

## تخمین زن تطبیقی حالات ترافیک با استفاده از ایده ترکیب تخمین پارامترهای مدل ترافیک

احسان جعفری<sup>۱</sup>، بهزاد مشیری<sup>۲</sup>، کریم سلحشور<sup>۳</sup>، امین رهمزانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، ehsanjafari@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد، قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، moshiri@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده نفت تهران، دانشگاه صنعت نفت، salahshoor@put.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی دکترا، قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، aminramezani@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۸/۱۰/۱۰، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۹/۳/۱۱)

**چکیده:** در این مقاله نتایج شبیه‌سازی تخمین زن غیرخطی حالات ترافیک با اندازه‌گیری‌های ترافیکی بیان شده‌اند. رویکرد عمومی برای تخمین تطبیقی و زمان‌حقیقی حالات ترافیک بزرگراه بر مبنای مدل ماکروسکوپی غیرخطی ترافیک و فیلتر کالمن تعمیم یافته می‌باشد. مدل ماکروسکوپی ترافیک دارای سه پارامتر مهم، نامعلوم و متغیر: سرعت آزاد، چگالی بحرانی و توان می‌باشد که این پارامترها را باید با روش‌های برون‌خط و یا برخط تعیین کرد. یکی از زمینه‌های جدید در تخمین حالات ترافیک، تخمین برخط متغیرهای ترافیک (جریان ترافیک، سرعت متوسط و چگالی ترافیک) و پارامترهای مهم مدل ترافیک می‌باشد که از مزایای مهم این روش نسبت به تخمین برون‌خط پارامترهای مدل می‌توان به: عدم نیاز به پردازش خارج خط برای تعیین این پارامترها، تطبیق اتوماتیک و برخط مدل با تغییر در شرایط محیطی و ... اشاره کرد. در این مقاله نیز رویکرد تخمین برخط متغیرهای ترافیک به همراه پارامترهای مدل اتخاذ شده است و بعضی از نقاط ضعف در روش‌های قبل با شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده‌اند و در ادامه دو روش مبتنی بر فیلترینگ مجزا و ترکیب تخمین پارامترهای مدل ترافیک، برای بهبود عملکرد روش‌های پیشین ارائه شده‌اند و با تست این روش‌ها با کمک اطلاعات حقیقی ترافیکی، مزایای روش‌های پیشنهادی بیان شده‌اند.

**کلمات کلیدی:** تخمین حالات ترافیک، مدل ماکروسکوپی جریان ترافیک، کالمن فیلتر تعمیم یافته، فیلتر تطبیقی، ترکیب تخمین.

### Adaptive Freeway Traffic State Estimator based on Fusion of the Model Parameters Estimates

Ehsan Jafari, Behzad Moshiri, Karim Salahshoor, Amin Ramezani

**Abstract:** This paper presents real-data testing results of a real-time freeway traffic state estimator. The general approach to real-time adaptive of freeway traffic state estimation is based on nonlinear macroscopic traffic flow modeling and extended Kalman filter algorithm. Macroscopic traffic flow model contains three important and unknown parameters (free speed, critical density and exponent), which should be estimated with off-line or on-line methods. One innovative aspects of the estimator is the real-time joint estimation of traffic flow variables (traffic flow, mean speed and traffic density) and model parameters, that leads to some significant features such as: avoidance of prior model calibration, automatic adaption to changing external conditions (e.g. weather conditions, traffic composition,...). The purpose of the reported real-data testing is, first, to demonstrate some obstacles in previous methods, second, to propose two methods based on dual filtering and fusion of the model parameter estimates for improving the previous methods.

**Keywords:** Traffic State Estimation, Macroscopic Traffic Flow Model, Extended Kalman Filter, Adaptive Filter, Estimation Fusion.

## ۱- مقدمه

در یک سیستم ترافیکی، مجموعه‌ای از متغیرهای حالت برای توصیف وضعیت ترافیک بزرگراه مورد استفاده قرار می‌گیرند که هدف از طراحی تخمین‌زن زمان حقیقی<sup>۱</sup> حالات ترافیک، تخمین متغیرهای ترافیک بزرگراه (جریان ترافیک<sup>۲</sup>، سرعت متوسط<sup>۳</sup> و چگالی ترافیک<sup>۴</sup>) با گام زمانی مناسب (۵ تا ۱۰ ثانیه) بر اساس حجم محدود اطلاعات بدست آمده از آشکارسازهای ترافیک (شمارنده‌های حلقه، دوربین-های ویدئویی، حسگرهای راداری) می‌باشد. مسئله اصلی در طراحی یک تخمین‌زن حالات ترافیک، کم بودن تعداد متغیرهای ترافیکی اندازه‌گیری شده نسبت به تعداد متغیرهای نامعلوم می‌باشد ([۱]، [۲] و [۳]). تخمین زمان حقیقی حالات ترافیک نقش مهمی در ارزیابی و کنترل ترافیک دارد و در ۳۰ سال گذشته تحقیقات بسیاری در این زمینه شده است [۴].

از روش‌های پرکاربرد در زمینه تخمین حالات ترافیک استفاده از مدل ماکروسکوپی<sup>۵</sup> مرتبه دوم برای توصیف دینامیک‌های سیستم و فیلتر کالمن<sup>۶</sup> تعمیم یافته برای تخمین دینامیک‌های نامعلوم سیستم می‌باشد. عمده تحقیقات صورت گرفته در سالیان اخیر، بر مبنای این روش‌های مدلینگ و فیلترینگ می‌باشند. (البته بطور محدود تحقیقاتی با سایر روش‌ها مانند آنچه که در [۵] با روش فیلتر ذره‌ای انجام شده است و یا [۶] که از یک مدل ساده برای تخمین در مسیرهای کوتاه استفاده کرده است، نیز وجود دارد).

مدل ماکروسکوپی<sup>۵</sup> غیرخطی و مرتبه دوم که در بخش بعد توصیف می‌شود، دارای چند پارامتر مهم و اصلی می‌باشد که این پارامترها معمولاً بطور دقیق مشخص نمی‌باشند و ممکن است از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر متفاوت باشند. بنابراین این پارامترها را باید بگونه‌ای تعیین کرد. در تحقیقات پیشین در این زمینه، این پارامترها با کمک اطلاعات خارج‌خط در دسترس تعیین می‌شدند [۷] و [۸]. یکی از رویکردهای اخیر در زمینه تخمین حالات ترافیک تخمین برخط<sup>۶</sup> پارامترهای مدل ترافیک می‌باشد که در [۱] رویکرد کلی برای تخمین با روش فیلتر کالمن تعمیم یافته ارائه شده است. علاوه بر نامعلوم بودن این پارامترها برای یک ناحیه مشخص، مقادیر پارامترهای مدل نیز ممکن

است بدلیل شرایط محیطی (روز یا شب بودن، آب و هوا و ...)، درصد خودروهایی سنگین، محدودیت‌های سرعت و سایر شرایط خارجی تغییر کنند ([۹]) که با در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای این پارامترها، یک تخمین‌زن حالت ترافیک ممکن است که کارآیی مناسبی در صورت بروز تغییر در این پارامترها را نداشته باشد. هر چند اگر تخمین‌زن بتواند مدل خود را با تغییرات خارجی تطبیق دهد این مشکل برطرف می‌شود.

