# بررسی عملکرد بهینه یک هاب انرژی با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر کنترل مقاوم

میثم احمدی منفرد[۱]، محمد تبریزیان [۲*]، الهه مرادی[۳]، حمیدرضا شاهمیرزاد[۴]

۱- مسئول نگهداری و تعمیرات نیروگاه برق و دستگاه‌های پخش و پالایش، پالایشگاه نفت شهید تندگویان تهران
*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴- کارشناس ارشد، مهندسی برق-قدرت، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
* تهران، ۱۸۱۵۱۶۳۱۱۱، mm_tabrizian@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۷ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۱۰/۰۵

**چکیده: مسأله تأمین انرژی از یک سو و مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی از سوی دیگر پژوهشگران را بر آن داشت تا به روش‌های کاهش مصرف انرژی و همچنین استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروهای هیبریدی روی آورند، فن‌آوری ریزشبکه پیشنهاد خوبی برای بهره‌گیری هم زمان از چندین واحد تولید پراکنده به صورت بهینه است، اما به دلیل وجود عدم قطعیت‌های موجود در پدیده‌هایی مانند تابش خورشید، به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر چگونگی عملکرد ریزشبکه و ادوات آن در آینده جهت تصمیم‌گیری‌های مناسب، نیاز به سازوکاری برای پردازش داده‌های مربوط و مدیریت آن‌ها می‌باشد. پاسخ به همه این مسائل، نیاز به آشنایی با مفهوم جدیدی تحت عنوان «هاب انرژی» دارد. با توجه به گسترده بودن موضوع کنترل سیستم‌های هاب انرژی، در این مقاله سعی شده است ضمن بررسی مختصر تعاریف و مفاهیم مربوطه، سیستم به گونه‌ای طراحی و کنترل شود که در برابر نامعینی و اغتشاش مقاوم باشد که روش پیشنهادی، بهره‌گیری از کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرخطی مقاوم است. شبیه‌سازی انجام‌گرفته در این پژوهش شامل دو بخش است که در بخش اول، تجزیه و تحلیل رفتار مدل و در بخش دوم، پیاده‌سازی کنترل‌کننده صورت گرفته است. برای این کار، ابتدا یک مدل جدید و معتبر از یک نمونه سیستم هاب انرژی انتخاب شده و پس از آن یک روند کنترلی با راهبرد پیش‌بین غیرخطی مقاوم پیاده گردیده است، مطالعه موردی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب به‌خوبی نشان می‌دهد که متغیرهای خروجی سیستم هاب انرژی مدل شده توانسته‌اند در زمان مناسبی پس از اعمال ورودی به پایداری رسیده و عملکرد بهینه‌ای داشته باشند.**

**واژه‌های کلیدی: مدیریت انرژی، هاب انرژی، کنترل‌کننده پیش‌بین، کنترل غیرخطی، کنترل مقاوم**

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

## ۱- مقدمه

کاهش منابع سوخت فسیلی، افزایش روز افزون هزینه آنها و مصرف بی‌رویه انرژی از مهمترین دلایلی است که پژوهشگران را بر آن داشته تا روش‌های جدیدی برای تولید انرژی ارائه دهند. مسئله مهم در مورد انرژی‌های فسیلی، تأثیرات سوء زیست‌محیطی ناشی از کاربرد سوخت‌های فسیلی است. این سوخت‌ها به عنوان یک تولیدکننده بزرگ گازهای گلخانه‌ای یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در حوزه‌ی محیط زیست را به وجود آورده‌اند. لذا روش‌های جدید تولید انرژی وابسته به طبیعت، به وجود آمده است که نسبت به روش‌های تولیدی با سوخت فسیلی، آلودگی‌های کمتری را ایجاد می‌کنند، اما با توجه به اینکه مقدار توان تولید شده بستگی به تغییرات تصادفی منابع طبیعی انرژی از قبیل باد، خورشید و غیره دارد، عموماً خروجی این روش‌ها غیرقابل پیش‌بینی و با قابلیت اطمینان پایین است. در دهه‌های اخیر از منابع تولید انرژی پراکنده، مخصوصاً منابع انرژی تجدیدپذیر که هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ میزان تولید گازهای آلاینده، بسیار مناسب‌تر هستند، استفاده شده است. با کنار هم قرارگیری منابع تولید انرژی پراکنده، مفهوم جدیدی در شبکه‌های قدرت به نام مدیریت انرژی و یکپارچه‌سازی حامل‌های انرژی معرفی شده است[۱].

هاب انرژی با نگاه یکپارچه به تمامی حامل‌ها در جهت تشکیل سیستم یکپارچه‌ی انرژی، به عنوان واحدی تعبیر می‌گردد که در آن انرژی قابل تبدیل، انتقال و ذخیره‌سازی است[۳،۲]. مفهوم سیستم هاب انرژی به عنوان مدلی برای مطالعه یکپارچه زیرساخت‌های مختلف انرژی مطرح می‌شود. در هاب انرژی این سؤال اساسی مطرح است که حامل‌های انرژی به چه میزانی تامین، تبدیل و ذخیره‌سازی شوند تا در نهایت تقاضای بار مصرف‌کنندگان متصل به آن تأمین گردد.

