen mikroskopik akım parametrelerinin çeşitli yöntemlerle değerlendirilmesi sonucunda belirlenir. Bu çalışmada, makroskopik akım karakteristiklerinin daha az hatayla belirlenmesini amaçlayan böyle bir ölçme ve değerlendirme yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem, yol ve zaman değişkenlerinin ayrık değişkenler olarak dikkate alındığı diğer kontrol teknikleri için de anlamlıdır. Buna göre, bir trafik akımını karakterize eden makroskopik büyüklükler, ayrık yol birimi olarak dikkate alınan bir yol segmenti için tanımlanır ve bu büyüklükler, bir ayrık zaman birimi süresince trafik dedektörleri üzerinden ölçülen mikroskopik akım parametrelerinin kümülatif değerleri dikkate alınarak belirlenir. Önerilen bu yöntem, bir katılım denetimi sürecine yönelik dinamik optimizasyon modeline ilişkin simülasyon tabanlı testlerde kullanılmış ve tatmin edici sonuçlar alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Trafik, Optimizasyon

Ölçme ve değerlendirme için kullanılan bu yaklaşım şekli, gerçek makroskopik akım verilerinin belirlenmesinde önemli boyuttaki hata payını da beraberinde getirmektedir. Bu ise, trafik akımlarının denetim sürecinde etkinliğin azalmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, katılım denetimi sürecinde kullanılabilecek bir optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda, makroskopik akım karakteristiklerinin daha az hatayla belirlenmesini amaçlayan bir ölçme ve değerlendirme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem, yol ve zaman değişkenlerinin ayrık değişkenler olarak dikkate alındığı diğer kontrol teknikleri için de anlamlıdır. Buna göre, bir trafik akımını karakterize eden makroskopik büyüklükler, ayrık yol birimi olarak dikkate alınan bir yol segmenti için tanımlanır ve bu büyüklükler, bir ayrık zaman birimi süresince trafik dedektörleri üzerinden ölçülen mikroskopik akım parametrelerinin kümülatif değerleri dikkate alınarak belirlenir.

Geliştirilen optimizasyon yöntemi ve bu kapsamda önerilen ölçme ve değerlendirme yönteminin sağladığı yararlar, VISSIM simülasyon ortamında yapılan testlerle ortaya konmuştur. Sonuçların oldukça tatmin edici olduğu gözlenmiştir.

II. TRAFİK AKIMLARININ ANALİZİ

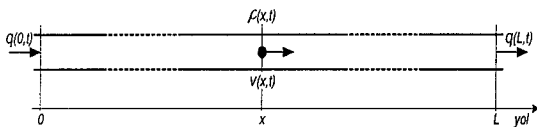
Karayolu ağlarında trafiğin oluşumu, birbirini takip eden taşıtların uzunluğuna yol kesitleri (*şerit*) boyunca oluşturduğu kuyruklar şeklindedir. Her trafik şeridi için belirli bir yöne ve belirli yol kullanım şartlarına haiz olan bu görüntüye *trafik akımı* ya da kısaca *akım* denir.

Bir trafik akımı içerisinde yer alan taşıtların davranışı, doğal olarak taşıt sürücülerinin psikolojik şartları, 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, gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için, trafik akımları da bütün fiziksel olaylar gibi, karakteristik özelliklerini belirten modeller kullanılarak yorumlanabilmelidir. Bu amaçla, trafik akımlarının makroskopik özelliklerini karakterize eden üç temel büyüklük kullanılır. Şekil.1

- Akım (flow, q),
- Yoğunluk (density, ρ),
- Akım hızı (speed, v),

Bunlardan akım (q), yolun bir kesitinden birim sürede geçen taşıt sayısını (taşıtlar/saat); yoğunluk (ρ), yolun birim uzunluktaki bir parçasını meşgul eden taşıtların sayısını (taşıtlar/km); akım hızı (ortalama hız, v) da, yolun bir kesitinden belirli bir sürede geçen taşıtların ortalama hızını (km/saat) ifade eder. [1, 2]



Şekil.1. Bir Ana Yol Hattı Boyunca Trafik Akımının Temel Karakteristiklerinin Dağılımı [1]

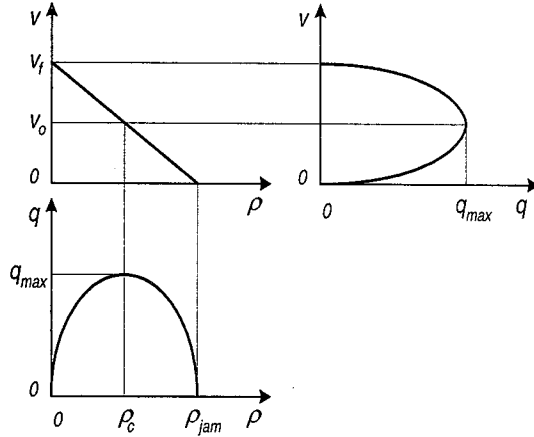
Buna göre, her trafik akımının makroskopik karakteristikleri, yolun herhangi bir kesitinde ve herhangi bir anda aşağıdaki eşitliği sağlar [3]:

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

Bu ifadede x yol, t zaman değişkenlerini temsil eder.

