

# طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم تخمین ارتفاع در ارتفاع‌سنج ترکیبی بارومتریک-اینرسی با استفاده از کنترل مدل پیش‌بین

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
 کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
 دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
 دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

جعفر کیقبادی\*  
 صدرا رفعت‌نیا  
 حسین نورمحمدی  
 محمدرولی ارباب میر

## چکیده

در این مقاله، به طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم جدیدی بر مبنای کنترلر مدل پیش‌بین، به منظور کاهش خطای تخمین ارتفاع در کانال عمودی سامانه‌ی ناوبری اینرسی پرداخته می‌شود. در سامانه‌های ناوبری اینرسی ناپایداری کانال عمودی نه تنها سبب می‌شود که خطای اندازه‌گیری ارتفاع به صورت نمایی افزایش یابد، بلکه منجر به کاهش دقت در تخمین سایر متغیرهای حالت ناوبری نیز می‌شود. این موضوع اهمیت و ضرورت ارایه‌ی الگوریتمی کارآمد برای تخمین نسبتاً دقیق ارتفاع را نشان می‌دهد. در این مقاله، ارتفاع‌سنج ترکیبی بارومتری-اینرسی برای کاهش خطای کانال عمودی سامانه‌ی ناوبری اینرسی ارایه می‌شود. هدف اصلی از طراحی الگوریتم کنترلر مدل پیش‌بین این است که با وجود خطاهای اندازه‌گیری در حسگرهای ناوبری اینرسی، بتوان ناپایداری کانال عمودی را کنترل نموده و تخمین نسبتاً دقیقی از ارتفاع ارایه کرد. به منظور پیاده‌سازی الگوریتم ارایه شده و صحت‌گذاری آن از تست خودرو استفاده می‌شود. نتایج حاصل از تست نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم طراحی شده، دقت تخمین ارتفاع عمودی به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. **واژه‌های کلیدی:** ارتفاع‌سنج ترکیبی بارومتری-اینرسی، سامانه‌ی ناوبری اینرسی، کنترلر مدل پیش‌بین، ناپایداری کانال عمودی.

## Design and Implementation of Altitude Estimation Algorithm in the Integrated Barometric-inertial Altimeter Using Model Predictive Control

J. Keighobadi  
 S. Rafatnia  
 H. Nourmohammadi  
 M. V. Arbabmir

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

## Abstract

In this paper, design and implementation of a new algorithm based on predictive model controller will be presented to reduce the height estimation error in vertical channel of inertial navigation system (INS). Vertical channel instability in the inertial navigation systems not only causes the measurement errors increase exponentially with altitude, but also leads to loss of precision in the state estimation process in the navigation system as well. This indicates the importance and necessity of providing accurate estimation of vertical altitude in the inertial navigation algorithms. In this paper, an integrated barometric-inertial altimeter is presented in order to reduce the vertical channel error in the INS. Designing model predictive controller, the vertical channel instability has been controlled despite of the inevitable errors in the measurement of the inertial sensors. Therefore, accurate estimate of the height will be provided. The proposed algorithm is implemented and validated by vehicular test. The experimental results show that by applying the proposed algorithm, the estimation accuracy of the vertical altitude will be enhanced.

**Keywords:** Integrated barometric-inertial altimeter, inertial navigation system, model predictive control, vertical channel instability.

مقادیر ثابت، منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در ارتفاع بارومتری اندازه‌گیری شده می‌شود [۱]. برای جلوگیری از این خطای اندازه‌گیری، از مدل اتمسفر غیراستاندارد استفاده می‌شود. در این مدل به جای ثابت فرض شدن دما و فشار در سطح دریا، با استفاده از روابطی که در ادامه ارایه می‌شود، این متغیرها محاسبه می‌شوند. در زمینه‌ی جبران خطای کانال عمودی تحقیقات متعددی صورت گرفته است، که در آن‌ها عمدتاً بر استفاده از حلقه‌ی دمپ کانال عمودی<sup>۲</sup> و الگوریتم‌های تخمین بهینه به ویژه فیلتر کالمن تمرکز شده است. ویندال<sup>۳</sup> و سینها<sup>۱</sup> یک روش تحلیلی برای محاسبه بهره‌های بهینه