راهبرد(استراتژی) کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل[۱](MPC) به این صورت است که در هر گام نمونه‌برداری، ابتدا با استفاده از مدل پیش‌بینی فرآیند، خروجی فرآیند در طول افق مورد نظر، پیش‌بینی می‌شود، سپس از کمینه کردن تابع هزینه (که اغلب از مجموع مربعات خطای پیش‌بینی و مربعات سیگنال کنترل یا تغییرات آن تشکیل شده است) با در نظر گرفتن قیود، توالی فرمان‌های کنترل در طول افق کنترل به دست می‌آید. سپس طبق اصل کنترل افق محدود[۲](RHC) اولین جزء از این توالی به عنوان سیگنال کنترل در یک زمان به فرآیند اعمال می‌شود و بقیه‌ی توالی نادیده گرفته می‌شود. کنترل پیش‌بین یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترلی در صنعت، به ویژه در کنترل فرآیند است. مهم‌ترین مزایایی استفاده از این روش کنترلی عبارتند از: امکان کاربرد آسان برای سامانه‌های چند متغیره، امکان کنترل سامانه‌های دارای تأخیر زیاد و یا غیرکمینه فازی، قابلیت جبران‌سازی اغتشاشات اندازه‌گیری، پوشش دادن قیود حاکم بر فرآیندها و قابلیت انعطاف و توسعه‌دهی آن[۵،۴].

راهبرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، یک ایده خاص در طراحی کنترل‌کننده‌ها بوده که از آن در بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی سامانه‌های مختلف از قبیل خطی یا غیرخطی، گسسته یا پیوسته، توزیع شده یا متمرکز استفاده شده است. مشخصه‌های MPC را می‌توان مدل استفاده برای پیش‌بینی و بازخورد برای عدم قطعیت در مدل در نظر گرفت.

اولین روش کنترل پیش‌بین در سال ۱۹۷۸ میلادی با نام تجاری آیدکام[۳](IDCOM) و نام آکادمیک مک[۴](MAC) معرفی شد. در این روش از پاسخ ضربه برای مدل کردن فرآیند و یک تابع هدف مربعی که بر روی افق پیش‌بین محدود تعریف می‌گردد، استفاده می‌شد. الگوریتم‌های MAC وDMC در اصل برای فرآیندهای چندمتغیره بدون قید طراحی شدند، در نتیجه برای مسائل دارای قید روش‌های کنترلی مناسبی نیستند. این ایراد با نوشتن الگوریتم کنترل ماتریس پویا[۵](DMC) به صورت یک مسئله برنامه‌سازی مربعی برطرف می‌گردد. در این روش قیود ورودی و خروجی به طور مستقیم در برنامه‌سازی دخالت داده می‌شوند[۷] و خروجی آینده را می‌توان بصورت مستقیم با استفاده از ماتریس پویش به بردار ورودی‌ها ارتباط داد و بنابراین تمام قیود روی ورودی و خروجی را می‌توان بصورت قیود نامساوی روی بردار ورودی‌ها درآورد. الگوریتم کنترل ماتریس پویای مربعی[۶] (QDMC) را می‌توان به عنوان یکی از کنترل‌کننده‌های پرکاربرد در صنعت دانست[۸،۹].

کامل‌ترین و پرکاربردترین فرم کنترل پیش‌بین، کنترل پیش‌بین تعمیم یافته[۷] (GPC) است. در این روش از مدل تابع تبدیل کاریما[۸] (CARIMA) یا آریماکس[۹] (ARIMAX) برای نمایش مدل ریاضی فرآیند استفاده می‌شود. این الگوریتم را می‌توان مانند سایر الگوریتم‌هایی که مدل تابع تبدیل را به کار می‌برند، به‌سادگی و با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی و تخمین برخط مانند حداقل مربعات بازگشتی در حالت تطبیقی پیاده‌سازی نمود[۱۱و۱۰].

در مرجع[۱۲]، یک مسأله‌ی بهینه‌سازی برای عملکرد بهینه‌ی هاب انرژی مورد نظر طراحی شده است. تابع هدف، به حداقل رساندن همزمان هزینه‌ی انرژی کاربر و میزان هدر رفت پنل‌های خورشیدی است. حل مسأله بهینه‌سازی فوق باعث مشخص شدن مقدار بهینه هر حامل انرژی در ورودی و چگونگی انتقال و تبدیل این حالت‌های مختلف انرژی به همدیگر است. روش مطرح شده در یک منزل مسکونی به عنوان یک هاب انرژی خانگی شامل منابع تولید انرژی تجدیدپذیر اعمال شده است تا اثربخشی این روش مشخص شود. در مرجع[۱۳]، رویکردی کنترلی برای مدل‌سازی و بهره‌برداری سیستم هاب انرژی پیشنهاد شده است که ابتدا مدل‌سازی فضای حالت سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از خطای پیش‌بینی بارهای الکتریکی به عنوان اغتشاش اضافه شونده به سیستم ارائه شده است.

کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مدل به دلیل تأثیر کنترلی بسیار مناسب، به‌طور گسترده‌ای در فرآیندهای صنعتی به کار گرفته شده است اما این نوع کنترل‌کننده ضعف‌هایی نیز دارد که باعث شده همواره نتایج به دست آمده از آن کمتر از حد انتظار باشد. یک نقطه ضعف این کنترل‌کننده‌ها دشواری و زمان‌بر بودن تنظیم آنها برای زمان‌هایی است

