مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۴، شماره ۱، بهار ۱۳۸۹، صفحه ۴۲-۳۳

تخمین‌زن تطبیقی حالات ترافیک با استفاده از ایده ترکیب تخمین پارامترهای مدل ترافیک

احسان جعفری[۱]، بهزاد مشیری[۲]، کریم سلحشور[۳]، امین رمضانی[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، قطب علمی کنترل وپردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق‌وکامپیوتر، دانشگاه تهران، ehsanjafari@ut.ac.ir

[۲] استاد، قطب علمی کنترل وپردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق‌وکامپیوتر، دانشگاه تهران، moshiri@ut.ac.ir

[۳] استادیار، دانشکده نفت تهران، دانشگاه صنعت نفت، salahshoor@put.ac.ir

[۴] دانشجوی دکترا، قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، دانشکده مهندسی برق‌وکامپیوتر، دانشگاه تهران aminramezani@ut.ac.ir

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

چکیده: در این مقاله نتایج شبیه‌سازی تخمین‌زن غیرخطی حالات ترافیک با اندازه‌گیری‌های ترافیکی بیان‌شده‌اند. رویکرد عمومی برای تخمین تطبیقی و زمان‌حقیقی حالات ترافیک بزرگراه بر مبنای مدل ماکروسکوپیک غیرخطی ترافیک و فیلترکالمن تعمیم‌یافته می‌باشد. مدل ماکروسکوپیک 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 تعیین‌کرد. 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 خارج‌خط برای تعیین این پارامترها، تطبیق اتوماتیک و برخط مدل با تغییر در شرایط محیطی و ... اشاره‌کرد. در این مقاله نیز رویکرد تخمین برخط متغیرهای ترافیک به همراه پارامترهای مدل اتخاذشده‌است و بعضی از نقاط ضعف در روش‌های قبل با شبیه‌سازی‌ها نشان‌داده‌شده‌اند و در ادامه دو روش مبتنی بر فیلترینگ مجزا و ترکیب تخمین پارامترهای مدل ترافیک، برای بهبود عملکرد روش‌های پیشین ارائه‌شده‌اند و با تست این روش‌ها با کمک اطلاعات حقیقی ترافیکی، مزایای روش‌های پیشنهادی بیان‌شده‌اند.

کلمات کلیدی: تخمین حالات ترافیک، مدل ماکروسکوپیک جریان ترافیک، کالمن فیلتر تعمیم‌یافته، 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 fliter algorithm. Macroscopic traffic flow model contains three important and unknown parameters (free speed, critical density and exponenet), 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 fosion 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.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

۱- مقدمه

در یک سیستم ترافیکی، مجموعه‌ای از متغیرهای حالت برای توصیف وضعیت ترافیک بزرگراه مورد استفاده‌قرار می‌گیرند که هدف از طراحی تخمین‌زن زمان‌حقیقی[1] حالات ترافیک، تخمین متغیرهای ترافیک بزرگراه (جریان ترافیک[2]، سرعت متوسط[3] و چگالی ترافیک[4]) با گام زمانی مناسب (۵ تا ۱۰ ثانیه) بر اساس حجم محدود اطلاعات بدست‌آمده از آشکارساز[5]های ترافیک (شمارنده‌های حلقه، دوربین-های ویدئویی، حسگرهای راداری) می‌باشد. مسئله اصلی در طراحی یک تخمین‌زن حالات ترافیک، کم‌بودن تعداد متغیرهای ترافیکی اندازه‌گیری‌شده نسبت به تعداد متغیرهای نامعلوم می‌باشد ([۱]، [۲] و [۳]). تخمین زمان‌حقیقی حالات ترافیک نقش مهمی در ارزیابی و کنترل ترافیک دارد و در ۳۰ سال گذشته تحقیقات بسیاری در این زمینه‌شده‌است [۴].

از روش‌های پرکاربرد در زمینه تخمین حالات ترافیک استفاده از مدل ماکروسکوپیک مرتبه دوم برای توصیف دینامیک‌های سیستم و فیلترکالمن‌تعمیم‌یافته برای تخمین دینامیک‌های نامعلوم سیستم می‌باشد. عمده تحقیقات صورت‌گرفته 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 انجام‌شده‌است و یا [۶] که از یک مدل ساده برای تخمین در مسیرهای کوتاه استفاده‌کرده-است، نیز وجود دارد).

مدل ماکروسکوپیک غیرخطی و مرتبه‌دوم که در بخش بعد توصیف می‌شود، دارای چند پارامتر مهم و اصلی می‌باشد که این پارامترها معمولا بطور دقیق مشخص نمی‌باشند و ممکن است از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر متفاوت باشند. بنابراین این پارامترها را باید بگونه‌ای تعیین‌کرد. 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[6] پارامترهای مدل ترافیک می‌باشد که در [۱] رویکرد کلی برای تخمین با روش فیلترکالمن‌تعمیم‌یافته ارائه‌شده‌است. علاوه بر نامعلوم بودن این پارامترها برای یک ناحیه مشخص، مقادیر پارامترهای مدل نیز ممکن است بدلیل شرایط محیطی (روز یا شب بودن، آب‌وهوا و ...)، درصد خودروهای سنگین، محدودیت‌های سرعت و سایر شرایط خارجی تغییر کنند ([۹]) که با درنظر گرفتن مقادیر ثابت برای این پارامترها، یک تخمین‌زن حالت ترافیک ممکن است که کارآیی مناسبی درصورت بروز تغییردر این پارامترها را نداشته‌باشد. هر چند اگر تخمین‌زن بتواند مدل خود را با تغییرات خارجی تطبیق دهد این مشکل برطرف می‌شود.