II.1. Trafik Akımlarının Dinamiği

(1) eşitliği ile ifade edilen ilişkinin yanı sıra, literatürde akım karakteristikleri arasındaki ikili ilişkileri izah eden (q,ρ) ; (v,ρ) ; (v,q) model yaklaşımları da önemli bir yer tutar. Bu kapsamdaki modellerin hemen hepsi, akım değişkenleri arasındaki ilişki için Şekil.2'deki grafiklerle özetlenen değişim şekillerini benimsemektedir. [2].



Şekil.2. Akım Karakteristikleri Arasındaki İkili İlişkilerin Grafik Gösterilimi [3]

Buna göre, *trafik sıkışıklığı* olgusu, karayolu üzerindeki yoğunluğun belirli bir kritik değeri (ρ_c) aşması haline karşılık gelen fiziksel durumdur [4]. Karayolu ağlarında söz konusu trafik sıkışıklıklarının artmasıyla beraber, gerçek zamanlı değerlendirmelere imkan sağlayan analiz yöntemleri ihtiyaç haline gelmiştir. Bu ihtiyaç, akım karakteristiklerinin ileriye dönük olarak nasıl gelişeceğine ilişkin tahminlerin yapılmasına da imkan sağlayan dinamik akım modellerinin gelişmesiyle karşılanmaya başlamıştır.

Bu kapsamda literatürde yer alan belli başlı modeller; akışkan modeli, şok dalgaları modeli, lineer taşıt takip modeli, lineer olmayan taşıt takip modeli, istatistiksel model başlıkları altında toplanabilir. Bunların en yaygın olarak kullanılanı, trafik akımlarının dinamiğini bir akışkanın dinamiğine benzetirerek yorumlayan '*akışkan modeli*'dir. Buna göre, akım ve yoğunluğun yol ve zamana bağlı değişimi, aşağıda verilen birinci dereceden kısmi diferansiyel denklemlerle (hiperbolik model) yorumlanmaktadır [2, 5]:

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

Pratikte yoğunluk, belirli uzunluktaki bir yol segmenti; akım, belirli süredeki bir zaman aralığı, 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 zaman modelleri (fark denklemleri) ile temsil etmek, daha doğal bir yaklaşımdır [6].

II.2. Mikroskopik Akım Parametreleri

Bir optimizasyon sürecinde trafik akımlarının dinamiği ile ilgili gelişmelerin analiz edilebilmesi için, akım karakteristiklerini yansıtan parametrelere ilişkin verilerin elde edilmesi ve bunların çeşitli matematiksel modeller çerçevesinde yorumlanması şarttır.

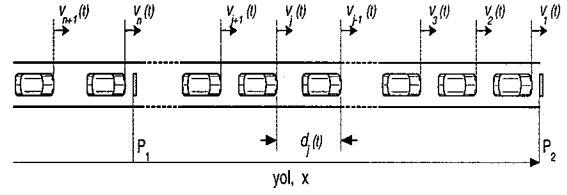
Günümüzde bu amaçla, gerçek zamanlı olmayan geleneksel ölçme yöntemlerinin yerine, gerçek zamanlı verilerin üretilmesine imkan sağlayan ve taşıtların geçiş yolu üzerine yerleştirilen trafik dedektörleri vasıtasıyla elde edilen ölçümlerden yararlanılmaktadır.

Taşıtların davranışlarının tek tek analiz edilebilmesinin yanı sıra, taşıt guruplarına ilişkin davranışların ayrıntılı olarak analiz edilebilmesine de imkan sağlayan bu ölçümler ile elde edilen parametreler, *mikroskopik akım parametreleri* olarak bilinir. Akım karakteristiklerine ilişkin makroskopik veriler, trafik dedektörleri üzerinden ölçülen mikroskopik akım parametrelerinden yararlanılarak çeşitli şekillerde üretilebilmektedir. Bu amaçla en yaygın olarak kullanılan mikroskopik akım parametreleri, aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- taşıt takip mesafesi (*distance headway, d*),
- taşıt takip süresi (*time headway, h*),
- meşgulliyet süresi (*occupancy time, o*).

Taşıtların takip mesafesi, herhangi bir t anında birbirini takip eden iki taşıt arasındaki mesafeyi; taşıt takip süresi, herhangi bir yol kesitinden geçen iki taşıtların, aynı noktadan geçme anları arasındaki süreyi; meşgulliyet süresi de, bir taşıtların uzunluğu belli olan bir yol kesitini meşgul etme süresi olarak tanımlanır [7].