اخیراً تخمین‌زن حالت ترافیک با تخمین برخط پارامترها طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفته است ([۱]، [۱۰] و [۱۱]) که مزایای آن بخوبی تشریح شده است. در تحقیقات انجام شده در زمینه تخمین حالات ترافیک با رویکرد تخمین برخط پارامترها، از یک فیلتر کالمن برای تخمین همزمان حالات ترافیک و پارامترهای مدل استفاده می‌شود (فیلترینگ یکپارچه) که در این مقاله با شبیه‌سازی عدم اطمینان این روش برای تخمین همزمان حالات ترافیک و پارامترهای مدل نشان داده شده است و برای برطرف کردن این مشکل ایده فیلترینگ مجزا پیشنهاد شده است که با شبیه‌سازی مزیت این روش به فیلترینگ یکپارچه نشان داده شده است. در هر دو روش فیلترینگ بیان شده برای تخمین پارامترهای مدل باید از سرعت و چگالی یکی از سگمنت‌های مسیر استفاده کرد. انتخاب سگمنت مناسب برای تخمین پارامترها ضروری می‌باشد، چرا که نتایج شبیه‌سازی بر اساس سگمنت‌های مختلف بسیار متفاوت می‌باشند که این موضوع نیز در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است. در ادامه برای برطرف کردن این مشکل استفاده از روش ترکیب اطلاعات برای ترکیب تخمین پارامترهای بدست آمده بر اساس چند سگمنت پیشنهاد شده است که نتایج شبیه‌سازی بیانگر عملکرد مناسب این روش می‌باشد. در این مقاله کلیه روش‌های بیان شده بر روی اندازه‌گیری‌های ترافیک بزرگراه I-494 در Minnesota، آمریکا تست شده‌اند.

در قسمت بعد یک مدل تصادفی برای مدل کردن ترافیک بزرگراه و فرموله کردن اندازه‌گیری‌های ترافیک معرفی شده است که این مدل در سال ۱۹۹۰ معرفی و در تحقیقات بعدی، دقت و کیفیت این روابط در مدل‌سازی جریان ترافیک و اندازه‌گیری‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته است ([۱]، [۳]، [۱۰] و [۱۱]). در ادامه، بزرگراه I-494 در ایالت Minnesota، آمریکا و اندازه‌گیری‌های استفاده شده از آن شرح داده شده است و روش‌های فیلترینگ یکپارچه، فیلترینگ مجزا و روش مبتنی بر ترکیب اطلاعات و شبیه‌سازی‌های مربوطه ذکر شده‌اند. نتایج اصلی بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها در قسمت پایانی بیان شده‌اند.

<sup>1</sup> Real-time  
<sup>2</sup> Traffic flow  
<sup>3</sup> Mean speed  
<sup>4</sup> Traffic density  
<sup>5</sup> Detector  
<sup>6</sup> On-line

## ۲- مدل سازی جریان ترافیک بزرگراه

### ۱-۲- مدل ماکروسکوپی جریان ترافیک

مدل ماکروسکوپی مرتبه دوم برای اولین مرتبه در [۸] برای توصیف رفتار دینامیکی جریان ترافیک در طول یک بزرگراه با تعریف متغیرهای چگالی ترافیک، سرعت متوسط و جریان ترافیک ارائه شد. در این مدل سازی، بزرگراه در نظر گرفته شده به  $N$  بخش کوچک<sup>۱</sup> با طول-های  $\Delta_i$  و  $i = 1, \dots, N$  تقسیم می شود، در حالیکه زمان گسسته سازی بر مبنای گام زمانی  $T$  می باشد. متغیرهای حالت استفاده شده در مدل ترافیک به شرح زیر می باشند:

- چگالی ترافیک  $(\rho_i(k))$ : تعداد اتومبیل‌ها در سگمنت  $i$  در زمان  $kT$ ، تقسیم بر طول سگمنت و تعداد خطوط عبوری در سگمنت با واحد  $veh / km / lane$ .
- سرعت متوسط  $(v_i(k))$ : میانگین سرعت خودروهای داخل سگمنت  $i$  در زمان  $kT$  با واحد  $km / h$ .

- جریان ترافیک  $(q_i(k))$ : تعداد خودروهایی که در بازه زمانی  $[kT, (k+1)T]$  را ترک می کنند تقسیم بر  $T$  با واحد  $veh / h$ .

- جریان ترافیک رمپ ورودی  $(r_i(k))$  و جریان ترافیک رمپ خروجی  $(s_i(k))$  در سگمنت  $i$  هر دو با واحد  $veh / h$ .
- برای سگمنت  $i$ ، معادلات دیفرانسیل غیرخطی مدل ماکروسکوپی بصورت روابط زیر می باشد:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{\Delta_i \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - s_i(k)] \quad (1)$$

$$s_i(k) = \beta_i(k) q_{i-1}(k) \quad (2)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} [V(\rho_i(k)) - v_i(k)] + \frac{T}{\Delta_i} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{vT}{\Delta_i} \frac{[\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)]}{(\rho_i(k) + \kappa)} \quad (3)$$

$$-\frac{\delta T}{\Delta_i \lambda_i} \frac{r_i(k) v_i(k)}{(\rho_i(k) + \kappa)} + \xi_i^a(k) \quad (4)$$

$$q_i(k) = \rho_i(k) v_i(k) \lambda_i + \xi_i^a(k) \quad (4)$$

$$V(\rho) = v_f \exp\left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_{cr}}\right)^a\right] \quad (5)$$

معادلات (۱)، (۳)، (۴) و (۵) بترتیب معادله دینامیکی چگالی ترافیک، معادله دینامیکی سرعت متوسط، معادله جریان ترافیک و