## ۱- مقدمه

ارتفاع عمودی یکی از پارامترهای مهم در ناوبری وسایل نقلیه اعم از زمینی و هوایی می‌باشد. در سیستم‌های ناوبری اینرسی<sup>۱</sup>، برای پایدارسازی و کنترل ارتفاع و سرعت عمودی در کانال عمودی از فشار بارومتری استفاده می‌شود. با استفاده از فشار بارومتری پایدار، ارتفاع بارومتری دقیق نسبت به سطح آزاد دریا محاسبه می‌شود و سپس بر اساس مدل اتمسفر استاندارد، ارتفاع بارومتری بر اساس فشار استاتیک در یک نقطه‌ی مشخص، تعیین می‌شود. با توجه به اینکه مقدار دقیق دما و فشار در سطح دریا همیشه ثابت نیست، انحراف این مقادیر از

<sup>2</sup> Vertical damping loop channel

<sup>3</sup> Windall

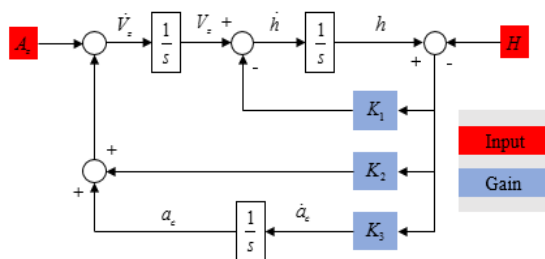
<sup>1</sup> Inertial Navigation Systems (INS)

در معادله‌ی (۳)،  $\Delta T$  و  $\Delta P$ ، به ترتیب اختلاف دما و فشار در سطح دریا نسبت به شرایط استاندارد است. برای محاسبه‌ی دما و فشار محلی در سطح دریا از روابط زیر استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} T_i &= T_s + LH_p \\ P_i &= P_s + \rho g H_p \end{aligned} \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $T_i$  و  $P_i$ ، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی دما و فشار دقیق در سطح دریا می‌باشند و  $T_s$ ، دمای اندازه‌گیری شده توسط حسگر می‌باشد.

هدف اصلی مکانیزم کانال عمودی کاهش خطاهای ارتفاع و سرعت عمودی می‌باشد. در حلقه‌ی دمپ ارتفاع بارومتری به عنوان یک سیستم کمکی با اطلاعات سامانه‌ی ناوبری اینرسی ترکیب می‌شود. بلوک دیاگرام حلقه‌ی دمپ میرایی عمودی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- بلوک دیاگرام حلقه میرایی کانال عمودی

معادلات حاکم بر حلقه دمپ به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} \dot{h} &= V_z - K_1(h - H) \\ \dot{V}_z &= A_z - a_c + 2w_s^2 h - K_2(h - H) \\ \dot{a}_c &= K_3(h - H) \end{aligned} \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $V_z$ ، سرعت عمودی،  $h$  و  $H$  به ترتیب ارتفاع تخمینی سامانه‌ی ناوبری اینرسی و ارتفاع بارومتری کالیبره شده برای اتمسفر غیراستاندارد هستند. شتاب عمودی اندازه گرفته شده با  $A_z$ ، نشان داده شده است. پارامترهای  $w_s$  و  $a_c$  به ترتیب خروجی جبران‌ساز و فرکانس شولر<sup>۵</sup> می‌باشند.  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  بهره‌های سیستم بوده و به گونه‌ای تعیین می‌شوند که اختلاف بین سرعت عمودی تخمین زده شده و مقدار مرجع حداقل شود.