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

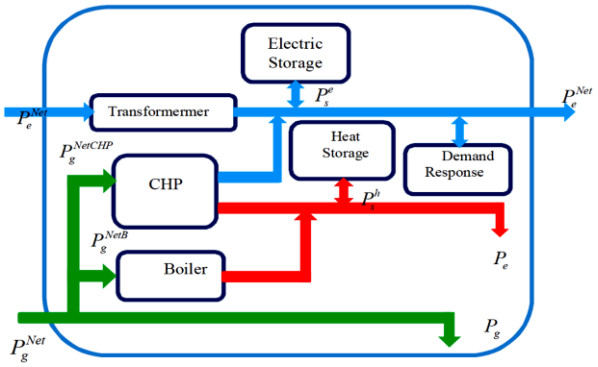
که تأخیرهای موجود در سیستم طولانی مدت باشد که با توجه به وجود چنین تأخیرهایی در مدل هاب انرژی، نمی‌توان به نتایج حاصل از استفاده مستقیم کنترل‌کننده در مورد این سیستم‌ها اعتماد کرد. ضعف دیگر کنترل‌کننده‌های پیش‌بین، مبتنی بر مدل بودن آنهاست؛ بدین معنی که مدل استفاده شده در آن می‌بایست کاملاً دقیق باشد و این درحالی است که سیستم هاب انرژی در بخش‌های مختلف خود دارای عدم‌قطعیت است و در نظر نگرفتن این عدم‌قطعیت‌ها در سیستم، اجتناب‌ناپذیر است[۶]. برای پوشش دادن ضعف‌های کنترل‌کننده MPC، در این پژوهش سعی شده است، سیستم هاب انرژی به گونه‌ای کنترل شود که در برابر هر گونه نامعینی و هر نوع تأخیر و اغتشاش مقاوم باشد که در این مقاله استفاده از روش کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر کنترل مقاوم، پیشنهاد شده است. ویژگی‌های اصلی روش پیشنهادی عبارتند از: در نظر گرفتن اغتشاش‌ها و عدم‌قطعیت‌ها در مدل سیستم هاب انرژی برای نزدیک‌تر بودن هر چه بیشتر مدل مورد استفاده به واقعیت، ارائه استراتژی کنترل پیش‌بین غیرخطی برای مقابله با اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها و تضمین پایداری سیستم با وجود کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین غیرخطی مقاوم.

در ادامه این مقاله و در بخش دوم، نحوه مدل‌سازی مسئله بیان گردیده و مدل اجزای مختلف آن شامل هاب انرژی، خودرو الکتریکی هیبریدی، پنل خورشیدی، بویلر گازی، ذخیره‌ساز حرارتی و بارهای الکتریکی و حرارتی تشریح شده است و روابط تعادل الکتریکی و حرارتی ارائه شده و محدودیت‌های شبکه و مبدل‌ها بیان گردیده است و سپس نحوه مدل‌سازی فضای حالت و مبانی کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم ذکر گردیده است. در بخش سوم، نحوه شبیه‌سازی و مطالعات موردی و نتایج عددی حاصله ارائه و تحلیل شده است و نهایتا در بخش چهارم مقاله، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری این مقاله بیان شده است.

## ۲- مدلسازی مسئله

### ۲-۱- مدلسازی هاب انرژی

هاب انرژی سیستم(سامانه) یکپارچه شامل چند حامل انرژی است که در آن قابلیت تبدیل، ذخیره و انتقال حامل‌های مختلف انرژی از ورودی به سمت خروجی آن وجود دارد. مهم‌ترین مزایای به کارگیری سیستم چندعاملی، افزایش امنیت در تأمین بار و کاهش کل هزینه‌ی بهره‌برداری است.




شکل(۱): نمونه‌ای از یک هاب انرژی [۱۴]

نسبت تبدیل انرژی از ورودی به خروجی به کمک ماتریس C (ماتریس تزویج مبدل‌ها) نشان داده شده است. عناصر این ماتریس ($C_{\alpha\beta}$) راندمان هر مبدل است. $P$ و $L$ به ترتیب توان ورودی و خروجی و $\{\alpha\ .\beta\ \dots\}$ اندیس‌های حامل‌های مختلف انرژی است[۱۴]:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\omega \end{bmatrix}}_{L} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{\alpha\alpha} & C_{\beta\alpha} & \cdots & C_{\omega\alpha} \\ C_{\alpha\beta} & C_{\beta\beta} & \cdots & C_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\omega} & C_{\beta\omega} & \cdots & C_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_{C} \underbrace{\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \\ \vdots \\ P_\omega \end{bmatrix}}_{P} \quad (۱)$$

با افزودن ذخیره‌ساز انرژی به مبدل، ارتباط بین ورودی و خروجی به صورت رابطه‌ی (۲) توسعه می‌یابد. ذخیره‌ساز می‌تواند قبل و یا بعد از مبدل‌های انرژی قرار گیرد.

$$L + M = C\,[P - Q] \quad (۲)$$

در رابطه‌ی (۲)، $Q$ و $M$ به ترتیب متناظر با توان ذخیره‌سازهای قبل و بعد از مبدل است. معمولاً مدل‌سازی کل انرژی ذخیره شده به بعد از مبدل‌ها منتقل می‌گردد که رابطه‌ی (۳) این موضوع را نشان می‌دهد.

$$L = C\,[P - Q] - M = CP - M^{eq} \quad (۳)$$

در رابطه‌ی (۳)، $M^{eq}$ توان ذخیره شده‌ی معادل است که از رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌گردد.

$$M^{eq} = CQ + M \quad (۴)$$

اگر $e_\alpha$ نرخ شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باشد، برای انرژی ذخیره‌ساز $E_\alpha$ می‌توان رابطه (۵) را نوشت:

$$\dot{E}_\alpha = e_\alpha\, Q_\alpha \quad (۵)$$

لذا رابطه‌ی توصیف‌کننده‌ی یک ذخیره‌ساز به صورت (۶) خواهد بود.

$$M^{eq} = C_{\alpha\beta}\, Q_\alpha + M_\beta = \frac{C_{\alpha\beta}}{e_\alpha}\, \dot{E}_\alpha + \frac{1}{e_\beta}\, \dot{E}_\beta \quad (۶)$$

همچنین تزویج بین ذخیره‌سازهای همه حامل‌های انرژی قرار گرفته بین ورودی و خروجی به صورت رابطه‌ی ماتریسی (۷) نوشته می‌شود:

همچنین تزویج بین ذخیره‌سازهای همه حامل‌های انرژی قرار گرفته بین ورودی و خروجی به صورت رابطه‌ی ماتریسی (۷) نوشته می‌شود:

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_{\alpha}^{eq} \\ M_{\beta}^{eq} \\ \vdots \\ M_{\omega}^{eq} \end{bmatrix}}_{M^{eq}} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{\alpha\alpha} & S_{\beta\alpha} & \cdots & S_{\omega\alpha} \\ S_{\alpha\beta} & S_{\beta\beta} & \cdots & S_{\omega\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{\alpha\omega} & S_{\beta\omega} & \cdots & S_{\omega\omega} \end{bmatrix}}_{S} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{E}_{\alpha} \\ \dot{E}_{\beta} \\ \vdots \\ \dot{E}_{\omega} \end{bmatrix}}_{\dot{P}} \quad (۷)$$

در رابطه‌ی(۷)، $S$ ماتریس تزویج ذخیره‌ساز نام دارد و $\dot{E}$ ماتریس تغییرات انرژی ذخیره شده‌ی هر یک از مبدل‌هاست. نهایتاً رابطه‌ی بین ورودی و خروجی در یک هاب انرژی شامل ذخیره‌ساز، به صورت رابطه‌ی (۸) خواهد بود[12,14].

$$L = C\,P - S\,\dot{E} = \begin{bmatrix} C & -S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \dot{E} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

## ۲-۲- مدلسازی PHEV

خودروهای برقی به عنوان یکی از اجزای مهم خانه‌های هوشمند آینده، دارای قابلیت ذخیره‌سازی انرژی هستند. نرخ شارژ و دشارژ این خودروها به یک مقدار مشخص محدود می‌شود. یعنی:

$$\begin{matrix} E_{PHEV}^{ch}(t) \le E_{max}^{ch} \\ E_{PHEV}^{dch}(t) \le E_{max}^{dch} \end{matrix} \quad (۹)$$

که $E_{max}^{ch}$ و $E_{max}^{dch}$ بیشینه(ماکزیمم) نرخ شارژ و دشارژ می‌باشد. به عنوان مثال، فرض شده است که خودرو برقی از ساعت g تا ساعت c بیرون از خانه باشد. در طول بازه‌ی زمانی $[g.c]$ خودرو برقی در خانه موجود نیست و شارژ و دشارژ آن امکان‌پذیر نیست. به این منظور، سطح شارژ خودرو برقی در ساعت t که با $E_{PHEV}(t)$ نشان داده می‌شود، به صورت رابطه‌ی (۱۰) بیان می‌گردد[12,14]:

$$\begin{matrix} E_{PHEV}^{0} + \sum_{h=1}^{t} E_{PHEV}^{ch}(h) - E_{PHEV}^{dch}(h), \\ \forall\, t \le g-1 \\ E_{PHEV}^{0} + \left[\sum_{h=1}^{t} E_{PHEV}^{ch}(h) - E_{PHEV}^{dch}(h)\right] - E_{PHEV}^{out}, \\ \forall\, t \ge c+1 \end{matrix} \quad (۱۰)$$

در رابطه‌ی (۱۰)، $E_{PHEV}^{0}$ سطح شارژ خودرو برقی در ساعت اولیه‌ی روز بوده که به آن شارژ اولیه گفته می‌شود و $E_{PHEV}^{out}$ انرژی مصرف شده در خارج از خانه است که بین ساعت $[g.c]$ مصرف می‌شود. ظرفیت باتری خودرو برقی نیز مقدار محدودی است و بیش از آن مقدار نمی‌تواند شارژ شود. این قید به صورت رابطه‌ی زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{cases} E_{PHEV}(t) \ge 0 \\ E_{PHEV}(t) \le cap_{PHEV} \end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن، $cap_{PHEV}$ ظرفیت باتری خودرو برقی است. همچنین، مصرف‌کننده در نظر دارد همواره با سطح شارژ بیشینه از خانه خارج شود، یعنی:

$$E_{PHEV}(g-1) = cap_{PHEV} \quad (۱۲)$$

و در نهایت، سطح شارژ خودرو برقی در انتهای روز نباید کمتر از میزان شارژ اولیه باشد که این قید به صورت رابطه‌ی (۱۳) بیان می‌گردد[14]:

$$E_{PHEV}(24) \ge E_{PHEV}^{0} \quad (۱۳)$$

## ۳-۲- پنل خورشیدی

تولید انرژی توسط پنل‌های خورشیدی وابسته به شدت تابش است. معادله‌ی (۱۴) رابطه‌ی توان خروجی پنل‌های خورشیدی و شدت تابش را نشان می‌دهد:

$$E_{PV}^{G} = \begin{cases} \left(\frac{\eta_s}{K_s}\right) \times R^2 & R \le K_s \\ \eta_s \times R & K_s \le R \le R_n \\ P_n & R \ge R_n \end{cases} \quad (۱۴)$$

در رابطه‌ی (۱۴)، R شدت تابش، $\eta_s$ بازدهی، $K_s$ نقطه‌ی زانویی و $P_n$ توان نامی خروجی است[14].

## ۴-۲- بویلر گازی

معمولاً در کنار واحد CHP یک بویلر گازی قرار داده می‌شود تا از تأمین بار حرارتی اطمینان حاصل شود. حرارت خروجی بویلر گازی از حد مشخصی نمی‌تواند فراتررود که این محدودیت در رابطه‌ی (۱۵) نشان داده شده است:

$$H_{GB}(t) \le H_{GB}^{max} \quad (۱۵)$$

که $H_{GB}^{max}$ مقدار نامی حرارت خروجی بویلر است[۱۴].