Şekil.3'de bir trafik akımının $t=t_0$ anındaki görüntüsü ve akım parametrelerinin ölçülmesi için yol kaplamasının altına yerleştirildiği varsayılan trafik dedektörlerinin konumları gösterilmiştir. Burada j , taşıt numarasını ($j=1,2,\dots,n,\dots$); $v_j(t)$, $t = t_0$ anındaki taşıt hızlarını temsil etmektedir. Mikroskopik akım parametrelerinin en sık kullanılanlarından birisi olan taşıt takip mesafesi bu şekil üzerinde gösterilmiştir. Buna göre; $d_j(t)$, j nolu taşıt ile, önündeki taşıtların burunları arasındaki taşıt takip mesafesinin $t=t_0$ anında aldığı değeri belirtmektedir.

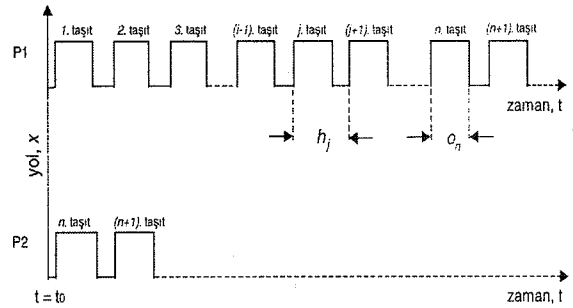


Şekil 3. Bir Trafik Akımının $t=t_0$ Anındaki Görüntüsü [7]

Şekil.3'de verilen taşıt kompozisyonuna göre, yolun P1 ve P2 kesitlerine yerleştirilen trafik dedektörleri üzerinden alınan dijital karakterdeki işaretlerin $t = t_0$ anından itibaren değişimi, Şekil.4'de bir örneği verilen değişim gibi olacaktır. Mikroskopik akım parametrelerinin en sık kullanılanlarından diğer ikisi de bu şekil üzerinde gösterilmiştir: taşıt takip süresi ve meşgulliyet süresi.

Buna göre, P1 noktasından j nolu taşıt ile önündeki taşıtların geçiş zamanları arasındaki fark (j nolu taşıtların takip süresi) h_j sembolü ile gösterilmiştir. Bunun gibi, n nolu taşıtların P1 noktasına yerleştirilen trafik dedektörünü meşgul etme süresi, o_n sembolü ile gösterilmiştir.

Şekil.4'de gösterilen değişim şekline göre, her kare dalganın yükselen (çıkan) kenarı, ilgili taşıtların trafik dedektörüne yaklaştığı ana; alçalan (inen) kenarı da, ilgili taşıtların trafik dedektöründen uzaklaşmaya başladığı ana karşılık gelmektedir. Bu iki an arasındaki sürede, taşıtların trafik dedektörünü meşgul etmektedir (occupancy time, o). Bu süre, taşıtların boyu, taşıtların hızı ve trafik dedektörünün boyuna bağlı olarak değişir [7].



Şekil 4. Şekil 3'de Gösterilen Taşıtların Kompozisyonuna göre P1 ve P2 Noktalarındaki Trafik Dedektörleri Üzerinden Alınan Mikroskopik Akım Parametrelerine İlişkin İşaretlerin Zamanla Değişim Şekli [7]

Mikroskopik akım parametrelerinden taşıt takip süresi, temel akım karakteristiklerinden 'akım'ın doğrudan bir ölçüsünü vermektedir. Buna göre, taşıt takip süresi h , 'saniye' birimiyle ölçüldüğünde, akımın 'taşıtlar/saat' birimiyle ifade edilen anlık değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$q = 3600 / h \quad (3)$$

Bunun gibi, mikroskopik akım parametrelerinden 'meşguliyet süresi' de, temel akım karakteristiklerinden 'hız'ın doğrudan bir ölçüsünü vermektedir. Buna göre, meşguliyet süresi o , 'saniye' birimiyle, meşgul edilen yol uzunluğu l 'metre' birimi ile ölçüldüğünde, hızın 'km/saat' birimiyle ifade edilen anlık değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$v = 3.6 l / o \quad (4)$$

Bu parametrelerin ölçüldüğü trafik dedektörünün boyu l_d ve taşıtın boyu l_t de 'metre' birimi ile ölçüldüğünde, (4) eşitliğinde kullanılan yol uzunluğu, aşağıdaki gibi alınabilir:

$$l = l_d + l_t \quad (5)$$

Mikroskopik akım parametrelerinden 'taşıt takip mesafesi', temel akım karakteristiklerinden 'yoğunluk'un doğrudan bir ölçüsünü vermektedir. Şöyle ki, herhangi bir t anında iki taşıt arasında ölçülen taşıt takip mesafesi d , 'metre' birimi ile ifade edilirse; bu anda yolun 1 km. lik uzunluğunu meşgul eden taşıtların sayısı, yani yoğunluk, 'taşıt/km' cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\rho = 1000 / d \quad (6)$$

II.3. Trafik Akımlarının Denetimi

Trafik akımlarının optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar anayollar, sinyalize kavşaklar ve sinyalize arterlerdeki akımların denetim sürecine ilişkin optimizasyon yöntemlerini ele almaktadır. Bu kapsamda, ana yollar üzerindeki akımların optimizasyonu için kullanılan denetim yöntemleri,

- *katılım denetimi (ramp metering),*
- *değişken hız denetimi (variable speed control),*
- *güzergah seçimi (route guidance)*

ana başlıkları altında toplanabilir. Ana yollarda meydana gelen trafik sıkışıklığının önlenmesi amacıyla bu yöntemlerin en yaygın olarak kullanılanı katılım denetimidir [6].