معادله ایستای سرعت می باشند. معادله (۲) بیانگر جریان ترافیک رمپ خروجی بخش  $i$  (در صورت وجود) بر اساس جریان ترافیک ورودی به بخش  $i$  با ضریب  $\beta_i(k)$  می باشد. همچنین در روابط بالا  $\xi_i^a(k)$  و  $\xi_i^a(k)$  نویزهای سفید گوسی با میانگین صفر می باشند که بیانگر دینامیک‌های مدل نشده در روابط سرعت متوسط و جریان ترافیک بدلیل تجربی بودن این معادلات می باشند. رابطه (۱) بدلیل اینکه رابطه-ای دقیق می باشد دارای نویز نمی باشد.  $\lambda_i$  تعداد خطوط عبوری در سگمنت  $i$  می باشد،  $\tau, V, \kappa, \delta, v_f, \rho_{cr}$  پارامترهای مدل می-باشند که برای همه سگمنت‌ها دارای یک مقدار می باشند. اثر این پارامترها بر مدل ماکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته است (۸) و سه پارامتر  $\rho_{cr}, v_f$  و  $\alpha$  که بترتیب چگالی بحرانی<sup>۲</sup>، سرعت آزاد<sup>۳</sup> و توان<sup>۴</sup> می باشند بیشترین اثر را بر این مدل مرتبه دوم دارند. بنابراین در این مقاله فقط این سه پارامتر بعنوان پارامترهای نامعلوم در نظر گرفته شده اند و رویکردهای مختلف نسبت به تعیین آنها مورد بررسی قرار گرفته است، سایر پارامترها را می توان با تحلیل برون خط تعیین کرد [۷].

برای هر بخش  $i$ ، جریان ترافیک  $(q_i(k))$  را می توان با داشتن چگالی ترافیک  $(\rho_i(k))$  و سرعت متوسط  $(v_i(k))$  آن بخش مطابق رابطه (۴) محاسبه کرد. بنابراین چگالی ترافیک و سرعت متوسط را می توان بعنوان متغیرهای مستقل و جریان ترافیک را بعنوان متغیر وابسته در نظر گرفت. مدل بالا دارای تعدادی متغیر مرزی می باشد: جریان ترافیک ورودی به مسیر  $(q_0)$ ؛ سرعت متوسط اتومبیل‌های ورودی به مسیر  $(V_0)$ ؛ چگالی ترافیک خروجی از مسیر  $(\rho_{N+1})$ ؛ جریان رمپ‌های ورودی در صورت وجود  $(r_i)$ ؛ ضرایب رمپ‌های خروجی در صورت وجود  $(\beta_i)$ . متغیرهای  $q_0$  و  $V_0$  و  $r_i$  معمولاً با نصب وسایل اندازه گیری، اندازه گیری می شوند ولی  $\rho_{N+1}$  و  $\beta_i$  ها بطور مستقیم قابل اندازه گیری نمی باشد و باید تخمین زده شود. در این مقاله کلیه متغیرهای مرزی بعنوان متغیر حالت اضافه به سیستم ترافیک افزوده شده اند و به همراه سایر متغیرهای ترافیک تخمین زده شده اند. برای این امر از معادلات زیر برای مدل کردن این متغیرهای مرزی استفاده شده است [۱۱]:

<sup>2</sup> Critical Density

<sup>3</sup> Free Speed

<sup>4</sup> Exponent

<sup>1</sup> Segment

$$\begin{cases} X(k+1) = \mathbf{h}(X(k), \rho_{cr}, v_f, \alpha) + \zeta(k) \\ Y(k) = \mathbf{g}(X(k)) + \eta(k) \end{cases} \quad (9)$$

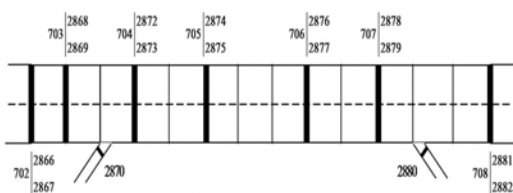
برای بدست آوردن تخمین حالات این سیستم از روش فیلتر کالمن-تعمیم یافته استفاده شده است و برای تخمین پارامترهای مدل  $(v_f, \rho_{cr}, \alpha)$  از روش های شرح داده شده در قسمت بعد استفاده شده است.

### ۳- روش های تخمین پارامترهای مدل و شبیه-سازي ها

در این قسمت ابتدا مسیر و اطلاعات واقعی استفاده شده در شبیه-سازي ها شرح داده شده اند و سپس روش های مختلف برای تخمین حالات ترافیک با رویکرد تخمین برخط پارامترها به همراه شبیه سازی های مربوطه بیان شده اند.

#### ۳-۱- مسیر انتخاب شده برای تخمین حالات ترافیک

مسیر در نظر گرفته شده برای تخمین، قسمتی از باند شرقی بزرگراه شماره I-494 در ایالت Minnesota بین ایستگاههای اندازه گیری ۷۰۲ تا ۷۰۸ می باشد. این مسیر دارای دو خط عبوری، یک رمپ ورودی و یک رمپ خروجی و طول تقریبی ۴۸۰۰ متر می باشد. شمای کلی آن و فاصله آشکار سازها بصورت زیر می باشد:



این مسیر به ۱۳ بخش با طول های:

$$\text{Length(meter)} = [448 \ 288 \ 528 \ 328 \ 328 \ 378 \ 378 \ 378 \ 456 \ 456 \ 192 \ 280 \ 280]$$

تقسیم شده است که اندازه گیری ها در مرز بخش ها و بترتیب در ورودی بخش های اول، دوم، چهارم، ششم، نهم، یازدهم و خروجی بخش سیزدهم و رمپ های ورودی و خروجی قرار دارند. اندازه گیری های مسیر اصلی شامل اندازه گیری های سرعت و جریان ترافیک و اندازه گیری در محل رمپ ها شامل جریان ورودی و یا خروجی به و یا از رمپ می باشد. دیتای ثبت شده با اندازه گیری های ترافیک به اندازه-

$$\begin{cases} q_0(k+1) = q_0(k) + \xi_0^q(k) \\ v_0(k+1) = v_0(k) + \xi_0^v(k) \\ \rho_{N+1}(k+1) = \rho_{N+1}(k) + \xi_{N+1}^\rho(k) \end{cases} \quad (6)$$

#### ۲-۲- مدل اندازه گیری های ترافیک

ابزارهای متداول اندازه گیری ترافیک اطلاعات زمان حقیقی از جریان و سرعت متوسط ترافیک را می دهند. با در نظر گرفتن یک ابزار اندازه گیری ترافیک نصب شده در مرز بخش های  $i$  و  $i+1$  برای مدل سازی اندازه گیری های جریان و سرعت متوسط ترافیک می توان از روابط زیر استفاده کرد [۱]:

$$\begin{cases} y_i^q(k) = q_i(k) + \eta_i^q(k) \\ y_i^v(k) = v_i(k) + \eta_i^v(k) \end{cases} \quad (7)$$

که  $y_i^q(k)$  و  $y_i^v(k)$  بترتیب بیانگر اندازه گیری های جریان و سرعت متوسط ترافیک در بازه زمانی  $[(k-1)T, kT]$ ،  $\eta_i^q(k)$  و  $\eta_i^v(k)$  نویزهای مربوطه می باشند.