اخیرا تخمین‌زن حالت ترافیک با تخمین برخط پارامترها طراحی و مورد ارزیابی قرارگرفته‌است ([۱]، [۱۰] و [۱۱]) که مزایای آن بخوبی تشریح‌شده‌است. در تحقیقات انجام‌شده 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 نشان‌داده-شده‌است و برای برطرف کردن این مشکل ایده فیلترینگ مجزا پیشنهاد شده‌است که با شبیه‌سازی مزیت این روش به فیلترینگ یکپارچه نشان-داده‌شده‌است. در هر دو روش فیلترینگ بیان‌شده برای تخمین پارامترهای مدل باید از سرعت و چگالی یکی از سگمنت‌های مسیر استفاده‌کرد. 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 نشان‌داده‌شده‌است. در ادامه برای برطرف کردن این مشکل استفاده از روش ترکیب اطلاعات برای ترکیب تخمین پارامترهای بدست‌آمده بر اساس چند سگمنت پیشنهادشده‌است که نتایج شبیه‌سازی بیانگر عملکرد مناسب این روش می‌باشد. در این مقاله کلیه روش‌های بیان‌شده بر روی اندازه-گیری‌های ترافیک بزرگراه I-494 در Minnesota، آمریکا تست-شده‌اند.

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

[1] Real-time
[2] Traffic flow
[3] Mean speed
[4] Traffic density
[5] Detector
[6] On-line

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

۲- مدل‌سازی جریان ترافیک بزرگراه

۲-۱- مدل ماکروسکوپیک جریان ترافیک

مدل ماکروسکوپیک 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 ارائه‌شد. در این مدلسازی، بزرگراه در نظر گرفته‌شده به N بخش کوچک[1] با طول‌های Δ_i و $i = 1,...,N$ تقسیم می‌شود، در حالیکه زمان‌گسسته‌سازی بر مبنای گام زمانی T می‌باشد. متغیرهای حالت استفاده‌شده در مدل ترافیک به شرح زیر می‌باشند:

- 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] سگمنت i را ترک می‌کنند 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 ماکروسکوپیک بصورت روابط زیر می‌باشد:

$$\rho_i(k+1)=\rho_i(k)+\frac{T}{\Delta_i\lambda_i}[q_{i-1}(k)-q_i(k)+r_i(k)-s_i(k)] \quad (۱)$$

$$s_i(k)=\beta_i(k)q_{i-1}(k) \quad (۲)$$

$$v_i(k+1)=v_i(k)+\frac{T}{\tau}[V(\rho_i(k))-v_i(k)]+\frac{T}{\Delta_i}v_i(k)[v_{i-1}(k)-v_i(k)]-\frac{\nu T}{\tau\Delta_i}\frac{[\rho_{i+1}(k)-\rho_i(k)]}{(\rho_i(k)+\kappa)}-\frac{\delta T}{\Delta_i\lambda_i}\frac{r_i(k)v_i(k)}{(\rho_i(k)+\kappa)}+\xi_i^v(k) \quad (۳)$$

$$q_i(k)=\rho_i(k)v_i(k)\lambda_i+\xi_i^q \quad (۴)$$

$$V(\rho)=v_f\,exp[-\frac{1}{a}(\frac{\rho}{\rho_{cr}})^a] \quad (۵)$$

معادلات (۱)، (۳)، (۴) و (۵) بترتیب معادله دینامیکی چگالی ترافیک، معادله دینامیکی سرعت متوسط، معادله جریان ترافیک و معادله ایستای سرعت می‌باشند. معادله (۲) بیانگر جریان ترافیک رمپ خروجی بخش i (در صورت وجود) بر اساس جریان ترافیک ورودی به بخش i با ضریب $\beta_i(k)$ می‌باشد. همچنین در روابط بالا $\xi_i^v(k)$ و $\xi_i^q(k)$ نویزهای سفید گوسی با میانگین صفر می‌باشند که بیانگر دینامیک‌های مدل‌نشده در روابط سرعت متوسط و جریان ترافیک بدلیل تجربی بودن این معادلات می‌باشند. رابطه (۱) بدلیل اینکه رابطه‌ای دقیق می‌باشد دارای نویز نمی‌باشد. λ_i تعداد خطوط عبوری در سگمنت i می‌باشد، $\tau, \nu, \kappa, \delta, v_f, \rho_{cr}$ و α پارامترهای مدل می‌باشند که برای همه سگمنت‌ها دارای یک مقدار می‌باشند. اثر این پارامترها بر مدل ماکروسکوپیک مورد بررسی قرارگرفته‌است ([۸]) و سه پارامتر ρ_{cr} , v_f و α که بترتیب چگالی بحرانی[2]، سرعت آزاد[3] و توان[4] می‌باشند بیشترین اثر را بر این مدل مرتبه دوم دارند. بنابراین در این مقاله فقط این سه پارامتر بعنوان پارامترهای نامعلوم در نظر گرفته‌شده‌اند و رویکردهای مختلف نسبت به تعیین آنها مورد بررسی قرارگرفته‌است، سایر پارامترها را می‌توان با تحلیل برون‌خط تعیین کرد [۷].