Katılım denetimi, bir ana yol hattına katılım kolundan gelen talebin, ana yol akımları üzerindeki bozucu etkilerini azaltarak, ana yol üzerinde kapasite kullanımını iyileştirmeyi amaçlar. Bu yöntemde göre, denetim mekanizması, katılım kolunun ana yola bağlanma noktasına konan bir trafik ışığının yeşil ışık süresini (g) ayarlamak suretiyle oluşturulur [8].

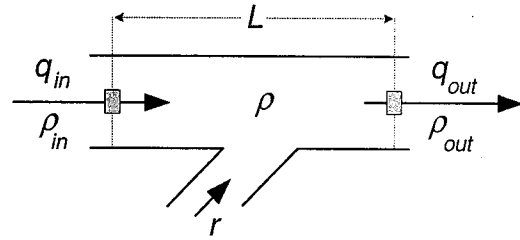
Bu çalışma ile geliştirilen dinamik optimizasyon modelinin eşlik ettiği ve ana yol trafiğinin katılım

denetimi yöntemi ile denetlendiği bir süreç aşağıda tanıtılmaktadır.

III. TRAFİK OPTİMİZASYONU

Dinamik optimizasyon modelinin geliştirilmesi için esas alınan ve bir katılım kolunu da kapsayan L uzunluğundaki yol segmentinin geometrik yapısı Şekil.5'de gösterilmiştir.

Bu optimizasyon modeline göre, optimizasyon süresince ihtiyaç duyulan mikroskopik akım parametrelerine ilişkin ölçümler, yol kaplamasının altına yerleştirilen trafik dedektörleri üzerinden elde edilir. Şekilde, modelin kullandığı ve orta şeritlere yerleştirildiği varsayılan trafik dedektörlerinin yerleşimi de gösterilmiştir [6].



Şekil.5. Dinamik Optimizasyon Modeline göre Yapılan Atamalar

Katılım akımının bir sonraki ayrık zaman adımında alması gereken değer, $r(k+1)$, ana yol akımının makroskopik akım karakteristiklerinden, akım $q(k)$ ve $\rho(k)$ yoğunluğun, segmentin giriş ve çıkış noktalarında ölçülen ortalama değerleri (q_{in}, ρ_{in} ve q_{out}, ρ_{out}) dikkate alınarak; segment yoğunluğu (ρ) ise, segmentin giriş ve çıkış noktalarındaki yoğunluğun ortalama değeri ile belirlenir. Bu amaçla, yürürlükteki T süreli ayrık zaman periyodunun bitiminde, bu süre boyunca elde edilen mikroskopik akım parametrelerinden yararlanarak hesaplanan kümülatif meşguliyet süresi (Σo), taşıt sayısı (N) ve kümülatif ortalama taşıt takip süresi (\bar{h}) verilerinden yararlanılır. Bu değerlendirme ve hesaplamalar, her ayrık zaman periyodunun bitiminde tekrarlanarak, gerçek zamanlı bir optimizasyon süreci gerçekleştirilir [6].

III.1. Model Parametreleri

Dinamik optimizasyon modelinde kullanılan mikroskopik akım parametreleri ve bunların giriş ve çıkış akım karakteristiklerine ilişkin makroskopik büyüklüklerin belirlenmesi amacıyla kullanılan şekli, literatürde kullanılan yöntemlerden farklıdır. Bunun yanında, yol segmentinin bir sonraki ayrık zaman diliminde beklenen yoğunluğunun hesaplanması ve katılım akımının buna bağlı olarak belirlenmesinde takip edilen yöntem de, literatüre geçen yöntemlerden farklı ve

bu çalışmaya özgü bir yöntemdir.

Buna göre;

• Bütün akım karakteristiklerine ilişkin makroskopik değişimlerin değerlendirilmesi ve bunların her ayrık zaman adımı için aldığı ortalama değerlerin belirlenmesi amacıyla kullanılan mikroskopik akım parametreleri, T ayrık zaman periyodu süresince ölçülür. Dinamik optimizasyon modelinde bu süre, trafik ışığının sabit çevrim süresine eşit olarak (örneğin 100 saniye) alınmıştır:

$$T = c = \text{sabit} \quad (7)$$

Böylece, trafik ışığının her yeni çevriminin bir sonraki ayrık zaman süresinin başlama anı ile senkronlanması amaçlanmıştır.