برای رمپ های ورودی و خروجی در یک بخش در صورت وجود فقط اندازه گیری های جریان آنها مورد توجه می باشد که می توان آنها را نیز بصورت زیر مدل کرد:

$$\begin{cases} y_i^r(k) = r_i(k) + \eta_i^r(k) \\ y_i^s(k) = s_i(k) + \eta_i^s(k) \end{cases} \quad (8)$$

$y_i^r(k)$  و  $y_i^s(k)$  بترتیب بیانگر اندازه گیری های جریان رمپ ورودی و خروجی،  $\eta_i^r(k)$  و  $\eta_i^s(k)$  نویزهای اندازه گیری مربوطه و همچنین  $r_i(k)$  و  $s_i(k)$  مقادیر واقعی آنها می باشند. همه نویزهای در نظر گرفته شده در معادلات مربوط به مدل سازی اندازه گیری ها سفید و میانگین صفر می باشند [۱۰].

#### ۲-۳- مدل فضای حالت

اگر کل مسیر بزرگراه را بصورت اتصال زنجیره ای بخش ها در نظر بگیریم، مدل ماکروسکوپییک کامل با  $N$  بخش شامل  $2N$  معادله و  $2N$  متغیر مستقل و تعدادی متغیر مرزی می باشد. بنابراین با در نظر گرفتن بردار

$$X = [\rho_1, v_1, \rho_2, v_2, \dots, \rho_N, v_N, r_i, \beta_i, q_0, v_0, \rho_{N+1}]$$

و بردار اندازه گیری  $Y(k)$  که شامل اندازه گیری های بدست آمده از سیستم مطابق روابط (۷) و (۸) می باشد، مدل ماکروسکوپییک ترافیک را می توان به فرم فضای حالت نشان داد [۱]:

۳-۲- تخمین‌زن تطبیقی مبتنی بر فیلترینگ یکپارچه

(تخمین‌زن نوع ۱)

در این رویکرد برای تخمین پارامترهای مدل بصورت برخط از تخمین‌زن فیلتر کالمن تعمیم‌یافته استفاده می‌شود. برای مدل کردن این پارامترها از ایده مدل‌سازی بر اساس گام تصادفی استفاده شده است [۱]:

$$\begin{cases} v_f(k+1) = v_f(k) + \xi_{v_f}(k) \\ \rho_{cr}(k+1) = \rho_{cr}(k) + \xi_{\rho_{cr}}(k) \\ \alpha(k+1) = \alpha(k) + \xi_{\alpha}(k) \end{cases} \quad (11)$$

$\xi_{v_f}(k), \xi_{\rho_{cr}}(k), \xi_{\alpha}(k)$  نویزهای سفید گوسی با میانگین صفر می‌باشند. در نهایت می‌توان فرم فشرده‌ای برای مدل‌سازی فضای حالت این پارامترها بدست آورد:

$$\begin{cases} P(k+1) = A(k)P(k) + \xi_3 \\ y(k) = g(P(k), U(k)) + \eta_{\rho}^y(k) \end{cases} \quad (12)$$

که در این فضای حالت:

$$P = [v_f \quad \rho_{cr} \quad \alpha]^T, \quad A(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\xi_3(k) = [\xi_{v_f}(k) \quad \xi_{\rho_{cr}}(k) \quad \xi_{\alpha}(k)]^T$$

$$y(k) = V(k), \quad U(k) = \rho(k),$$

$$g = v_f \exp\left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_{cr}}\right)^a\right]$$

در رابطه اندازه‌گیری این سیستم، از سرعت  $(V(k))$  و چگالی ترافیک  $(\rho(k))$  یکی از سگمنت‌ها بعنوان خروجی و ورودی استفاده می‌شود. در رویکرد فیلترینگ یکپارچه، سیستم با فضای حالت تعریف شده طبق رابطه (۱۲) را به سیستم حالات ترافیک طبق روابط (۹) اضافه می‌کنیم و آنها را یک سیستم یکپارچه افزوده با بردار حالت  $X = [\rho_1, v_1, \dots, \rho_N, v_N, r_i, \beta_i, q_0, v_0, \rho_{N+1}, v_f, \rho_{cr}, a]$  در نظر می‌گیریم می‌گیریم و در نهایت از یک فیلتر کالمن تعمیم‌یافته برای تخمین حالات این سیستم افزوده شده که شامل حالات ترافیک و پارامترهای مدل می‌باشد استفاده می‌کنیم.

مقادیر اولیه پارامترها و کوواریانس پارامترهای مدل بصورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$\begin{aligned} \rho_{cr}(0) &= 10 \text{ veh / km / lane}, \\ v_f(0) &= 180 \text{ km / h}, \quad a(0) = 1.5, \\ \text{cov}(\xi_{\rho_{cr}}(k)) &= 0.03 (\text{veh / km / lane})^2, \\ \text{cov}(\xi_{v_f}(k)) &= 0.2 (\text{km / h})^2, \quad \text{cov}(\xi_{\alpha}(k)) = 0.0001, \end{aligned}$$

برای این تخمین‌زن تطبیقی حالات مختلفی شبیه‌سازی شده‌اند. برای

گیری‌های جریان و سرعت متوسط ترافیک در هر دقیقه تبدیل شده‌اند. به منظور شبیه‌سازی، اندازه‌گیری‌های جریان و سرعت ترافیک برای دو روز اول سپتامبر ۲۰۰۹ و دوم سپتامبر ۲۰۰۹ استخراج شده است. از اندازه‌گیری آشکارسازهای ۷۰۲، ۷۰۸، رمپ ورودی و رمپ خروجی بعنوان اطلاعات اندازه‌گیری شده از سیستم، در کالمن فیلتر تعمیم‌یافته استفاده شده است و از اطلاعات ایستگاههای اندازه‌گیری ۷۰۳، ۷۰۴، ۷۰۵، ۷۰۶ و ۷۰۷ برای مقایسه تخمین بدست آمده از فیلتر و اطلاعات واقعی استفاده شده است. در ادامه بدلیل محدودیت متن فقط نتایج برای تخمین‌های ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ آورده شده است و برای مقایسه صحیح عملکرد، از معیار عملکرد نسبی<sup>۱</sup> استفاده شده است [۱]:

$$J = \sqrt{\frac{1}{KN} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (x_i(k) - \hat{x}_i(k))^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (x_i(k))^2}} \quad (10)$$

در این رابطه،  $x_i$  ها مقادیر واقعی،  $\hat{x}_i$  ها مقادیر تخمین زده شده،  $K$  تعداد نمونه‌ها و  $N$  تعداد بخش‌ها می‌باشند.