برای هر بخش i، جریان ترافیک ($q_i(k)$) را می‌توان با داشتن چگالی ترافیک ($\rho_i(k)$) و سرعت متوسط ($v_i(k)$) آن بخش مطابق رابطه (۴) محاسبه‌کرد. بنابراین چگالی ترافیک و سرعت متوسط را می‌توان بعنوان متغیرهای مستقل و جریان ترافیک را بعنوان متغیر وابسته درنظر گرفت. مدل بالا دارای تعدادی متغیر مرزی می‌باشد: جریان ترافیک ورودی به مسیر (q_0)؛ سرعت متوسط اتومبیل‌های ورودی به مسیر (v_0)؛ چگالی ترافیک خروجی از مسیر(ρ_{N+1})؛ جریان رمپ‌های ورودی در صورت وجود (r_i)؛ ضرایب رمپ‌های خروجی در صورت وجود (β_i). متغیرهای q_0 و v_0 و r_i معمولا با نصب وسایل اندازه‌گیری، اندازه‌گیری می‌شوند ولی ρ_{N+1} و β_i ها بطور مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد و باید تخمین‌زده‌شود. در این مقاله کلیه متغیرهای مرزی بعنوان متغیرحالت اضافه به سیستم ترافیک افزوده شده‌اند و به همراه سایر متغیرهای ترافیک تخمین‌زده شده‌اند. برای این امر از معادلات زیر برای مدل کردن این متغیرهای مرزی استفاده‌شده‌است[۱۱]:

[1] Segment

[2] Critical Density
[3] Free Speed
[4] Exponent

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

$$\begin{cases} q_0(k+1) = q_0(k) + \xi_0^q(k) \\ v_0(k+1) = v_0(k) + \xi_0^v(k) \\ \rho_{N+1}(k+1) = \rho_{N+1}(k) + \xi_{N+1}^\rho(k) \end{cases} \quad (۶)$$

۲-۲- مدل اندازه‌گیری‌های ترافیک

ابزارهای متداول اندازه‌گیری ترافیک اطلاعات زمان‌حقیقی از جریان و سرعت متوسط ترافیک را می‌دهند. با در نظر گرفتن یک ابزار اندازه‌گیری ترافیک نصب‌شده در مرز بخش‌های i و i+1، برای مدلسازی اندازه‌گیری‌های جریان و سرعت متوسط ترافیک می‌توان از روابط زیر استفاده کرد [۱]:

$$\begin{cases} y_i^q(k) = q_i(k) + \eta_i^q(k) \\ y_i^v(k) = v_i(k) + \eta_i^v(k) \end{cases} \quad (۷)$$

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

برای رمپ‌های ورودی و خروجی در یک بخش در صورت وجود فقط اندازه‌گیری‌های جریان آنها مورد توجه می‌باشد که می‌توان آنها را نیز بصورت زیر مدل کرد:

$$\begin{cases} y_i^r(k) = r_i(k) + \eta_i^r(k) \\ y_i^s(k) = s_i(k) + \eta_i^s(k) \end{cases} \quad (۸)$$

$y_i^r(k)$ و $y_i^s(k)$ بترتیب بیانگر اندازه‌گیری‌های جریان رمپ ورودی و خروجی، $\eta_i^r(k)$ و $\eta_i^s(k)$ نویزهای اندازه‌گیری مربوطه و همچنین $r_i(k)$ و $s_i(k)$ مقادیر واقعی آنها می‌باشند. همه نویزهای در نظر گرفته‌شده در معادلات مربوط به مدلسازی اندازه‌گیری‌ها سفید و میانگین صفر می‌باشند [۱۰].

۲-۳- مدل فضای حالت

اگر کل مسیر بزرگراه را بصورت اتصال زنجیره‌ای بخش‌ها در نظر بگیریم، مدل ماکروسکوپیک کامل با N بخش شامل ۲N معادله و ۲N متغیر مستقل و تعدادی متغیر مرزی می‌باشد. بنابراین با درنظر گرفتن بردار حالت سیستم بصورت

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

و بردار اندازه‌گیری Y(k) که شامل اندازه‌گیری‌های بدست‌آمده از سیستم مطابق روابط (۷) و (۸) می‌باشد، مدل ماکروسکوپیک ترافیک را می‌توان به فرم فضای حالت نشان داد [۱]:

$$\begin{cases} X(k+1) = \mathbf{h}(X(k), \rho_{cr}, v_f, a) + \zeta(k) \\ Y(k) = \mathbf{g}(X(k)) + \eta(k) \end{cases} \quad (۹)$$

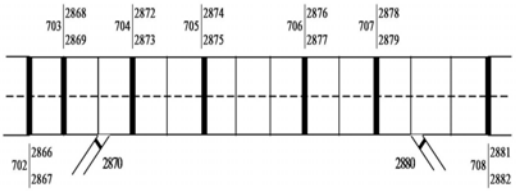
برای بدست‌آوردن تخمین حالات این سیستم از روش فیلترکالمن-تعمیم‌یافته استفاده‌شده است و برای تخمین پارامترهای مدل (v_f, ρ_{cr}, α) از روش‌های شرح‌داده‌شده در قسمت بعد استفاده-شده‌است.