• Yolun bir kesitinde herhangi bir ayrık zaman adımı için ölçülen makroskopik yoğunluk değeri, mikroskopik parametrelerden 'meşgüliyet süresi'nin ayrık zaman süresindeki kümülatif değeri dikkate alınarak belirlenir. Buna göre, k ayrık zaman adımında T periyodu boyunca trafik dedektörü üzerinden geçen taşıtların sayısı $N(k)$; bu süre içerisinde dedektör üzerinden geçen her taşıtın dedektörü (yolu) meşgul etme süresi de o_j ise, yolun ölçüm yapılan kesitinin k ayrık zaman adımındaki meşgul edilme süresine karşılık gelen kümülatif meşgüliyet süresi ($O(k)$) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$O(k) = \sum_{j=1}^{N(k)} o_j, \quad O(k) \leq T \quad (8)$$

Buna göre, akımın ölçüldüğü noktada, bir ayrık zaman süresi için sahip olduğu *doğgunluk derecesi*, aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$DS(k) = \frac{O(k)}{T}, \quad DS(k) \leq 1 \quad (9)$$

• Yolun bir kesitinde herhangi bir ayrık zaman adımı için ölçülen akımın makroskopik değeri, mikroskopik 'taşıt takip süresi'nin, ayrık zaman süresindeki ortalama değeri dikkate alınarak belirlenir. Buna göre, k ayrık zaman adımında T periyodu boyunca trafik dedektörü üzerinden geçen taşıtların sayısı $N(k)$; bu süre içerisinde dedektör üzerinden birbirini takip ederek geçen her taşıt çifti için ölçülen taşıt takip süresi de h_j ise, yolun ölçüm yapılan kesitinde k ayrık zaman adımındaki kümülatif ortalama taşıt takip süresi ($\bar{h}(k)$) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\bar{h}(k) = \frac{\sum_{j=1}^{N(k)} h_j}{N(k)}, \quad \bar{h}(k) \geq h \quad (10)$$

Makroskopik akım karakteristiklerinin, mikroskopik parametrelerin anlık değerleri yerine (8) ifadesi ile verilen kümülatif meşgüliyet süresi ve (10) ifadesi ile verilen kümülatif ortalama taşıt takip süresinden yararlanarak belirlenmesi; akımların dinamiğini yansıtan verilerin daha gerçekçi olarak elde edilmesini sağlar [6].

III.2. Dinamik Optimizasyon Modeli

Önerilen modele göre, q_{in} ve ρ_{in} sırasıyla segmentin giriş akımına (yukarı akım) ilişkin makroskopik akım ve yoğunluğu; q_{out} ve ρ_{out} , sırasıyla segmentin çıkış akımına (aşağı akım) ilişkin makroskopik akım ve yoğunluğu; ρ , segmentin ortalama yoğunluğunu; r , katılım akımını; L , segmentin uzunluğunu göstermektedir. Optimizasyon modeline göre, segmentin giriş akımına ilişkin makroskopik karakteristiklerin belirlenmesi için kullanılan mikroskopik parametreler, sırasıyla O_{in} ve \bar{h}_{in} ; segmentin çıkış akımına ilişkin makroskopik karakteristiklerin belirlenmesi için kullanılan mikroskopik parametreler de, sırasıyla O_{out} ve \bar{h}_{out} 'dir.

Dinamik optimizasyon modeli, L uzunluğundaki yol segmentinin ortalama kümülatif meşgüliyet süresi ile, giriş akımı ve çıkış akımının her ayrık zaman adımının bitiminde gerçekleşen değerlerine ($q_{in}(k)$, $q_{out}(k)$) bağlı olarak, bir sonraki ayrık zaman adımı için beklenen ortalama kümülatif meşgüliyet süresinin tahmin edilmesi (kestirilmesi) prensibine dayanır. Buna göre, L uzunluğundaki yol segmentinin ortalama kümülatif meşgüliyet süresinin k ayrık zaman periyodunda gerçekleşen değeri, segmentin giriş ve çıkış noktalarındaki kümülatif meşgüliyet sürelerinin ortalaması alınarak belirlenir:

$$\alpha(k) = \frac{O_{in}(k) + O_{out}(k)}{T} \quad (11)$$

L km. birimiyle, T saniye birimiyle verilmek üzere; sona eren ayrık zaman periyodundaki katılım akımının ($r(k)$) değeri de dikkate alınarak; taşıtların korunumu prensibine göre, bir sonraki ayrık zaman adımı için beklenen segment yoğunluğu taşıt/km birimiyle aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\rho(k+1) = \rho(k) + \frac{T}{3600 L} [q_{in}(k) - q_{out}(k) + r(k)] \quad (12)$$

ifadesi, segment yoğunluğunu belirten terimler gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\frac{\alpha(k+1)}{\rho_{jam}} = \frac{\alpha(k)}{\rho_{jam}} + \frac{T}{3600L} [q_{in}(k) - q_{out}(k) + r(k)] \quad (13)$$