پارامترهای مدل برای کل مسیر یکسان در نظر گرفته شده‌اند:

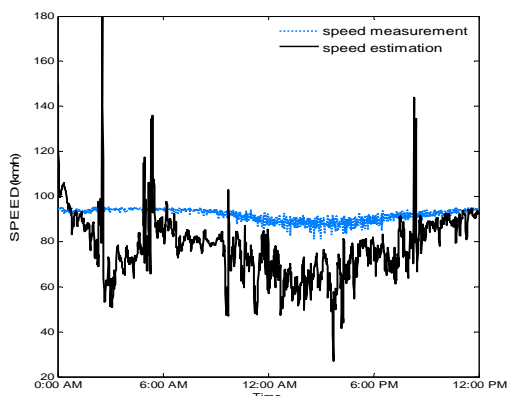
$$\begin{aligned} v &= 35 \text{ km}^2 / \text{h}, \quad \kappa = 40 \text{ veh / km / lane}, \\ \tau &= 25 \text{ s}, \quad \delta = 1.1 \end{aligned}$$

سایر پارامترهای مدل یعنی  $v_f, \rho_{cr}, \alpha$  با روش‌های بحث شده در بخش‌های بعد محاسبه می‌شوند. در همه شبیه‌سازی‌ها پارامترهای استفاده شده برای کالمن فیلتر تعمیم‌یافته بصورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \text{Cov} \{ \xi_i^q(k) \} &= 300 (\text{veh / h})^2, \quad i = 1, \dots, 13 \\ \text{Cov} \{ \xi_i^v(k) \} &= 10 (\text{km / h})^2, \quad i = 1, \dots, 13 \\ \text{Cov} \{ \xi_0^q(k) \} &= 300 (\text{veh / h})^2, \\ \text{Cov} \{ \xi_0^v(k) \} &= 10 (\text{km / h})^2, \\ \text{Cov} \{ \xi_{14}^{\rho}(k) \} &= 1 (\text{veh / km / lane})^2 \\ \text{Cov} \{ \xi_3^r(k) \} &= 30 (\text{veh / h})^2, \\ \text{Cov} \{ \xi_{12}^{\beta}(k) \} &= 0.00001, \\ \text{Cov} \{ \eta_i^q(k) \} &= 100 (\text{veh / h})^2, \\ \text{Cov} \{ \eta_i^v(k) \} &= 50 (\text{km / h})^2, \quad i = 0, 13 \\ \text{Cov} \{ \eta_3^r(k) \} &= 3 (\text{veh / h})^2, \\ \text{Cov} \{ \eta_{12}^s(k) \} &= 3 (\text{veh / h})^2 \end{aligned}$$

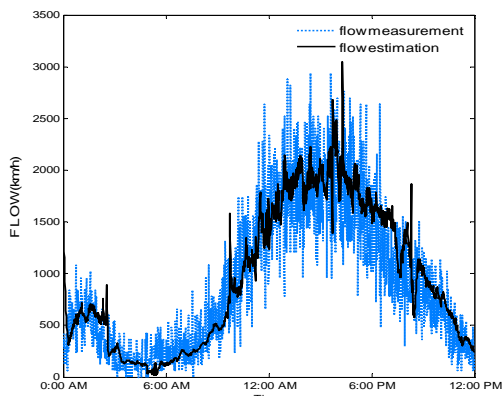
به کمک مقادیر بیان شده برای کوواریانس متغیرهای حالت سیستم و متغیرهای اندازه‌گیری، ماتریس‌های  $Q$  و  $R$  که قطری می‌باشند بدست می‌آیند.

<sup>1</sup> Relative performance



شکل ۳: تخمین سرعت ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن-

تطبیقی نوع ۱



شکل ۴: تخمین جریان ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن-

تطبیقی نوع ۱

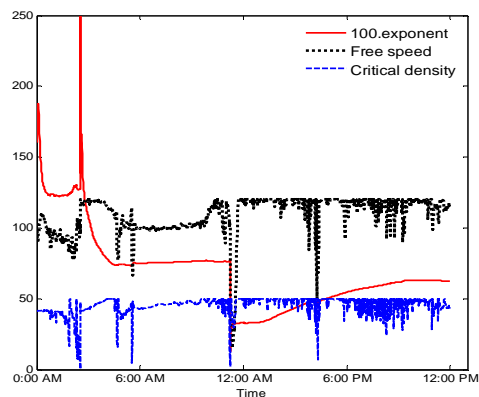
نتایج تخمین برخط پارامترها مدل و همچنین سرعت و جریان ترافیک برای ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ در حالتیکه از اندازه‌گیری ایستگاههای ۷۰۲، ۷۰۸، رمپ ورودی و رمپ خروجی روز دوم سپتامبر ۲۰۰۹، بعنوان اندازه‌گیری‌های سیستم استفاده شود در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. مقدار هزینه برای تخمین‌زن تطبیقی مبتنی بر فیلترینگ مجزا ۰/۰۶ می‌باشد که نسبت به فیلترینگ یکپارچه (۰/۳۰۵۸) بهبود قابل ملاحظه‌ای در تخمین و مقدار هزینه ایجاد شده است.

حالتیکه از اطلاعات اندازه‌گیری‌های ۷۰۲، ۷۰۳، ۷۰۷ و ۷۰۸ و رمپ ورودی و رمپ خروجی مربوط به روز دوم سپتامبر ۲۰۰۹ بعنوان دیتای اندازه‌گیری شده از سیستم، در کالمن فیلتر تعمیم یافته استفاده شود عملکرد تخمین‌زن یکپارچه برای تخمین برخط حالات ترافیک و پارامترهای مدل مناسب می‌باشد و مقدار هزینه ۰/۰۵۴ می‌باشد ولی در حالتیکه فقط از اطلاعات اندازه‌گیری‌های ۷۰۲، ۷۰۸، رمپ ورودی و رمپ خروجی بعنوان اندازه‌گیری‌های سیستم استفاده شود (کاهش اطلاعات از سیستم) تخمین حالات ترافیک و پارامترهای مدل مطابق شکل‌های ۲، ۳ و ۴ مناسب نمی‌باشد و هزینه ۰/۳۰۵۸ می‌باشد. این نتایج بیانگر این موضوع می‌باشند که بدلیل استفاده از یک فیلتر برای تخمین همزمان حالات دو سیستم مختلف یعنی متغیرهای ترافیک و پارامترهای مدل با روابط فضای حالت متفاوت و خواص آماری متفاوت، امکان تخمین نامناسب حالات هر دو سیستم وجود دارد و در واقع این روش قابل اعتماد نمی‌باشد. برای رفع این مشکل ایده فیلترینگ مجزا ارائه شده است.