## ۵-۲- ذخیره ساز حرارتی

ذخیره‌ساز حرارتی که برای عملکرد بهینه‌ی سیستم استفاده می‌شود، می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش هدررفت پنل‌های خورشیدی داشته باشد. در رابطه‌ی (۱۶)، سطح حرارت ذخیره‌ساز فرمول‌بندی شده است[۱۴].

$$\begin{matrix} SOH_{HS}(t) \\ = H_{HS}^{0} + \sum_{h=1}^{t} H_{HS}^{ch}(h) \\ - H_{HS}^{dch}(h) \end{matrix} \quad (۱۶)$$

در رابطه‌ی (۲۱۶)، $H_{HS}^{0}$ حرارت ذخیره‌ساز در ساعت اولیه‌ی روز است که سطح حرارت اولیه نامیده می‌شود. شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز نیز باید در حد نامی خود باقی بماند. در روابط (۱۷)، $H_{HS}^{max.ch}$ و $H_{HS}^{max.dch}$ نرخ بیشینه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز می‌باشد.

$$\begin{matrix} H_{HS}^{ch}(t) \le H_{HS}^{max.ch} \\ H_{HS}^{dch}(t) \le H_{HS}^{max.dch} \end{matrix} \quad (۱۷)$$

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

انتظار می‌رود سطح حرارت ذخیره‌ساز حرارتی در شروع روز از مقدار سطح حرارت اولیه کمتر نباشد که این شرط در رابطه‌ی (۱۸) نشان داده شده است.

$$SOH_{HS}(24) \geq H_{HS}^{0} \quad (۱۸)$$

همچنین، سطح حرارت ذخیره‌ساز باید از مقدار نامی خود کمتر بوده و غیرمنفی باشد، یعنی:

$$\begin{cases} SOH(t) \geq 0 \\ SOH(t) \leq CAP_{HS} \end{cases} \quad (۱۹)$$

در رابطه‌ی (۱۹)، $CAP_{HS}$ ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی است[۱۴].

## ۶-۲- ذخیره ساز الکتریکی و حرارتی

مدل‌سازی گسسته‌ی این ذخیره‌سازها طبق روابط (۲۰) بیان می‌شود.

$$P_s^{e.h}(t) = P_s^{e.h}(t-1) + \eta\, P_{e.h}^{b}(t) - P_{e.h}^{loss}(t)$$
$$\eta_{e.h} = \begin{cases} \eta_{e.h}^{ch} & if \quad P_{e.h}^{b}(t) > 0 \\ 1/\eta_{e.h}^{dis} & otherwise \end{cases} \quad (۲۰)$$

در رابطه‌ی (۲۰)، بالانویس $e$ و $h$ به ترتیب مربوط به انرژی الکتریکی و حرارتی است. تلفات ذخیره‌ساز نیز با رابطه‌ی (۲۱) بیان می‌شود.

$$P_{e.h}^{loss}(t) = \alpha_{e.h}^{loss}\, P_s^{e.h} \quad (۲۱)$$

در رابطه‌ی (۲۱)، $\alpha_{e.h}^{loss}$ ضریب تلفات ذخیره‌ساز است. کمینه و بیشینه ظرفیت این ذخیره‌سازها نیز با معادله‌ی (۲۲) محدود می‌شود.

$$\alpha_{e.h}^{min} P_{e.h}^{M} \leq P_s^{e.h}(t) \leq \alpha_{e.h}^{max} P_{e.h}^{M} \quad (۲۲)$$

در روابط (۲۰) تا (۲۲)، $P_s^{e.h}(t)$، $P_{e.h}^{b}(t)$ ، $P_{e.h}^{loss}(t)$، $\eta_{e.h}^{ch}$ و $\eta_{e.h}^{dis}$ به ترتیب انرژی ذخیره شده، انرژی شارژ و دشارژ، تلفات، ضرایب شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد[۱۴].

## ۷-۲- بارهای الکتریکی

در این مقاله، دو نوع بار الکتریکی در نظر گرفته شده است شامل بارهای قطعی $de^{cri}(t)$ که باید در زمان مشخص تأمین شوند و بارهای کنترل‌پذیر که شامل تقاضای بار الکتریکی بوده که در بازه‌ی زمانی مشخصی می‌توان آن را به تعویق انداخت. برای نشان دادن بارهای کنترل‌پذیر، متغیر $dr(t)$ استفاده شده است که مقدار آن برابر است با مجموع بارهای کنترل‌پذیری که انتقال داده شده و هنوز تأمین نشده‌اند[۱۲].

اگر تا گام زمانی t همه‌ی بارهای کنترل‌پذیر تأمین شده باشند و هیچ باری انتقال داده نشده باشد، مقدار متغیر بارهای کنترل‌پذیر یعنی $dr(t)$ برابر صفر خواهد بود. مقدار بار کنترل‌پذیر $de^{cul}(t)$ در هر گام زمانی به صورت ضریب $\beta$ از تقاضای بار الکتریکی در هر مرحله‌ی زمان $de(t)$ در نظر گرفته می‌شود. روابط (۲۳)، بیان‌گر این مفاهیم است.

$$\begin{aligned} dr(t+1) &= dr(t) - P_e(t) + de(t) \\ de^{cul}(t) &= \beta\, de(t) \\ dr(t) - dr(t-1) &\leq \beta\, de(t) \\ de^{cri}(t) &= (1-\beta)\, de(t) \end{aligned} \quad (۲۳)$$

در روابط (۲۳)، $de(t)$ تقاضای بار الکتریکی مصرف‌کنندگان در هر گام زمانی بوده که مجموع بارهای قطعی و کنترل‌پذیر در سیستم می‌باشد. $P_e(t)$ مقدار انرژی خالصی است که جهت تأمین بار مصرف‌کنندگان به خروجی هاب فرستاده می‌شود[۱۲].