### ۳- دینامیک خطای کانال عمودی

مدل خطای دینامیک ارایه شده در معادله‌ی (۵)، به صورت معادله‌ی زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_z &= 2w_s^2 \delta h + A_z + w(t) \\ \delta \dot{h} &= \delta V_z \end{aligned} \quad (6)$$

در معادله‌ی (۶)،  $w(t)$ ، نویز سفید گوسی می‌باشد. همچنین بایاس بارومتر به صورت فرآیند گوس-مارکوف مرتبه‌ی اول به صورت زیر مدل می‌شود [۷].

$$\dot{b}(t) = -\beta b(t) + \sqrt{2\beta\sigma^2} w(t) \quad (7)$$

کانال عمودی بارومتری-اینرسی ارایه داده‌اند [۲]. در کار دیگری که توسط سوآ و همکارانش انجام گرفت، بر اساس مدل دینامیک خطای کانال عمودی و داده‌های GPS فیلتر کالمن مناسبی طراحی شده است، که در آن GPS و فشارسنج به عنوان حسگرهای کمکی برای تخمین و جبران خطا وارد شده‌اند [۳]. در زمینه‌ی روش‌های تخمین، فیلتر جدیدی بر اساس فرضیه‌ی نقطه سیگما<sup>۴</sup>، برای کاهش خطای ارتفاع بارومتری بکار گرفته شده است [۴]. استفاده از مدل اتفافی توسعه یافته برای حذف برخی از ویژگی‌های استاتیکی نویز ارتفاع سنج بارومتری، در مرجع [۵] مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله، هدف طراحی الگوریتم جدیدی برای جبران خطای ارتفاع INS، با استفاده از روش کنترلگر مدل پیش‌بین است. مزیت‌های اصلی این کنترلگر نسبت به روش‌های کنترلی دیگر همچون PID و LQR، تنظیم ساده‌ی کنترل‌کننده، استفاده از مفاهیم اولیه کنترل در طراحی، قابلیت توسعه برای سیستم‌های پیچیده و تاخیردار هستند. همچنین در سیستم‌هایی با خروجی مرجع در زمان‌های آینده همچون سامانه‌های ناوبری اینرسی، عملکرد مدل کنترلگر پیش‌بین مناسب‌تر می‌باشد.

### ۲- مدل‌سازی دینامیکی کانال عمودی

در ابتدا به معرفی و توصیف ارتفاع بارومتری در شرایط اتمسفر غیراستاندارد و حلقه‌ی دمپ کانال عمودی پرداخته می‌شود. توجه شود که ارتفاع سنج فشاری به دلیل وابستگی به فیزیک اتمسفر باید قبل از استفاده کالیبره شود. در اتمسفر استاندارد، ارتفاع بارومتری به صورت زیر بیان می‌شود [۶].

$$H_p = \frac{T_0}{L} \left[ \left( \frac{P_s}{P_0} \right)^{-\frac{LR}{g}} - 1 \right] + H_0 \quad (1)$$

در معادله‌ی (۱)،  $T_0$  و  $P_0$ ، به ترتیب دما و فشار در سطح آزاد دریا هستند که در اتمسفر استاندارد برابر  $288.15(K)$  و  $101.325(kPa)$ ، فرض می‌شوند.  $R$  و  $L$  به ترتیب نرخ گذر ثابت<sup>۴</sup>، ثابت جهانی گاز و ثابت گرانش هستند.  $H_0$  مقدار صفر را برای داده‌های سطح دریا می‌گیرد و  $P_s$  فشاری است که توسط فشارسنج اندازه گرفته می‌شود. برای اتمسفر غیراستاندارد، دما و فشار در سطح دریا مقادیر ثابتی نیستند. با در نظر گرفتن ضریب مقیاس  $s$  و بایاس  $b$ ، برای ارتفاع بارومتری معادله‌ی (۲) برای اتمسفر غیراستاندارد در نظر گرفته می‌شود.

$$H = H_p + s(H_p - H_0) + b \quad (2)$$

در معادله‌ی (۲)،  $H$  ارتفاع بارومتری کالیبره شده برای شرایط اتمسفر غیراستاندارد می‌باشد، که در آن ضریب مقیاس و بایاس از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند.

$$s = \frac{\Delta T}{T_0}, \quad b = \frac{RT_0}{g} \left( \frac{\Delta P}{P_0} \right) \quad (3)$$

<sup>1</sup> Sinha

<sup>2</sup> Seo

<sup>3</sup> Sigma point hypotheses

<sup>4</sup> Constant lapse rate

<sup>5</sup> Schuler frequency

## ۵- توابع لاگر

توابع لاگر<sup>۲</sup> به دلیل توانایی آن‌ها در نشان دادن رفتار سیستم‌ها با کمترین تعداد پارامتر، کاربردهای فراوانی در طراحی کنترلرها و شناسایی سیستم‌ها دارند. تابع لاگر گسسته به صورت زیر تعریف می‌شود [۹].