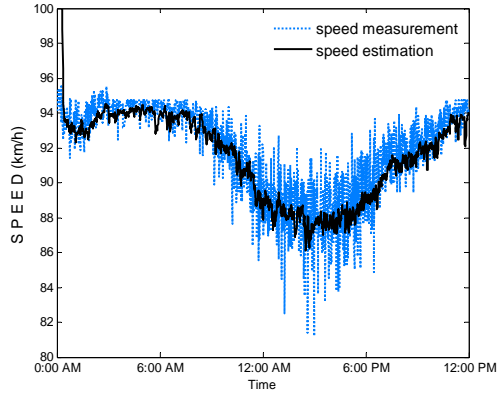
### ۳-۳- تخمین‌زن تطبیقی مبتنی بر فیلترینگ مجزا (تخمین‌زن

نوع ۲)

اساس این روش مانند روش فیلترینگ یکپارچه می‌باشد و در واقع از همان روابط (۱۲) نیز برای مدل کردن پارامترهای سیستم استفاده می‌شود. تفاوت این روش با روش قبل در فیلترینگ می‌باشد. در روش فیلترینگ یکپارچه از یک فیلتر برای تخمین حالات ترافیک و پارامترهای مدل استفاده می‌شود ولی در این رویکرد از دو فیلتر کالمن- تعمیم یافته مجزا برای تخمین جداگانه حالات ترافیک با روابط (۹) و پارامترهای مدل با روابط (۱۲) استفاده می‌شود. مقادیر اولیه پارامترها و کوواریانس آنها مانند فیلترینگ یکپارچه می‌باشد.

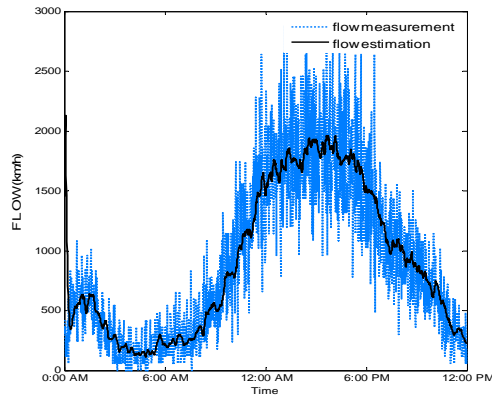


شکل ۵: تخمین پارامترهای سیستم با تخمین‌زن تطبیقی نوع ۱ بصورت برخط



شکل ۸: تخمین سرعت ترافیک در محل ایستگاه اندازه گیری ۷۰۵ با تخمین زن-

تطبیقی نوع ۲

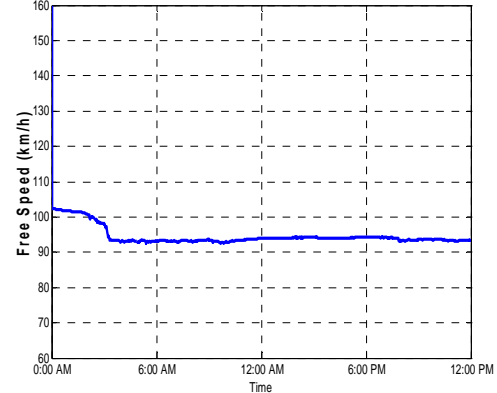


شکل ۹: تخمین جریان ترافیک در محل ایستگاه اندازه گیری ۷۰۵ با تخمین زن-

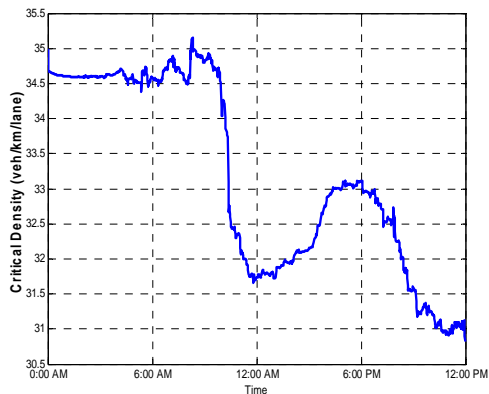
تطبیقی نوع ۲

در این حالت برای تخمین پارامترهای مدل از چگالی و سرعت تخمین زده شده سگمنت سیزدهم بعنوان ورودی و خروجی مدل استفاده شده است. نتایج هزینه تخمین برای روز اول سپتامبر ۲۰۰۹ و دوم سپتامبر ۲۰۰۹ برای کلیه سگمنت‌ها محاسبه شده است که بر طبق نتایج بدست آمده، برای روز اول سپتامبر، بهترین تخمین با سگمنت سوم (هزینه ۰/۰۵۲) و بدترین تخمین با سگمنت دوم و هزینه ۲/۳۶۹ می باشد. همچنین برای دوم سپتامبر بهترین و بدترین تخمین‌ها بر اساس سگمنت‌های سیزدهم و اول با هزینه‌های ۰/۰۶ و ۲/۴۸ بدست آمده‌اند.

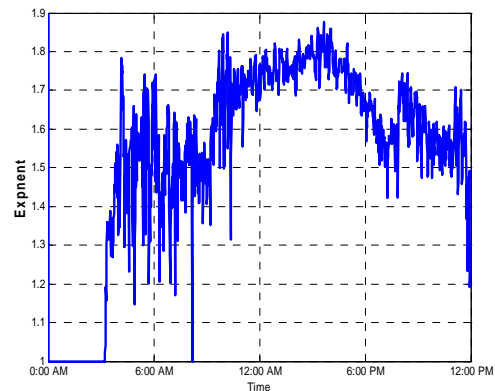
با توجه به نتایج ذکر شده، مشخص است که انتخاب سگمنت مناسب برای تخمین پارامترهای مدل بسیار حائز اهمیت می باشد و در ضمن سگمنتی که در یک روز تخمین مناسبی بدست می دهد لزوما در روز دیگر عملکرد مناسبی ندارد چنانکه برای روز اول بهترین نتیجه با تخمین‌های سرعت و چگالی سگمنت سوم حاصل می شود در صورتیکه در روز دوم بهترین عملکرد مربوط به سگمنت آخر می باشد.