## ۸-۲- تعادل الکتریکی و گرمایی

روابط (۲۴) به ترتیب شرط تعادل انرژی الکتریکی و حرارتی را در خروجی هاب نمایش می‌دهند.

$$\begin{aligned} P_e(t) &= A^{Net}\, \eta_{ee}^{T}\, P_e^{Net}(t) + A^{CHP}\, \eta_{ge}^{CHP}\, P_g^{Net\,CHP}(t) - P_e^{b}(t) \\ P_h(t) &= \eta_{gh}^{B}\, P_g^{Net\,B}(t) + A^{CHP}\, \eta_{gh}^{CHP}\, P_g^{Net\,CHP}(t) - P_h^{b}(t) \end{aligned} \quad (۲۴)$$

رابطه‌ی (۲۵) نیز قید تأمین تقاضای گاز طبیعی هاب را نشان می‌دهد.

$$P_g(t) = P_g^{Net}(t) - P_g^{Net\,CHP}(t) - P_g^{Net\,B}(t) \quad (۲۵)$$

در روابط (۲۴) و (۲۵)، $A^{Net}$، $\eta_{ee}^{T}$، $A^{CHP}$ و $\eta_{ge}^{CHP}$ به ترتیب ضریب دسترسی‌پذیری به شبکه برق، ضریب بهره‌ی ترانسفورماتور، ضریب دسترسی‌پذیری و ضریب بهره‌ی تبدیل گاز به الکتریسیته CHP است. همچنین، $P_e^{Net}(t)$ و $P_g^{Net\,CHP}(t)$ به ترتیب مقدار انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه و میزان گاز ورودی CHP است که هر دو، ورودی هاب محسوب می‌شوند. $P_g(t)$ و $P_g^{Net}(t)$ نیز مقدار تقاضای گاز خروجی هاب و میزان گاز طبیعی خریداری شده از شبکه است[۱۴].

## ۹-۲- محدودیت شبکه و مبدلها

روابط (۲۶)، محدودیت میزان گاز طبیعی و الکتریسیته‌ی خریداری شده از شبکه را مشخص می‌کند[۱۴].

$$\begin{aligned} P_e^{Net\,min}(t) &\leq P_e^{Net}(t) \leq P_e^{Net\,max}(t) \\ P_g^{Net\,min}(t) &\leq P_g^{Net}(t) \leq P_g^{Net\,max}(t) \end{aligned} \quad (۲۶)$$

روابط (۲۷)، نیز محدودیت ورودی مبدل‌ها را مشخص می‌کند[۱۴].

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

$$\eta_{ee}^{T} P_e^{Net}(t) \le P^{T}$$
$$\eta_{gh}^{CHP} P_e^{Net\,CHP}(t) \le P^{CHP}$$
$$\eta_{gh}^{CHP} P_g^{Net\,B}(t) \le P^{B} \quad (۲۷)$$

## ۱۰-۲- مدلسازی فضای حالت

در ادامه کار، مدل‌سازی هاب انرژی به صورت مدل فضای حالت بازنویسی می‌شود. $x(t)$، $\mathrm{u(t)}$ و $\mathrm{d(t)}$ به ترتیب بردارهای حالت، ورودی و اغتشاش شناخته شده‌ی سیستم هستند. $w(t)$ اغتشاش ناشناخته‌ی سیستم بوده که برای مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از خطای پیش‌بینی بار الکتریکی در نظر گرفته شده است و تنها اطلاعات در دسترس آن، درصد تغییرات دامنه است. $A$، $B_u$، $B_d$، $B_w$ و $C$ ماتریس‌های سیستم هستند. $y(t)$ بردار خروجی سیستم بوده که شامل انرژی ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی و بارهای کنترل‌پذیر است[۱۳].

$$x(t+1) = A\,x(t) + B_u\,u(t) + B_d\,d(t) + B_w\,w(t)$$
$$y(t) = C\,x(t)$$
$$x(t+1) = \begin{bmatrix} P_s^e(t+1) \\ P_s^h(t+1) \\ dr(t+1) \end{bmatrix},$$
$$u(t) = \begin{bmatrix} P_e^{Net}(t) \\ P_e(t) \\ P_g^{Net\,CHP}(t) \\ P_g^{Net\,B}(t) \end{bmatrix},$$
$$d(t) = \begin{bmatrix} de(t) \\ P_h(t) \end{bmatrix},$$
$$A = \begin{bmatrix} (1-\alpha_e^{loss}) & 0 & 0 \\ 0 & (1-\alpha_h^{loss}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

## ۱۱-۲- کنترل کننده پیش بین مقاوم

به منظور ارائه‌ی فرمول‌بندی مربوط به این ساختار کنترلی، یک سیستم خطی به صورت رابطه‌ی زیر در نظر گرفته می‌شود[۲۰]:

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k)$$
$$y(k) = Cx(k)$$
$$[A(k)\ \ B(k)] \epsilon \Omega \quad (۲۹)$$

که در آن $u(k)\epsilon R^{n_u}$ ورودی کنترل‌کننده، $x(k)\epsilon R^{n_x}$ نمودار حالت و $y(k)\epsilon R^{n_y}$ خروجی بوده و تحت قیود زیر می‌باشد:

$$\|u(k+i|k)\|_2 \le u_{max} \ \ i.k \ge 0 \quad (۳۰)$$

$$\|y(k+i|k)\|_2 \le y_{max} \ \ i.k \ge 0 \quad (۳۱)$$

تابع هزینه در همه مسائل کنترل پیش‌بین مقاوم معمولا به فرم تابع هزینه تنظیم‌کننده مربعی طبق رابطه‌ی زیر است:

$$J_0^p(k) = \sum_{i=0}^{P} [\|x(k+i|k)\|_Q^2 + \|u(k+i|k)\|_R^2] \quad (۳۲)$$

که در آن $Q \ge 0$ و $R \ge 0$ ماتریس‌های وزن‌دهی متقارن می‌باشد. در روش کنترل پیش‌بین مقاوم، افق پیش‌بین و افق کنترل نامحدود(بینهایت) در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا کنترل پیش‌بین با افق محدود دارای پایداری نامی ضعیفی نسبت به حالت دارای افق نامحدود است. اگر تابع لیاپانوف مربعی به فرم زیر در نظر گرفته شود[۲۰]:

$$V(x) = x^T P x . p > 0 \quad (۲۳)$$

که در آن $x = x(k|k)$، متغیر حالت سیستم است. در هر پله زمانی$k$، فرض کنید $V(x)$ نامساوی زیر را برای تمامی $x(k+i|k)$، $u(k+i|k)$، $[A(k+i)\ \ B(k+i)] \epsilon \Omega$ اقناع می‌کند:

$$V\big(x(i+1|k)\big) - V\big(x(i|k)\big) \le -\|x(k+i|k)\|_Q^2 + \|u(k+i|k)\|_R^2 \quad \forall [A(k+i)\ \ B(k+i)] \epsilon \Omega \ . i \ge 1 \quad (۳۴)$$