$$\Gamma_i(z) = \frac{(z^{-1} - a_1)^{i-1}}{(1 - a_1 z^{-1})^i} \sqrt{1 - a_1^2} \quad (11)$$

در معادله‌ی (۱۱)،  $a_1$  قطب تابع لاگر می‌باشد که برای پایداری سیستم باید مقداری بین صفر تا یک داشته باشد. توابع لاگر به صورت زیر قابل بازنویسی می‌باشند.

$$L(i) = [l_1(i) \quad l_2(i) \quad \dots \quad l_N(i)]^T \quad (12)$$

در معادله‌ی (۱۲)،  $l_j(i)$ ، تبدیل Z وارون توابع  $\Gamma_i(z)$ ، می‌باشند. در ادامه به طراحی کنترلگر مدل پیش بین به کمک توابع لاگر پرداخته می‌شود.

## ۶- کنترلر مدل پیش‌بین

دینامیک ارایه شده در معادله‌ی (۹) را می‌توان به شکل زیر گسسته نمود.

$$x(t_{k+1}) = f(x(t_k), u(t_k)) \quad (13)$$

اگر در زمان  $k_i$  مسیر کنترلی  $\Delta u(k_i)$  و  $\Delta u(k_i + 1)$  و ... و  $\Delta u(k_i + k)$  ... به عنوان پاسخ ضربه‌ی سیستم باشند؛ برای توصیف آن، یک شبکه‌ی لاگر با  $N$  جمله به صورت زیر استفاده می‌شود [۹]:

$$\Delta u(k_i + k) = \sum_{j=1}^N c_j(k_i) l_j(k_i) = L(k) \eta^T \quad (14)$$

در معادله‌ی (۱۴)، برداری شامل ضرایب  $c_j$  است و از کمینه کردن تابع هزینه محاسبه می‌شود.

اگر مقدار مرجع ارتفاع که از GPS تعیین می‌شود با  $h^{obs}$  و مقدار تخمینی ارتفاع که از معادله‌ی (۵) بدست می‌آید با  $h$  نشان داده شود، اختلاف بین مقادیر تخمینی و مرجع به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\delta h_{ref} = h - h^{obs} \quad (15)$$

در واقع، برای تخمین خطای تعیین ارتفاع کانال عمودی، ارتفاع بدست آمده از سامانه‌ی GPS به عنوان سیگنال مرجع در نظر گرفته می‌شود. توجه شود با توجه به محدودیت‌هایی که در سامانه‌ی GPS وجود دارد (نظیر عدم دسترسی به داده‌برداری پیوسته، فرکانس پایین داده‌برداری با GPS، حساسیت به موانع طبیعی و مصنوعی و ...)، نمی‌توان از ارتفاع GPS به طور مستقیم برای تصحیح کانال ارتفاع استفاده نمود. بنابراین لازم است که ابتدا خطای تخمین ارتفاع عمودی بدست آورده شود و سپس با استفاده از این مقدار و بر اساس رابطه‌ی (۱۰) این خطا جبران شده و ارتفاع کانال عمودی تصحیح شود. تابع هزینه بر پایه‌ی کمینه‌سازی خطای بین سیگنال مرجع از معادله‌ی (۱۵) و سیگنال خروجی که از معادله‌ی (۹) محاسبه می‌شوند، به صورت معادله‌ی (۱۶) تعریف می‌شود.

$$(16)$$

با تعریف بردار حالت سیستم،  $\mathbf{X}$  و بردار ورودی،  $\mathbf{u}$  به صورت زیر؛

$$\mathbf{X} = [\delta V_z \quad \delta h \quad b]^T, \quad \mathbf{u} = [A_z \quad w(t)]^T \quad (8)$$

معادله‌های (۶) و (۷) در فضای حالت به صورت معادله‌ی (۹) بازنویسی می‌شوند.