شکل ۵: تخمین سرعت آزاد با تخمین زن تطبیقی نوع ۲ بصورت برخط



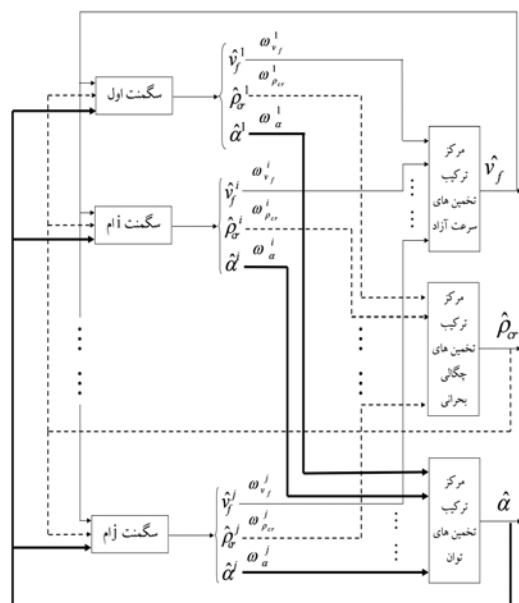
شکل ۶: تخمین چگالی بحرانی با تخمین زن تطبیقی نوع ۲ بصورت برخط



شکل ۷: تخمین توان با تخمین زن تطبیقی نوع ۲ بصورت برخط

معکوس کوواریانس خطای تخمین بیان کرد و در نهایت همه وزن‌های را نرمالیزه کرد بگونه‌ای که شرایط (۱۴) برقرار باشد.

این روند برای سایر پارامترهای مدل یعنی توان و چگالی بحرانی نیز تکرار می‌شود و از مقادیر ترکیب شده نهایی برای تخمین حالات ترافیک در مدل استفاده می‌شود. در نهایت، در گام بعد برای بدست آوردن تخمین جدید پارامترها در هر سگمنت، از ترکیب تخمین‌های محلی بدست آمده در گام قبل بعنوان تخمین گام قبل استفاده می‌شود که در واقع با این کار از تخمین نهایی در هر گام فیدبک می‌گیریم و به هر سگمنت اعمال می‌کنیم. فرآیند شرح داده شده را مطابق شکل ۱۰ می‌توان مدل کرد.



شکل ۱۰: ساختار استفاده شده برای ترکیب تخمین پارامترهای سیستم که مبتنی بر ترکیب تخمین پارامترهای بدست آمده از چند سگمنت مختلف می‌باشد

برای شبیه‌سازی این روش، در سه سگمنت ابتدا، میانی و انتهایی پارامترها تخمین زده شده‌اند و سپس این سه مجموعه پارامتر با روش بیان شده با هم ترکیب می‌شوند. نتایج تخمین برخط پارامترها، سرعت و جریان ترافیک در حالتیکه از اندازه‌گیری‌های ۷۰۸، ۷۰۲، رمپ ورودی و رمپ خروجی روز اول سپتامبر ۲۰۰۹ بعنوان اطلاعات اندازه‌گیری شده از سیستم استفاده شود، برای ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند. مقدار هزینه برای تخمین‌زن مبتنی بر ترکیب تخمین‌ها ۰/۰۵۷ می‌باشد. همچنین، برای اندازه‌گیری‌های روز دوم سپتامبر ۲۰۰۹ نیز این روش تست شده‌است که نتیجه بدست آمده (۰.۰۷۱) اندکی بیشتر از بهترین حالت بیان شده در بخش قبل می‌باشد

برای بهبود این روش و جبران کمبود اطلاعات در انتخاب سگمنت مناسب برای تخمین پارامترهای مدل ایده ترکیب اطلاعات مبتنی بر روش Ordered Weighted Averaging (OWA) پیشنهاد می‌شود.

### ۳-۴- تخمین‌زن تطبیقی مبتنی بر ترکیب اطلاعات (تخمین‌زن نوع ۳)

بدلیل وابستگی شدید تخمین‌زن مطرح شده در قسمت قبل به انتخاب سگمنت مناسب جهت تخمین پارامترهای مدل، از روش ترکیب اطلاعات بر مبنای OWA استفاده می‌کنیم. این عملگر برای نخستین بار در سال ۱۹۸۸ در [۱۲] برای مسئله تجمیع چندتصمیمی<sup>۱</sup> مطرح شد. در این روش، برای ترکیب N تصمیم و رسیدن به یک تصمیم واحد از رابطه ترکیب زیر استفاده می‌شود:

$$F(s_1, \dots, s_N) = \sum_{i=1}^N w_i b_i \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $b_i$ ، i امین عضو در بردار مرتب شده  $S_i$ ها بصورت نزولی می‌باشد. در واقع  $b_1$  بزرگترین عضو و  $b_N$  کوچکترین عضو این مجموعه تصمیم‌ها می‌باشند که با وزن‌های  $w_i$  با شرایط (۱۴) با هم ترکیب می‌شوند:

$$\begin{cases} 0 \leq w_i \leq 1, & i = 1, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N w_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

برای استفاده از این روش ترکیب در سیستم تخمین‌زن ترافیک، در هر گام در چند سگمنت مختلف پارامترهای مدل تخمین زده می‌شوند و سپس این مجموعه تخمین‌ها با انتخاب وزن‌های مناسب با رابطه (۱۳) با یکدیگر ترکیب می‌شوند و تخمین یکتایی از پارامترها را فراهم می‌کنند.

مسئله مهم در این روش انتخاب وزن‌ها می‌باشد. در این مقاله وزن-ها بر اساس مقادیر کوواریانس خطای تخمین محاسبه می‌شوند. بدین گونه که، بعنوان نمونه برای هر سگمنت و یا تعدادی از سگمنت‌ها پارامتر سرعت آزاد تخمین زده می‌شود که هر تخمین دارای کوواریانس خطای تخمین نیز می‌باشد و هرچه تخمین دقیق‌تر باشد مقدار کوواریانس خطای تخمین مربوط کوچکتر می‌باشد و بالعکس. با توجه به توضیح داده شده، تخمین با دقت بیشتر، که مقدار کوواریانس خطای کوچکتری نیز دارد باید وزن بیشتری در مقدار تخمین نهایی داشته باشد. بدین منظور، می‌توان وزن هر پارامتر تخمین زده شده را متناسب با

<sup>۱</sup> Aggregating Multi Criteria



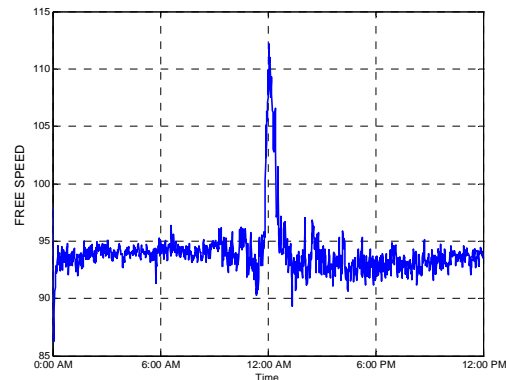
ولی مزیت اصلی این روش از بین بردن وابستگی شدید تخمین‌زن به تخمین‌های یک سگمنت می‌باشد.

برای تخمین هم‌زمان و برخط متغیرهای ترافیکی (سرعت و چگالی ترافیک سگمنت‌ها) و پارامترهای مدل (سرعت آزاد، چگالی بحرانی و توان) استفاده شده‌است که عملکرد آن مناسب نمی‌باشد.