۳- روش‌های تخمین پارامترهای مدل و شبیه-سازی‌ها

در این قسمت ابتدا مسیر و اطلاعات واقعی استفاده‌شده در شبیه-سازی‌ها شرح‌داده‌شده‌اند وسپس روش‌های مختلف برای تخمین حالات ترافیک با رویکرد تخمین برخط پارامترها به همراه شبیه‌سازی‌های مربوطه بیان‌شده‌اند.

۳-۱- مسیر انتخاب‌شده برای تخمین حالات ترافیک

مسیر درنظر گرفته‌شده برای تخمین، قسمتی از باند شرقی بزرگراه شماره I-494 در ایالت Minnesota بین ایستگاههای اندازه‌گیری ۷۰۲ تا ۷۰۸ می‌باشد. این مسیر دارای دو خط عبوری، یک رمپ ورودی و یک رمپ خروجی و طول تقریبی ۴۸۰۰ متر می‌باشد. شمای کلی آن و فاصله آشکارسازها بصورت زیر می‌باشد:



این مسیر به ۱۳ بخش با طول‌های:

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

تقسیم‌شده‌است که اندازه‌گیری‌ها در مرز بخش‌ها و بترتیب در ورودی بخش‌های اول، دوم، چهارم، ششم، نهم، یازدهم و خروجی بخش سیزدهم و رمپ‌های ورودی و خروجی قرار دارند. اندازه‌گیری-های مسیر اصلی شامل اندازه‌گیری‌های سرعت و جریان ترافیک و اندازه‌گیری در محل رمپ‌ها شامل جریان ورودی و یا خروجی به و یا از رمپ می‌باشد. دیتای ثبت‌شده با اندازه‌گیرهای ترافیک به اندازه-

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

گیری‌های جریان و سرعت متوسط ترافیک در هر دقیقه تبدیل‌شده‌اند. به منظور شبیه‌سازی، اندازه‌گیری‌های جریان و سرعت ترافیک برای دو روز اول سپتامبر ۲۰۰۹ و دوم سپتامبر ۲۰۰۹ استخراج‌شده‌است. از اندازه‌گیری آشکارسازهای ۷۰۲ ، ۷۰۸، رمپ ورودی و رمپ خروجی بعنوان اطلاعات اندازه‌گیری‌شده از سیستم، در کالمن‌فیلتر تعمیم‌یافته استفاده‌شده‌است و از اطلاعات ایستگاههای اندازه‌گیری ۷۰۳، ۷۰۴، ۷۰۵، ۷۰۶ و ۷۰۷ برای مقایسه تخمین بدست‌آمده از فیلتر و اطلاعات واقعی استفاده‌شده‌است. در ادامه بدلیل محدودیت متن فقط نتایج برای تخمین‌های ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ آورده‌شده‌است و برای مقایسه صحیح عملکرد، از معیار عملکردنسبی[1] استفاده‌شده‌است [۱]:

$$J=\sqrt{\frac{1}{KN}\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}(x_i(k)-\hat{x}_i(k))^2}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K}(x_i(k))^2}} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، x_iها مقادیر واقعی، $\hat{x}_i$ها مقادیر تخمین‌زده‌شده، K تعداد نمونه‌ها و N تعداد بخش‌ها می‌باشند.

پارامترهای مدل برای کل مسیر یکسان درنظر گرفته‌شده‌اند:

$$\nu = 35\ \mathrm{km^2/h}, \quad \kappa = 40\ \mathrm{veh/km/lane},$$
$$\tau = 25\ \mathrm{s}, \quad \delta = 1.1$$

سایر پارامترهای مدل یعنی ν_f, ρ_{cr}, α با روش‌های بحث‌شده در بخش‌های بعد محاسبه می‌شوند. در همه شبیه‌سازی‌ها پارامترهای استفاده‌شده برای کالمن‌فیلتر تعمیم‌یافته بصورت زیر می‌باشند:

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

به کمک مقادیر بیان‌شده برای کوواریانس متغیرهای حالت سیستم و متغیرهای اندازه‌گیری، ماتریس‌های Q و R که قطری می‌باشند بدست‌می‌آیند.