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 2w_s^2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{2\beta\sigma^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (9)$$

بدین ترتیب، مدل‌سازی دینامیکی خطای کانال عمودی ارایه می‌شود.

## ۴- جبران خطا به کمک کنترلگر مدل پیش‌بین

هدف اصلی از کنترل دینامیک خطای کانال عمودی این است که با وجود نویز در حسگرهای ناوبری اینرسی، با استفاده از مدلی از فرآیند، سیگنال کنترلی را به گونه‌ای تنظیم نمود که ارتفاع نسبتاً دقیقی از ترکیب خروجی‌های معادلات (۵) و (۹)، محاسبه شود.

$$h_T = h - \delta h \quad (10)$$

در معادله‌ی (۱۰)،  $h_T$  ارتفاع تصحیح شده،  $h$  ارتفاع تخمینی از کانال INS بر اساس معادلات (۵) و  $\delta h$  خطای تخمین ارتفاع عمودی با اعمال کنترلگر مدل پیش‌بین بر معادلات (۹) می‌باشد.

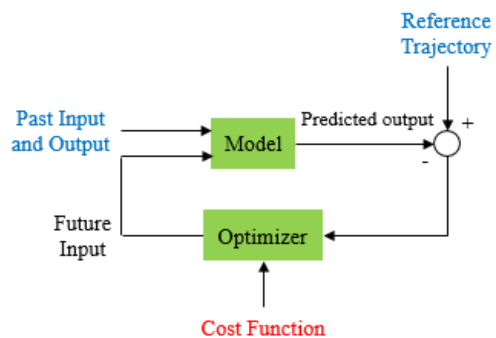
ساختار داخلی MPC، بر اساس اصل کنترل افق پیش‌بین<sup>۱</sup>، در شکل (۲) ارایه شده است و چهار مرحله‌ی اصلی آن عبارتند از [۸]:

(۱) یک مدل دینامیکی از سیستم مورد بررسی برای پیش‌بینی رفتار و خروجی آینده آن بر اساس گذشته و حال سیستم، ارایه می‌شود.

(۲) سیگنال کنترلی از کمینه کردن خطای بین خروجی پیش‌بینی شده و خروجی مرجع محاسبه می‌شود.

(۳) تنها نخستین المان بردار کنترلی استفاده شده و از سایر المان‌ها صرف نظر می‌شود (اصل کنترل افق پیش‌بین).

(۴) تمامی مراحل با به روزرسانی پارامترها و بازنشانی مقادیر جدید تکرار می‌شوند.



شکل ۲- ساختار اساسی کنترل پیش‌بین

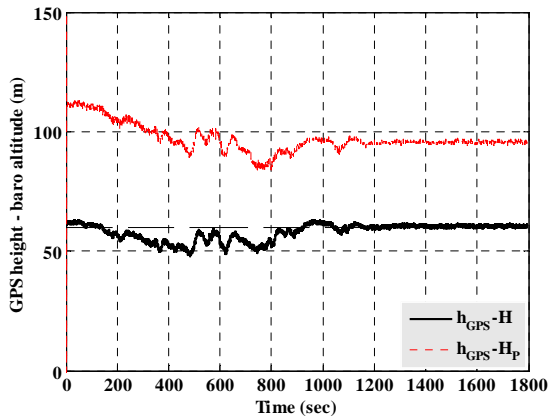
خروجی بر مبنای گذشته، حال و آینده‌ی ورودی بهینه کنترلی، در طی یک فرآیند بهینه‌سازی پیش‌بینی می‌شود.

<sup>2</sup> Laguerre functions

<sup>1</sup> Receding horizon control

## ۷-۱- تصحیح ارتفاع بارومتري

ابتدا، ارتفاع بارومتري تصحيح شده به کمک الگوریتم ارایه شده بر اساس اتمسفر غیراستاندارد با ارتفاع اندازه‌گیری شده توسط سامانه‌ی Vitans، مقایسه می‌شود. در شکل (۵)، اختلاف ارتفاع بارومتري تصحيح شده و مقدار اندازه‌گیری شده توسط سیستم Vitans که بر اساس اتمسفر استاندارد می‌باشد، با ارتفاع اندازه‌گیری شده توسط سامانه GPS نشان داده شده است.