لازم به ذکر است که برای برقراری رابطه‌ی فوق در هر پله زمانی، به طور مستقیم به صورت یک رابطه نامساوی ماتریسی خطی درآمده و وارد بخش بهینه‌سازی می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که برای محدود بودن معیار کارایی مقاوم، بایستی $x(\infty|k=0)$ و در نتیجه $V\big(x(\infty|k)\big) = 0$ با جمع کردن طرفین (۳۴) از صفر تا بی‌نهایت:

$$-V\big(x(k|k)\big) \le -J_\infty(k) \quad (۳۵)$$

بنابراین:

$$\big(\max_{[A(k+i)\ \ B(k+i)] \in \Omega} J_\infty(k)\big) \ge V\big(x(k|k)\big) \quad (۳۶)$$

حال با دانستن حد بالای تابع هزینه، هدف کنترلی، کمینه کردن این حد بالا با استفاده از فیدبک حالت است.کمینه کردن حد بالای تابع هزینه، معادل کمینه کردن $\gamma$ در نامساوی زیر است:

$$V\big(x(k|k)\big) = x(k|k)^T P x(k|k) \le \gamma \quad (۳۷)$$

همانند بقیه‌ی روش‌های کنترل پیش‌بین استاندارد، در هر پله زمانی، $F$ و اولین سیگنال کنترلی به فرم $u(k+i|k) = Fx(k+i|k)$ به سیستم اعمال می‌شود[۲۰].

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

## ۳- شبیه سازی و مطالعات موردی

در مطالعات موردی انجام شده، از مفاهیم و اصول ارائه شده در مرجع [۱۵] برای تعیین محل بهینه‌ی عایق در لایه‌های مختلف ساختمان در یک سامانه هاب انرژی استفاده شده، به گونه‌ای که بتوان رفتار حرارتی ساختمان (نه فقط دیواره‌ها) را با احتساب عوامل دیگر نظیر میزان هوای تهویه، آسایش حرارتی افراد و تجهیزات داخلی و انتقال حرارت از جداره‌های نورگذر را در حالت ناپایدار و به تعبیر مهندسی، توسط مدل پویا(دینامیکی) سیستم شبیه‌سازی نمود. مبنای روش، سادگی ریاضی و کارآمد بودن آن از لحاظ محاسباتی است. هوای داخل ساختمان به صورت یک ناحیه فرض شده و برای جداره‌های خارجی ساختمان، مدل سه لایه نظیر مراجع[۱۷،۱۶] در نظر گرفته شده است. معادلات انرژی لازم برای سقف، کف و دیواره‌های خارجی جداگانه نوشته شده است. برای دیواره‌ها و تجهیزات داخلی که از نظر اینرسی حرارتی ساختمان اهمیت دارند، یک معادله و برای منبع تأمین گرما در داخل فضا هم معادله‌ی جداگانه‌ای منظور شده است که این کار موجب کاهش اتلاف انرژی سرمایشی و گرمایشی در ساختمان مورد بررسی خواهد شد.

### ۳-۱- بررسی پاسخ زمانی سامانه ساختمان هوشمند مورد بررسی

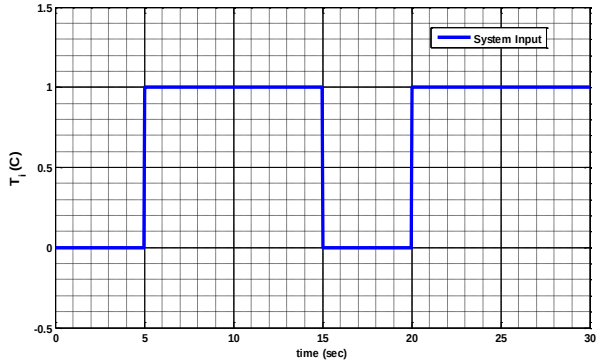
داده‌های مورد نیاز جهت پیاده‌سازی سامانه ساختمان هوشمند مدل شده در این پژوهش، از مراجع[۱۹،۱۸] برداشت شده است. بدین منظور، جهت معرفی قابلیت‌های مدل ریاضی و برنامه‌ی کامپیوتری تهیه شده، شبیه‌سازی رفتار حرارتی یک اتاق از ساختمان هوشمند مورد آزمون به مساحت ۴×۳ مترمربع و ارتفاع ۳ متر در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب(Matlab) انجام شده است. شکل شماتیک این سیستم به صورت بلوک دیاگرام در شکل (۲) نشان داده شده است.




شکل(۲): پیاده‌سازی مدل سامانه ساختمان هوشمند در سیمولینک نرم‌افزار متلب به صورت حلقه باز