۳-۲- تخمین‌زن تطبیقی مبتنی بر فیلترینگ یکپارچه (تخمین‌زن نوع ۱)

در این رویکرد برای تخمین پارامترهای مدل بصورت برخط از تخمین‌زن فیلترکالمن‌تعمیم‌یافته استفاده می‌شود. برای مدل کردن این پارامترها از ایده مدلسازی بر اساس گام تصادفی استفاده‌شده‌است [۱]:

$$\begin{cases}\nu_f(k+1)=\nu_f(k)+\xi_{\nu_f}(k)\\ \rho_{cr}(k+1)=\rho_{cr}(k)+\xi_{\rho_{cr}}(k)\\ \alpha(k+1)=\alpha(k)+\xi_{\alpha}(k)\end{cases} \qquad (۱۱)$$

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

$$\begin{cases}P(k+1)=A(k)P(k)+\xi_3\\ y(k)=g(P(k),U(k))+\eta_{\rho}^{V}(k)\end{cases} \qquad (۱۲)$$

که در این فضای حالت:

$$P=[\nu_f\ \ \rho_{cr}\ \ \alpha]^T,\quad A(k)=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix},$$
$$\xi_3(k)=[\xi_{\nu_f}(\kappa)\ \ \xi_{\rho_{cr}}(\kappa)\ \ \xi_{\alpha}(k)]^T$$
$$y(k)=V(k),\quad U(k)=\rho(k),$$
$$g=\nu_f\,.exp[-\frac{1}{a}(\frac{\rho}{\rho_{cr}})^a]$$

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 $X=[\rho_1,v_1,...,\rho_N,v_N,r_i,\beta_i,q_0,v_0,\rho_{N+1},v_f,\rho_{cr},a]$ در نظر می‌گیریم و در نهایت از یک فیلتر کالمن‌تعمیم‌یافته برای تخمین حالات این سیستم افزوده‌شده که شامل حالات ترافیک و پارامترهای مدل می‌باشد استفاده می‌کنیم.

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

$$\rho_{cr}(0)=10veh/km/lane,$$
$$v_f(0)=180km/h,\quad a(0)=1.5,$$
$$\mathrm{cov}(\xi_{\rho_{cr}}(k))=0.03(veh/km/lane)^2,$$
$$\mathrm{cov}(\xi_{\nu_f}(k))=0.2(km/h)^2,\quad \mathrm{cov}(\xi_a(k))=0.0001,$$

برای این تخمین‌زن تطبیقی حالات مختلفی شبیه‌سازی شده‌اند. برای

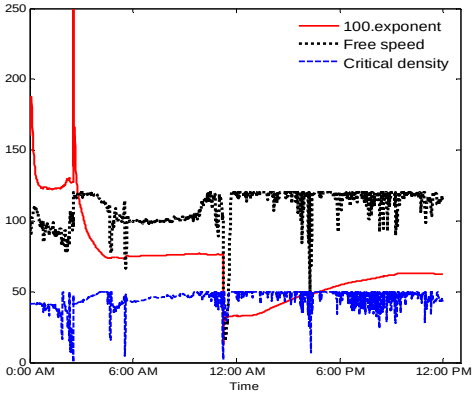
[1] Relative performance

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

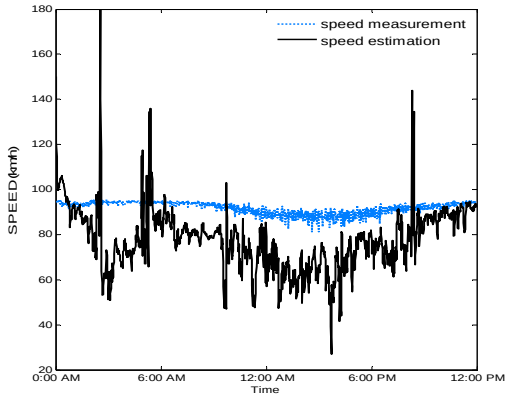
حالتیکه از اطلاعات اندازه‌گیرهای ۷۰۲، ۷۰۳، ۷۰۷ و ۷۰۸ و رمپ ورودی و رمپ خروجی مربوط به روز دوم سپتامبر ۲۰۰۹ بعنوان دیتای اندازه‌گیری‌شده از سیستم، در کالمن‌فیلترتعمیم‌یافته استفاده‌شود عملکرد تخمین‌زن یکپارچه برای تخمین برخط حالات ترافیک و پارامترهای مدل مناسب می‌باشد و مقدار هزینه ۰/۰۵۴ می‌باشد ولی در حالتیکه فقط از اطلاعات اندازه‌گیرهای ۷۰۲ ، ۷۰۸، رمپ ورودی و رمپ خروجی بعنوان اندازه‌گیری‌های سیستم استفاده‌شود (کاهش اطلاعات از سیستم) تخمین حالات ترافیک و پارامترهای مدل مطابق شکل‌های ۲، ۳ و۴ 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 دوسیستم وجود دارد و در واقع این روش قابل اعتماد نمی‌باشد. برای رفع این مشکل ایده فیلترینگ مجزا ارائه‌شده‌است.