شکل ۵- ارتفاع بارومتري تصحيح یافته و ارتفاع بارومتري سیستم Vitans در مقایسه با ارتفاع GPS

بر اساس شکل (۵)، اختلاف ارتفاع بین ارتفاع بارومتري و ارتفاع GPS حدود ۶۰ متر می‌باشد. با استفاده از داده‌های WGS84، که رایج‌ترین مدل در نظر گرفته شده برای زمین می‌باشد، ارتفاع سطح دریا در ناحیه‌ی تبریز حدود ۶۰ متر بالاتر از میانگین سطح دریا می‌باشد. بنابراین با دانش نسبت به این حقیقت که GPS، ارتفاع نسبت به سطح میانگین دریا را نشان می‌دهد، ارتفاع بارومتري محاسبه شده توسط الگوریتم بر پایه‌ی اتمسفر غیر استاندارد، مقدار قابل قبولی می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر بهره‌ی موجود در معادله‌ی (۵) به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند [۱۰].

$$\begin{aligned} K_1 &= 3.00 \\ K_2 &= 0.6452 \\ K_3 &= 0.8710 \end{aligned} \quad (17)$$

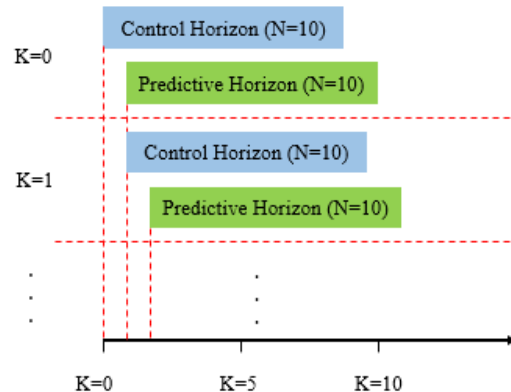
در ادامه، به ارزیابی الگوریتم پیشنهادی برای کاهش خطای تخمین ارتفاع عمودی پرداخته می‌شود.

## ۷-۲- پیاده‌سازی کنترلگر مدل پیش‌بین

کنترلگر مدل پیش‌بین برای دینامیک خطا به گونه‌ای طراحی شده است که خطای ارتفاع، اختلاف بین ارتفاع کانال عمودی INS و ارتفاع GPS را دنبال کند. سپس بر اساس معادله‌ی (۱۰)، ارتفاع دقیق محاسبه می‌شود. در شکل (۶)، مشاهده می‌شود که ارتفاع عمودی با دقت بسیار خوبی تخمین زده می‌شود.

$$\sum_{m=1}^{N_p} [r(k_i) - y(k_i + m | k_i)]^T [r(k_i) - y(k_i + m | k_i)] + \eta^T R_L \eta \quad (16)$$

دلیل این انتخاب، سهولت، عملی بودن و ارتباط آن با شکل کلاسیک کنترل پیش‌بین می‌باشد. در معادله‌ی (۱۶)،  $R_L$  یک ماتریسی مثبت معین می‌باشد. شکل (۳)، افق پیش‌بین و کنترل برای این الگوریتم را نشان می‌دهد که هر دو ۱۰ فرض می‌شوند.



شکل ۳- افق پیش‌بین و کنترل در هر مرحله

بر همین اساس هنگامی که  $N$ ، ۱۰ گام فرض می‌شود، در هر زمان نمونه برداری، کنترل پیش‌بین با افق زمانی ثابتی حرکت می‌کند. بنابراین وقتی  $k=0$  می‌باشد، افق کنترل از  $k=0$  تا  $k=9$  خواهد بود.

## ۷-۳- پیاده‌سازی الگوریتم و تحلیل نتایج

به منظور ارزیابی الگوریتم ارایه شده برای تخمین ارتفاع کانال عمودی سامانه‌ی ناوبری اینرسی، تست خودرو طراحی و اجرا شده است. تست خودرو مطابق شکل (۴) با استفاده از سامانه‌ی ناوبری اینرسی ترکیبی "Vitans"، حسگرهای اینرسی "ADIS16407" و گیرنده‌ی ("Garmin 35") GPS، انجام شده است. داده‌های دما و فشار از حسگرهای تعبیه شده در "ADIS16407" اندازه‌گیری می‌شوند. این تست در محیط دانشگاه تبریز انجام گرفته است.