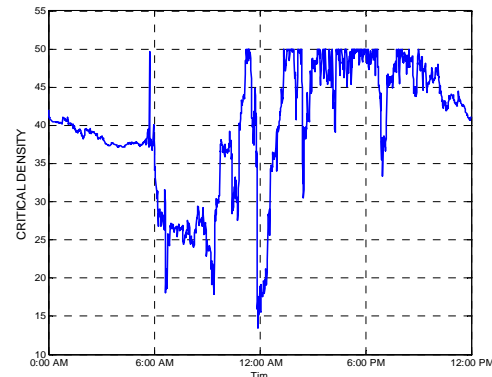
در روش دوم از دو فیلتر کالمن مجزا برای تخمین پارامترهای مدل و متغیرهای ترافیک استفاده شده‌است. فیلترینگ مجزا دارای قابلیت تخمین مناسب، بدون بایاس و دقیق حالات ترافیک می‌باشد، اما مشکل آن وابستگی تخمین‌زن به سگمنت انتخاب شده برای تخمین پارامترهای مدل می‌باشد.

برای برطرف کردن این مشکل از ایده ترکیب تخمین پارامترهای مدل استفاده شده‌است. در این روش، پارامترهای مدل بر اساس اطلاعات سگمنت‌های مختلف تخمین زده می‌شوند و در نهایت این مجموعه تخمین‌ها با وزن‌های مربوط که متناسب با کوواریانس خطای هر تخمین می‌باشد، با هم ترکیب می‌شوند و تخمین نهایی پارامترها حاصل می‌شود. این روش عملکرد قابل قبولی دارد و مشکل کمبود اطلاعات در انتخاب سگمنت مناسب را بخوبی جبران می‌کند

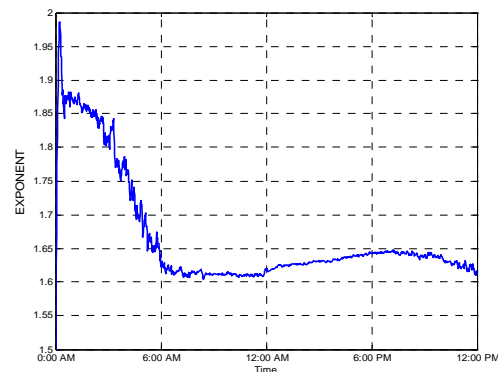
شکل ۱۱: تخمین سرعت آزاد با تخمین‌زن تطبیقی نوع ۳ بصورت برخط



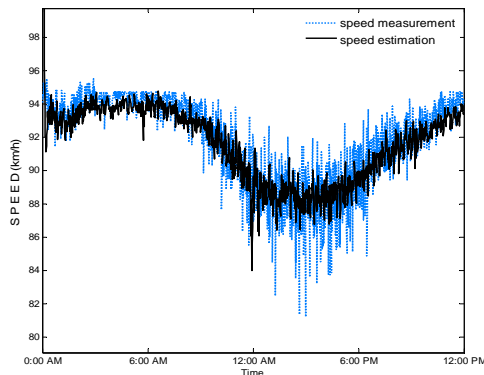
شکل ۱۱: تخمین سرعت آزاد با تخمین‌زن تطبیقی نوع ۳ بصورت برخط



شکل ۱۲: تخمین چگالی بحرانی با تخمین‌زن تطبیقی نوع ۳ بصورت برخط

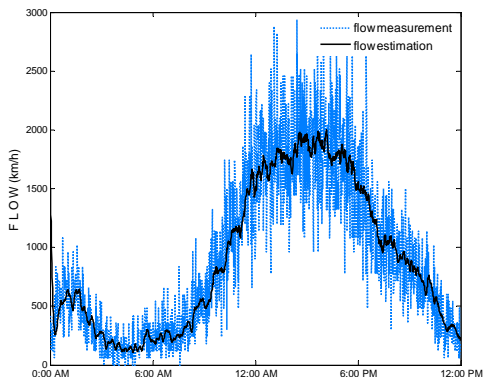


شکل ۱۳: تخمین توان با تخمین‌زن تطبیقی نوع ۳ بصورت برخط



شکل ۱۴: تخمین سرعت ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با

تخمین‌زن تطبیقی نوع ۳



شکل ۱۵: تخمین جریان ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با

تخمین‌زن تطبیقی نوع ۳

### نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تخمین حالات ترافیک بزرگراه از تخمین‌زن تطبیقی با سه رویکرد استفاده شده‌است و روش‌های مطرح شده با کمک دیتای واقعی بدست آمده از بزرگراه I-494 در Minnesota مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در تخمین‌زن تطبیقی نوع اول، از یک فیلتر کالمن

## مراجع

- [1] Wang, Y., Papageorgiou, M. (2005) "Real-time freeway traffic state estimation based on extended kalman filter: a general approach." *Transportation Research*, vol. 39B, pp. 141–167.
- [2] Wang, Y., Papageorgiou, M., Messmer, A. (2006) "Renaissance—A unified macroscopic model based approach to real-time freeway network traffic surveillance." *Transportation Research Part C* 14, 190–212.
- [3] Wang, Y., Papageorgiou, M., Messmer, A. (2007) "Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: a case study." *Transportation Science* 41, 167–181.
- [4] Papageorgiou, M., Papamichail, I., Wang, Y. (2007) "Motorway traffic surveillance and control." *European Journal of Control* vol. 13, 297–319.
- [5] Mihaylova, L., Boel, R.K., Hegyi, A. (2007) "Freeway traffic estimation within particle filtering framework." *Automatica*, vol. 43, pp. 290-300.
- [6] Nahi, N.E. (1973) "Freeway-traffic data processing", *Proceedings of IEEE* 61, 537–541.
- [7] Cremer, M., Papageorgiou, M. (1981) "Parameter identification for a traffic flow model", *Automatica*, vol. 17, pp.837-843.
- [8] Papageorgiou, M., Blosseville, J., Hadj-Salem, H. (1990) "Modeling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard peripherique in paris: part i: modelling." *Transportation research*, vol. 24A, no.5, pp.345-359.
- [9] Kyte, M., Khatib, Z., Shannon, P., Kitchener, F. (2001) "The effect of weather on free flow speed", *Transportation Research Board 80th Annual Meeting*, Washington, DC, Paper No. 01-3280.
- [10] Wang Y., Papageorgiou, M., Messmer, A. (2008) "Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: Adaptive capabilities and real data testing." *Transportation Research part A*, vol 42, pp. 1340-1358.
- [11] Wang, Y., Papageorgiou, M., Messmer, A., Coppola, P., Tzimitsi, A., Nuzzolo, A., (2009) "An adaptive freeway traffic state estimator." *Automatica* 45, 10-24.
- [12] Ronald R. Yager, "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 18, pp.183-190, 1988.