۳-۳- تخمین‌زن تطبیقی مبتنی بر فیلترینگ مجزا (تخمین‌زن نوع ۲)

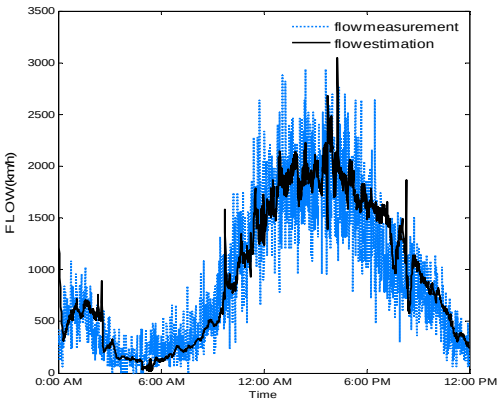
اساس این روش مانند روش فیلترینگ یکپارچه می‌باشد و در واقع از همان روابط (۱۲) نیز برای مدل‌کردن پارامترهای سیستم استفاده می‌شود. تفاوت این روش با روش قبل در فیلترینگ می‌باشد. در روش فیلترینگ یکپارچه از یک فیلتر برای تخمین حالات ترافیک و پارامترهای مدل استفاده می‌شود ولی در این رویکرد از دو فیلترکالمن‌تعمیم‌یافته 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 ۲: تخمین پارامترهای سیستم با تخمین‌زن‌تطبیقی نوع ۱ بصورت برخط



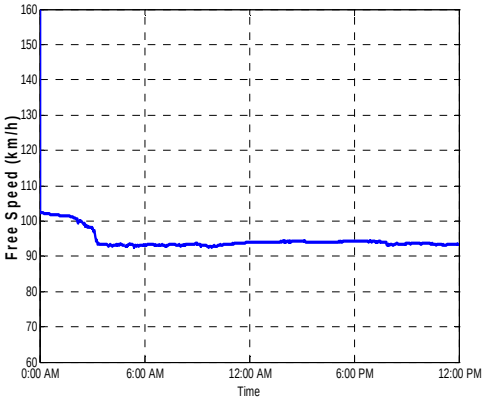
شکل ۳: تخمین سرعت ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن-تطبیقی نوع ۱



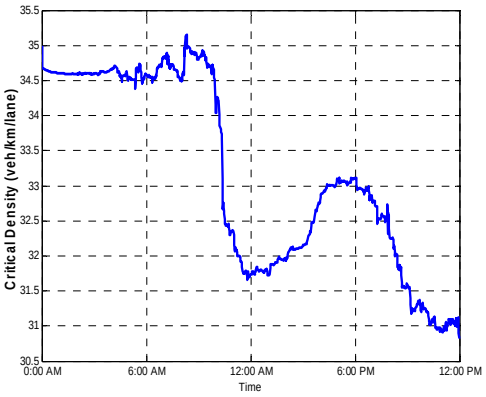
شکل ۴: تخمین جریان ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن-تطبیقی نوع ۱

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 استفاده‌شود در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان‌داده‌شده‌اند. 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 ایجاشده‌است.

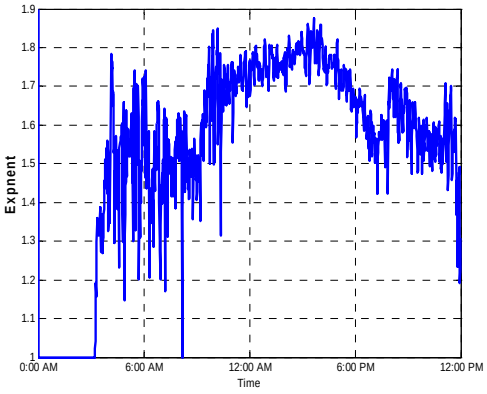
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]



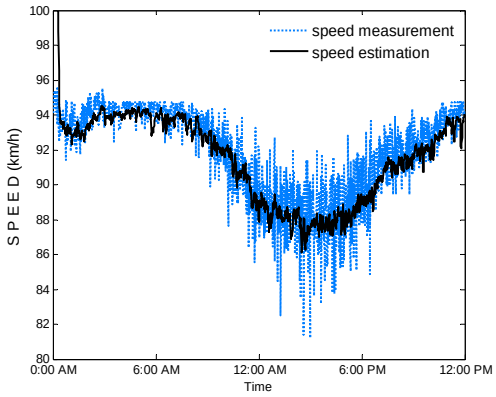
شکل ۵: تخمین سرعت آزاد با تخمین‌زن تطبیقی نوع ۲ بصورت برخط



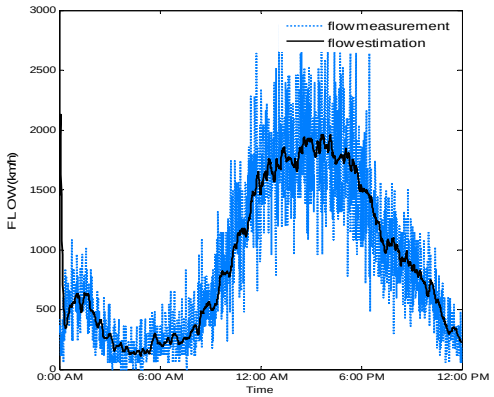
شکل ۶: تخمین چگالی بحرانی با تخمین‌زن تطبیقی نوع ۲ بصورت برخط



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



شکل ۸: تخمین سرعت ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن-تطبیقی نوع ۲



شکل ۹: تخمین جریان ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن-تطبیقی نوع ۲

در این حالت برای تخمین پارامترهای مدل از چگالی و سرعت تخمین‌زده‌شده سگمنت سیزدهم بعنوان ورودی و خروجی مدل استفاده‌شده‌است. نتایج هزینه تخمین برای دو روز اول سپتامبر ۲۰۰۹ و دوم سپتامبر ۲۰۰۹ برای کلیه سگمنت‌ها محاسبه‌شده است که بر طبق نتایج بدست‌آمده، برای روز اول سپتامبر، بهترین تخمین با سگمنت سوم (هزینه ۰/۰۵۲) و بدترین تخمین با سگمنت دوم و هزینه ۲/۳۶۹ می‌باشد. همچنین برای دوم سپتامبر بهترین و بدترین تخمین‌ها بر اساس سگمنت-های سیزدهم و اول با هزینه‌های ۰/۰۶ و ۲/۴۸ بدست‌آمده‌اند.