شکل ۴- تست میدانی خودرویی و تجهیزات آن

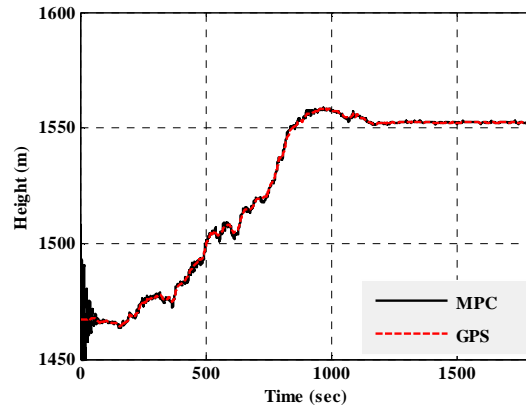
## ۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در بسیاری از کاربردهای ناوبری و برآورد پستی و بلندی‌های شهری، تخمین ارتفاع دقیق بسیار مهم می‌باشد. هدف اصلی مکانیزم کانال عمودی کاهش خطای سرعت و ارتفاع عمودی می‌باشد. در این مقاله برای کاهش خطای پیگردی INS به طراحی کنترلر مدل پیش‌بین پرداخته شد. از تست خودرو برای صحت‌گذاری بر الگوریتم مورد نظر استفاده شد. براساس نتایج بدست آمده، الگوریتم پیشنهاد شده برای سامانه‌ی INS، تخمینی خوبی از ارتفاع کانال عمودی با محدوده‌ی خطای قابل قبول ارائه می‌دهد. از مزیت‌های این الگوریتم نسبت به روش‌های دیگر همچون فیلتر کالمن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- یکی از مزیت‌های مهم الگوریتم پیشنهادی بر اساس کنترلر مدل پیش‌بین این است که برخلاف روش تخمین فیلتر کالمن، این روش وابسته و محدود به نویز سفید گوسی با میانگین صفر و کواریانس معلوم نمی‌باشد.
  - سامانه‌ی Baro-INS، پس از انتخاب بهترین بهره‌ها به کمک GPS، کاملاً مستقل بکار گرفته می‌شود. بنابراین در تونل‌ها، مکان‌هایی با ساختمان‌های بلند که GPS قطع می‌شود، تخمین قابل قبولی را از ارتفاع ارائه می‌دهد.
  - روش پیشنهادی بر اساس کنترلر مدل پیش‌بین در مقایسه با فیلتر کالمن حساسیت کمتری به نویزهای موجود در اندازه‌گیری، عدم قطعیت در مدل فرایند یا اندازه‌گیری و مدل‌سازی نادرست حسگرها دارد و تخمین ارتفاع با دقت بهتری انجام می‌گیرد. همچنین، ارتفاع تخمینی با فیلتر کالمن با نوسان‌های بیشتری همراه است.
  - ذکر این نکته ضروری است که تنظیم دقیق ماتریس‌های کواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد فیلتر کالمن خواهد داشت. در صورتی که در روش پیشنهادی چنین محدودیت‌ها و حساسیت‌هایی وجود ندارد.
- ذکر این نکته ضروری است که با وجود مزایای مذکور، نقاط ضعفی نیز در بکارگیری الگوریتم کنترلر مدل پیش‌بین وجود دارد. حجم محاسبات بیشتر نسبت به روش‌های کلاسیک و همچنین هزینه‌های سخت‌افزاری و پیاده‌سازی از نقاط ضعف الگوریتم پیشنهادی بر اساس کنترلر مدل پیش‌بین است.
- لازم به ذکر است، مدل کنترلر پیش‌بین پیشنهاد شده، می‌تواند تاثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد سیستم‌های ناوبری ترکیبی INS/GPS، داشته باشد، که پیشنهاد می‌شود در کارهای آینده مورد بررسی قرار گیرد.