Buna bağlı olarak, bir sonraki ayrık zaman adımı için beklenen kümülatif meşguliyet süresi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) + \frac{T^2}{3600\rho_{jam}L} [q_{in}(k) - q_{out}(k) + r(k)] \quad (14)$$

Bir sonraki ayrık zaman adımı için (14) ifadesine göre belirlenen beklenen kümülatif meşguliyet süresi, kritik kümülatif meşguliyet süresini aşarsa, kritik kümülatif meşguliyet süresi (O_{cr}) ile sınırlandırılır. Buna göre (14) ifadesi, aşağıdaki gibi yeniden düzenlenir:

$$\alpha(k+1) = \begin{cases} \alpha(k) + \frac{T^2}{3600\rho_{jam}L} [q_{in}(k) - q_{out}(k) + r(k)], & O(k+1) \leq O_{cr} \\ O_{cr} & , O(k+1) > O_{cr} \end{cases} \quad (15)$$

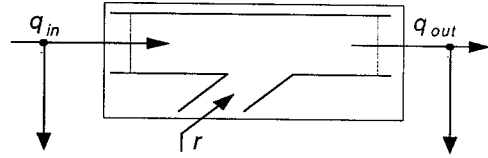
Bir sonraki ayrık zaman adımında izin verilmesi gereken katılım akımının değeri de (15) ifadesine bağlı olarak, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$r(k+1) = \frac{3600\rho_{jam}L}{T^2} [O(k+1) - O(k)] + [q_{out}(k) - q_{in}(k)] \quad (16)$$

Buna göre, bir sonraki ayrık zaman adımında yürürlüğe girecek olan yeşil ışık süresi, aşağıdaki (17) ifadesi ile belirlenir:

$$g(k+1) = \left(\frac{r(k+1)}{f_{sat}} \right) \cdot c, \quad \in [g_{min}, g_{max}] \quad (17)$$

Yukarıdaki açıklamalara bağlı olarak dinamik optimizasyon modeli Şekil-6'daki blok şema ile özetlenmiştir:



$$r(k+1) = 3600\rho_{jam}L/T^2 [O(k+1) - O(k)] + [q_{out}(k) - q_{in}(k)]$$

\uparrow O_{cr}

Şekil.6. Dinamik Optimizasyon Modeli.

Önerilen modele göre, optimizasyon sürecinde segment yoğunluğunun kritik yoğunluğa yaklaşması amaçlanmaktadır. Buna göre, K ayrık zaman adımı süresince performans indeksinin en aza indirilmesi ile, segment boyunca taşıtlar tarafından harcanan toplam süresi de en aza indirilmiş olacaktır.

$$\sum_{k=1}^K [\alpha(k) - O_{cr}]^2 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \quad (18)$$

Buna göre, minimize edilmeye çalışılan ulaşım süresinin K ayrık zaman süresi sonunda alacağı değeri belirleyen amaç fonksiyonu, aşağıdaki gibi alınmıştır:

$$PI = T_s = T \sum_{k=1}^K [\rho(k) \cdot L] \quad (19)$$

Burada L , yol segmentinin km. birimiyle ifade edilen uzunluğunu; Δ , yolun şerit sayısını; $\rho(k)$ da, segmentin k ayrık zaman adımında gerçekleşen ortalama yoğunluğunu göstermektedir [6].

IV. SİMÜLASYON TABANLI TESTLER

Dinamik optimizasyon modelinin, ana yolların katılım noktalarındaki denetim sürecinde kullanımına ilişkin uygulama örneği, D100 ana yolunun Harem'den Gebze'ye gidiş yönünde Göztepe-Bostancı köprülülük kavşakları arasındaki kesiti üzerinde yapılan simülasyon tabanlı testlerle gerçekleştirilmiştir. Bu yol kesiti, akşam zirve saatlerde yaşanan tekrarlayan karakterdeki sıkışıklığa sahiptir.

Yolun Kozyatağı katılımını kapsayan yaklaşık 1 km uzunluğundaki segmentine ilişkin, akşam zirve saatlerinde yapılan saha gözlemleri ile belirlenen trafik akımı verileri Tablo.1'de özetlenmiştir.

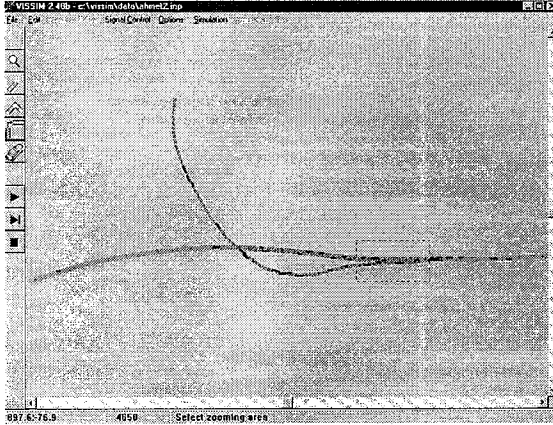
Söz konusu veriler 2.5 saatlik bir gözlem süresine ilişkindir.