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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

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 مطرح‌شده 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[1] مطرح‌شد. در این روش، برای ترکیب N تصمیم و رسیدن به یک تصمیم واحد از رابطه ترکیب زیر استفاده می‌شود:

$$F(s_1,...,s_N)=\sum_{i=1}^{N} w_i b_i \qquad (۱۳)$$

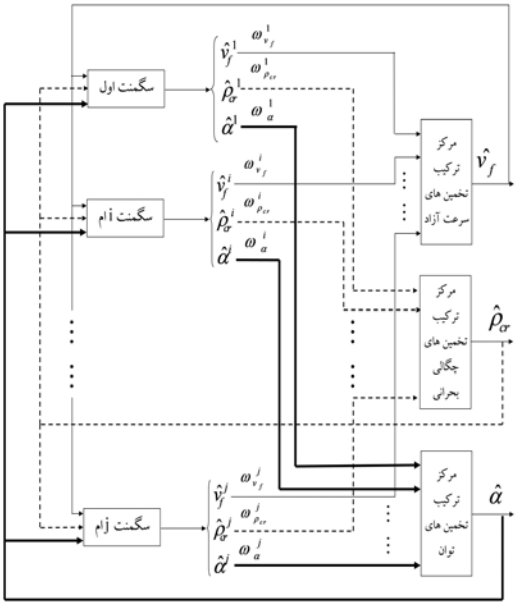
در رابطه (۱۳)، b_i، i امین عضو در بردار مرتب‌شده s_iها بصورت نزولی می‌باشد. در واقع b_1 بزرگترین عضو و b_N کوچکترین عضو این مجموعه تصمیم‌ها می‌باشند که با وزن‌های w_i با شرایط (۱۴) با هم ترکیب می‌شوند:

$$\begin{cases} 0 \le w_i \le 1, \quad i=1,...,N \\ \sum_{i=1}^{N} w_i = 1 \end{cases} \qquad (۱۴)$$

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 وزن‌ها بر اساس مقادیر کوواریانس خطای‌تخمین محاسبه می‌شوند. بدین‌گونه که، بعنوان نمونه برای هر سگمنت و یا تعدادی از سگمنت‌ها پارامتر سرعت‌آزاد تخمین‌زده می‌شود که هر تخمین دارای کوواریانس خطای‌تخمین نیز می‌باشد و هرچه تخمین دقیق‌تر باشد مقدار کوواریانس خطای‌تخمین مربوط کوچکتر می‌باشد و بالعکس. با توجه به توضیح‌داده‌شده، تخمین با دقت بیشتر، که مقدار کوواریانس خطای کوچکتری نیز دارد باید وزن بیشتری در مقدار تخمین نهایی داشته‌باشد. بدین منظور، می‌توان وزن هر پارامترتخمین‌زده‌شده را متناسب با معکوس کوواریانس خطای‌تخمین 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 ترکیب‌شده نهایی برای تخمین حالات ترافیک در مدل استفاده می‌شود. درنهایت ، در گام بعد برای بدست‌آوردن تخمین جدید پارامترها در هر سگمنت، از ترکیب تخمین‌های محلی بدست‌آمده 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 شرح‌داده‌شده را مطابق شکل ۱۰ می‌توان مدل‌کرد.



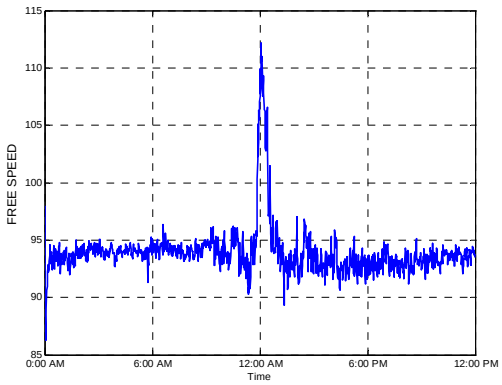
شکل ۱۰: ساختار استفاده‌شده برای ترکیب تخمین‌پارامترهای سیستم که مبتنی بر ترکیب تخمین پارامترهای بدست‌آمده از چند سگمنت مختلف می‌باشد

برای شبیه‌سازی این روش، در سه سگمنت ابتدا، میانی و انتهایی پارامترها تخمین‌زده‌شده‌اند وسپس این سه مجموعه پارامتر با روش بیان‌شده با هم ترکیب می‌شوند. نتایج تخمین برخط پارامترها، سرعت و جریان ترافیک در حالتیکه از اندازه‌گیرهای ۷۰۲ ، ۷۰۸، رمپ ورودی و رمپ خروجی روز اول سپتامبر ۲۰۰۹ بعنوان اطلاعات اندازه‌گیری‌شده از سیستم استفاده‌شود، برای ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نشان‌داده‌شده‌اند. 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 بدست‌آمده (۰.۰۷۱) اندکی بیشتر از بهترین حالت بیان‌شده در بخش قبل می‌باشد