## ۹- مراجع

- [1] Collinson R.P.G., *Introduction to avionics systems*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer, Boston, 2003.
- [2] Windall W.S. and Sinha P.K., *Optimizing the gains of the baro-inertial vertical channel*, J. Control and Dynamics, vol. 3, pp. 172-178, 1980.
- [3] Seo J., Lee J.G. and Park C.G., *Bias Suppression of GPS Measurement in Inertial Navigation System Vertical Channel*, Proc. of IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, CA, USA, pp. 143-147, 2004.



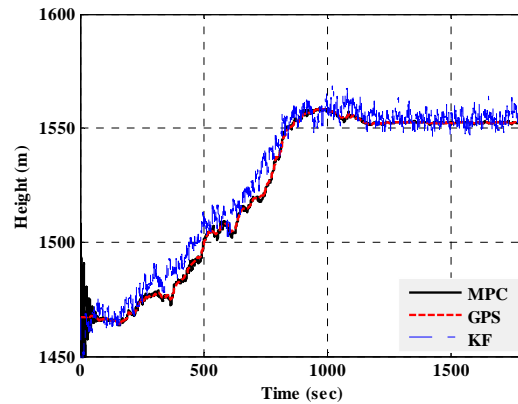
شکل ۶- ارتفاع تخمینی توسط MPC در تست خودرو

## ۷-۳- مقایسه با فیلتر کالمن

برای بررسی عملکرد الگوریتم کنترلر مدل پیش‌بین، ارتفاع کانال عمودی سیستم ناوبری اینرسی به کمک فیلتر کالمن تخمین زده می‌شود. معادلات دینامیک خطای کانال عمودی (۹) در فیلتر کالمن استفاده شده است، همچنین معادله (۱۸) به عنوان مقدار اندازه‌گیری در فیلتر کالمن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$h = H + \delta h - b + v_a \quad (18)$$

در معادله (۱۸)  $v_a$  نویز اندازه‌گیری می‌باشد. شکل (۷) عملکرد بهتر الگوریتم کنترلر مدل پیش‌بین را نسبت به الگوریتم فیلتر کالمن نشان می‌دهد.



شکل ۷- ارتفاع تخمینی توسط MPC و مقایسه‌ی آن با فیلتر کالمن

بر اساس شکل (۷)، الگوریتم کنترلر مدل پیش‌بین دقت قابل قبولی نسبت به الگوریتم فیلتر کالمن در تخمین ارتفاع کانال عمودی دارد. همچنین کنترلر مدل پیش‌بین برخلاف فیلتر کالمن فاقد نوسان در تخمین مقدار مرجع می‌باشد. البته اصلی‌ترین برتری کنترلر مدل پیش‌بین وابسته نبودن آن به فرآیند نویز گوسی با میانگین صفر<sup>۱</sup> می‌باشد.

<sup>۱</sup> zero-mean Gaussian noise process

- [4] Whang I.H., and Ra W.S., *Barometer Error Identification Filter Design using Sigma Point Hypothesis*, International Conference of ICCAS'07, Seoul, Korea, pp. 1410-1415, 2007.
- [5] Sabatini A.M. and Genovese V., *A stochastic approach to noise modeling for barometric altimeters*, J. Sensors, vol. 13, pp. 692-707, 2013.
- [6] Spitzer C.R., *Avionics development and implementation*, Taylor and Francis, Virginia, USA, 2007.
- [7] P. Doostdar, and J. Keighobadi; *Design and implementation of SMO for a nonlinear MIMIO AHRS*, J. Mechanical system and signal processing, vol. 32, pp. 94-115, 2012.
- [8] Kuhne F., Lages W.F. and Gomes M., *Point stabilization of mobile robots with nonlinear model predictive control*, Proc. of IEEE, International conference on mechatronic and automation, Canada, pp. 1163-1168, 2005.
- [9] Yakub F., Mori Y., *Effects of roll dynamics for car stability control by Laguerre functions*, Proc. of IEEE, International conference on mechatronics and automation, Takamatsu, Japan. 2013.
- [10] Ausman J.S., *A Kalman filter mechanization for the baro-inertial vertical channel*, Proc. of the 47th Annual Meeting of The Institute of Navigation, VA, pp. 153-159, 1991.