Tablo-1. Katılım Noktasına Doğru Ana Yol ve Katılım Kolundan Gelen Taleplerin Dağılımı.

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

Buna göre, sahadaki denetimsiz şartları ve dinamik optimizasyon modelini esas alan katılım denetiminin kullanıldığı şartları yansıtan 2 ayrı test VISSIM simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir [9]. Söz konusu testlerin her biri, 2.5 saatlik (9000 saniye) bir simülasyon süresini kapsamaktadır.

ViSSim'de test ekranının görüntüsü Şekil.7'de verilmiştir. Bu şekilde kare şeklinde işaretlenen kesit, katılım noktasını göstermektedir.



Şekil.7. VISSIM'de 1.5 km Uzunluğundaki Ana Yol Segmenti ve Katılım Yolunu Gösteren Test Ekranının Görünümü

IV.1. Atamalar

Dinamik optimizasyon modeline göre, bir sonraki ayırık zaman adımında yürürlüğe girecek olan yeşil ışık süresinin hesaplanması için esas alınan sabitler ve model parametreleri; saha gözlemleri sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak aşağıdaki gibi seçilmiştir:

- Trafik ışığının çevrim süresi: $c = T = 100$ saniye,
- Trafiğin durma yoğunluğu : $\rho_{jam} = 145$ taşıt/km.,
- Kritik kümülatif meşguliyet süresi: $O_{cr} = 35$ sn,

- Segment uzunluğu : $L = 1$ km.,

Dinamik optimizasyon modeline göre, dikkate alınan limit değerler ve kısıtlara ilişkin sabit atamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır:

- Maksimum katılım akımı : $r_{sat} = 1000$ taşıt/saat/şer
- Maksimum yeşil ışık süresi : $g_{max} = 95$ saniye,
- Minimum yeşil ışık süresi : $g_{min} = 5$ saniye.

IV.2. Testler

VISSIM, kontrol sürecinde elde edilen performansın değerlendirilebilmesi amacıyla, çeşitli parametrik analizlerin yapılmasına imkan sağlamaktadır. Bu kapsamda dinamik optimizasyon modelinin uygulanması halinde elde edilen performansın karşılaştırılabilmesi için, 2 ayrı performans parametresine ilişkin ölçümlerin yapılması öngörülmüştür:

- karşılana talep,
- taşı başına ortalama ulaşım süresi.

Simülasyon sürecinde, her iki parametreye ilişkin ölçümler, gerek ana yol segmenti ve gerekse katılım kolu için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu amaçla ana yol ve katılım kolu üzerinde performans verilerinin alınması için belirlenen segmentler Tablo.2'de verildiği gibi seçilmiştir.

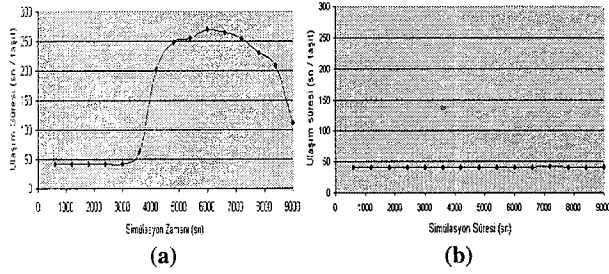
Tablo.2. Performans Analizi İçin Esas Alınan Yol Segmentlerinin Uzunlukları ve Konumları.

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.

Sonuçlar, ana yol ve katılım kolu segmentlerine ilişkin ölçümlerin ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir.

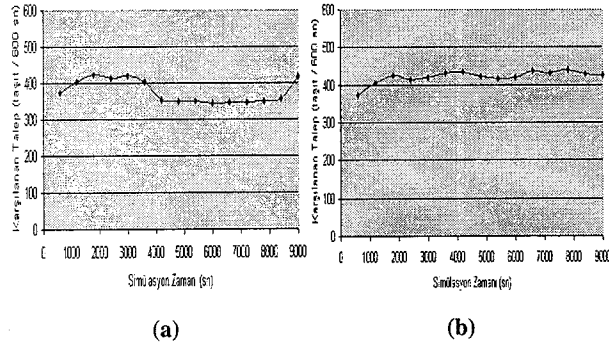
V. SONUÇLAR

Şekil.8-a'da, sahadaki denetimsiz şartlar altında yapılan birinci test sonucunda; Şekil.8b'de ise, katılım denetiminin uygulandığı şartlar altında yapılan ikinci test sonucunda elde edilen ve Tablo.2'de başlangıç ve bitiş konumlarıyla uzunluğu verilen her iki segment (segment no:1 ve 2) boyunca gerçekleşen taşı başına ortalama ulaşım süresine ilişkin sonuçların ortalaması gösterilmiştir.