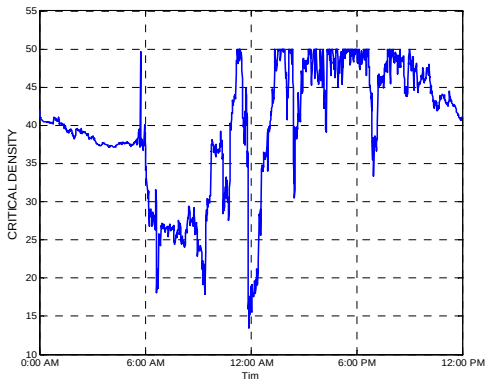
[1] Aggregating Multi Criteria

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

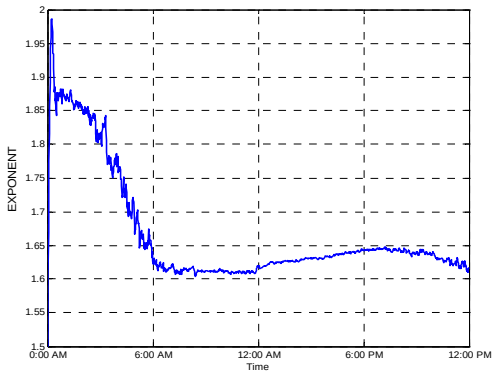
ولی مزیت اصلی این روش از بین بردن وابستگی شدید تخمین‌زن به تخمین‌های یک سگمنت می‌باشد.



شکل ۱۱: تخمین سرعت آزاد با تخمین‌زن‌تطبیقی نوع ۳ بصورت برخط



شکل ۱۲: تخمین چگالی‌بحرانی با تخمین‌زن‌تطبیقی نوع ۳ بصورت برخط



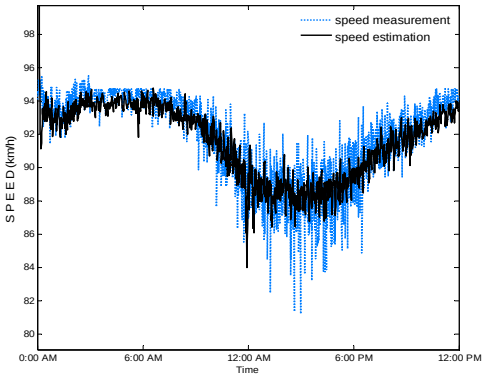
شکل ۱۳: تخمین توان با تخمین‌زن‌تطبیقی نوع ۳ بصورت برخط

نتیجه‌گیری

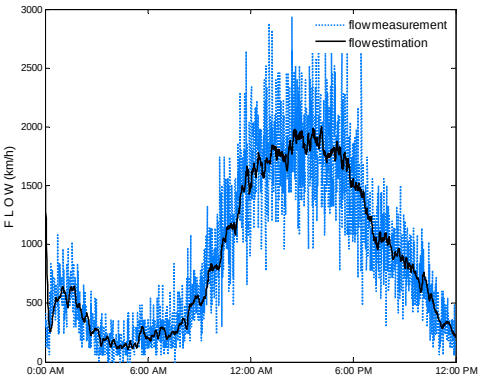
در این مقاله برای تخمین حالات ترافیک بزرگراه از تخمین‌زن تطبیقی با سه رویکرد استفاده‌شده‌است و روش‌های مطرح‌شده با کمک دیتای واقعی بدست‌آمده از بزرگراه I-494 در Minnesota مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در تخمین‌زن تطبیقی نوع اول، از یک فیلتر کالمن برای تخمین هم‌زمان و برخط متغیرهای ترافیکی (سرعت و چگالی ترافیک سگمنت‌ها) و پارامترهای مدل (سرعت‌آزاد، چگالی بحرانی و توان) استفاده‌شده‌است که عملکرد آن مناسب نمی‌باشد.

در روش دوم از دوفیلترکالمن مجزا برای تخمین پارامترهای مدل و متغیرهای ترافیک استفاده‌شده‌است. فیلترینگ مجزا دارای قابلیت تخمین مناسب، بدون بایاس و دقیق حالات ترافیک می‌باشد، اما مشکل آن وابستگی تخمین‌زن به سگمنت انتخاب‌شده برای تخمین پارامترهای مدل می‌باشد.

برای برطرف‌کردن این مشکل از ایده ترکیب تخمین پارامترهای مدل استفاده‌شده‌است. در این روش، پارامترهای مدل بر اساس اطلاعات سگمنت‌های مختلف تخمین‌زده 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 ۱۴: تخمین سرعت ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن‌تطبیقی نوع ۳



شکل ۱۵: تخمین جریان ترافیک در محل ایستگاه اندازه‌گیری ۷۰۵ با تخمین‌زن‌تطبیقی نوع ۳

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]

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., Blosseviller, 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.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.1.3.1]