Şekil.8. Ortalama ulaşım süresinin 2.5 saatlik test süreci boyunca değişimi: (a)-Test-1 sonuçları, (b)-Test-2 sonuçları.

Bunun gibi; Şekil.9-a'da, sahadaki denetimsiz şartlar altında yapılan birinci test sonucunda; Şekil.9-b'de ise, katılım denetiminin uygulandığı şartlar altında yapılan ikinci test sonucunda elde edilen ve Tablo.2'de başlangıç ve bitiş konumlarıyla uzunluğu verilen her iki segmentte (segment no:1 ve 2) gerçekleşen karşılanan taleplere ilişkin sonuçların ortalaması gösterilmiştir.



Şekil.9. Ortalama ulaşım talebinin 2.5 saatlik test süreci boyunca değişimi: (a)-Test-1 sonuçları, (b)-Test-2 sonuçları.

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 alındığında; bu ortalama yol uzunluğunu kateden toplam taşıt sayısı

1. testte denetimsiz şartlarda 11295 taşıt,
2. testte katılım denetimi ile 12636 taşıttır.

Bu durumda; talep karşılama oranı,

$$12636-11295=1341$$

%11 oranında iyileşmiştir.

2.5 saatlik test süresi boyunca, 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 6.3 saniye, taşıt başına ortalama duruş sayısı ise yaklaşık olarak 0.005'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;

1. test için, $11295 \times 940m. = 10617 \text{ km};$
2. test için, $12636 \times 940m. = 11876 \text{ km.}'dir.$

940 metrelik ortalama yol uzunluğu boyunca bütün taşıtlar için

1. test sonucunda gerçekleşen toplam gecikme süresi,

$$11295 \times 92sn. = 288.9 \text{ saat};$$

2. test sonucunda gerçekleşen toplam gecikme süresi,

$$12636 \times 6.3sn. = 22.11 \text{ saat};$$

bütün taşıtlar için

1. test sonucunda gerçekleşen toplam duruş sayısı,

$$11295 \times 1.4 = 15813;$$

2. test sonucunda gerçekleşen toplam duruş sayısı ise;

$$12636 \times 0.005 = 63.18'dür.$$

Yukarıda yapılan hesaplamalara bağlı olarak, katılım denetimi ile elde edilen taşıt başına ortalama gecikme,

$$[(92 - 6.3) - 41] / 41 = \% 109$$

oranında azalmıştır. Bununla beraber, gecikme için ortalama değerlere göre elde edilen bu iyileşme, anlık değerler dikkate alındığında daha büyük oranlara çıkabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, trafiğin denetimi ile çok sayıda ekonomik ve toplumsal fayda ile ilgili olarak önemli iyileşmelerin yapılabileceğini göstermiştir.

VI. TARTIŞMA

Denetimin bu çalışmada olduğu gibi, izole katılım denetimi olarak ele alınması yerine, anayol üzerindeki diğer katılım denetimleri ile koordineli olarak ele alınması halinde, çok daha iyi sonuçların elde edilebileceği açıktır. Bu kapsamda yeni çalışmalar planlanabilir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

- [1] Akbaş, A., Tektaş, N., & Tektaş, M. (2002). Trafik Sıkışıklıklarının Analizi Üzerine Bir Eğitim Çalışması. II. Uluslararası Eğitim Teknolojileri Sempozyumu, Adapazarı, ss.1-17.
- [2] Richards, P.I. (1956). Shockwaves on the Highway. *Operations Research*, 4, ss.42-51.
- [3] May, A.D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. New Jersey: Prentice-Hall.
- [4] Zhang, H., Rihchie, S., & Recker, W. (1996). Some General Results On The Optimal Ramp Control Problem. *Transportation Research*, 4(2), ss.51-69.
- [5] Hiroshi, I., & Takashi, H. (1975). *Road Traffic Control*. Tokyo: University of Tokyo Press.
- [6] Tektaş, N. (2003). Kent İçi Transit Yollarda Trafiğin Optimizasyonu (İstanbul İçin Bir Uygulama). *Yayınlanmamış Doktora Tezi*. İstanbul: Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- [7] Akbaş, A.. (2001). Kent İçi Trafik Sinyal Sisteminin Optimal Kontrolü (Trafik Optimizasyonu). *Yayınlanmamış Doktora Tezi*. İstanbul: Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] Papageorgiou, M., & Kotsialos, A.. (2000). Freeway Ramp Metering: An Overview. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, October 1-3, ss.168-185.
- [9] VISSIM. (2000). *User Manual*. Karlsruhe: PTV system Software and Consulting GmbH.

Necla TEKTAŞ (tektas@marmara.edu.tr) has Ph.D. of Econometrics at Marmara University Social Sciences Institute. Her research areas are traffic optimization, applied statistics, artificial intelligence.

Ahmet AKBAŞ (ahmetakbas@marmara.edu.tr) has Ph.D. of Control and Computer Education Department at Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences. His research areas include process control and instrumentation on industrial and biomedical subjects.