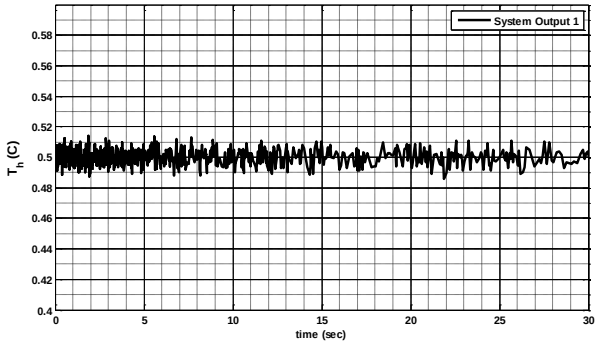
در حالتی که ساختمان از نظر حرارتی در حالت ماندگار* قرار دارد، موقعیت قرارگیری عایق در لایه‌های مختلف دیوار، سقف یا کف از این نظر که عایق در لایه‌ی خارجی، لایه‌ی میانی و یا لایه‌ی داخلی کار گذاشته شود، تفاوتی ندارد زیرا این مسأله ضریب کلی انتقال حرارت دیوار را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. اما در حالت‌هایی که انتقال حرارت در ساختمان به صورت گذرا است، مانند زمان راه‌اندازی سیستم و یا ساختمان‌هایی که در آن‌ها استفاده‌ی مداوم وجود نداشته و سیستم گرمایشی به صورت منقطع کار می‌کند، موقعیت قرارگیری عایق در دیوار، زمان‌های لازم جهت گرم شدن اولیه و نیز زمان کاهش دمای سیستم را در حالتی که گرمایش از کار می‌افتد، تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در محاسبات انجام‌شده، سه لایه دیوار شامل یک لایه آجر به ضخامت ۲۳ سانتی‌متر، یک لایه پوشش گچی به ضخامت ۳ سانتی‌متر و یک لایه عایق به ضخامت ۵ سانتی‌متر و از نوع اسفنج پلی‌اتیلن که دارای ضریب هدایت حرارتی $0.04\ \frac{W}{m\times ℃}$ و برای مناطق مرطوب مناسب می‌باشد، در نظر گرفته شده است. به منظور مشاهده‌ی چگونگی تغییر رفتار متغیرهای خروجی سیستم، لازم است که سیگنال ورودی به سیستم اعمال شود. ورودی دلخواه در نظر گرفته شده در این مطالعه، در شکل (۳) نشان داده شده است.




شکل(۳): سیگنال ورودی اعمال شده به سیستم در حالت حلقه باز

در ادامه، متغیرهای خروجی حاصل از اعمال ورودی تعریف شده در شکل(۳) به سیستم ساختمان هوشمند مورد مطالعه به نمایش درآمده است.




شکل(۴): متغیر خروجی دمای سطح منبع گرمایی در سامانه ساختمان هوشمند برای استراتژی حلقه باز

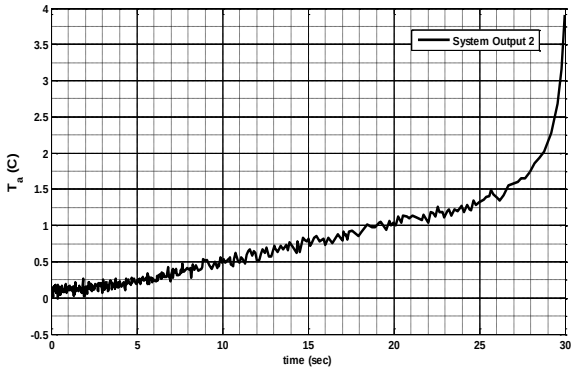
با دقت در شکل‌های (۴) تا (۶) مشاهده می‌شود که متغیرهای خروجی مدل ساختمان هوشمند ارائه شده در این پژوهش، در اثر تحریک ورودی دلخواه، با حالت نوسانی شدیدی تغییر می‌کنند. یکی دیگر از ویژگی‌های نمودارهای به دست آمده، غیرقابل کنترل بودن آنهاست؛ بدین معنی که اگر هدف، دست‌یابی متغیرهای خروجی سیستم به یک مقدار مرجع مطلوب و از پیش تعیین شده باشد،

* Steady-state heat in the building

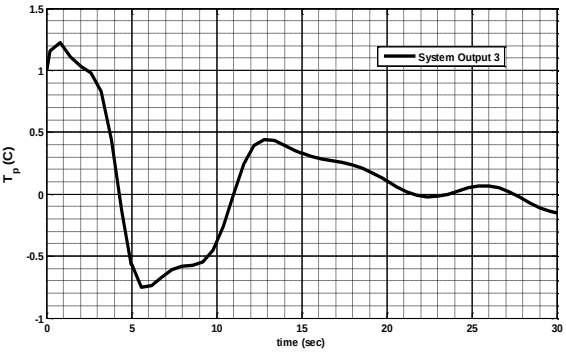
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

خروجی‌های به دست آمده در استراتژی حلقه باز قادر به ردیابی آن نخواهند بود.

بنابر این ساختار حلقه باز قادر به پایدارسازی هوشمند و خودکار متغیرهای دمایی در ساختمان هوشمند مدل شده در این مطالعه نبوده و لازم است که ساختار حلقه بسته برای کنترل سیستم لحاظ شود. در ساختار حلقه بسته، مقادیر خروجی‌های سیستم به صورت دائمی و به کمک سنسورهای مربوطه رصد شده و گزارش می‌شود. مقادیر گزارش شده با ورودی‌های مطلوب (که توسط طراح تعیین می‌شود) مقایسه شده و سیگنالی تحت عنوان سیگنال خطا تولید شده و وارد بلوک کنترل‌کننده می‌شود. کنترل‌کننده نیز بر اساس مقدار خطای ورودی تصمیم می‌گیرد که چه سیگنالی به محرک اعمال کرده که خطای موجود جبران شود و به همین صورت این فرآیند ادامه می‌یابد.




شکل(۵): متغیر خروجی دمای هوای داخل اتاق در سامانه ساختمان هوشمند برای استراتژی حلقه باز




شکل (۶):متغیر خروجی دمای سطح تجهیزات دارای اینرسی حرارتی در سامانه ساختمان هوشمند برای استراتژی حلقه باز

## ۲-۳- طراحی کنترل کننده پیش بینی مقاوم مبتنی بر تابع لیاپانوف

کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم مبتنی بر لیاپانوف[۱۰] (LMPC) یک روش کنترلی بوده که مبتنی بر مفاهیم افق کاهنده از کنترل پیش‌بین و تابع لیاپانوف است. با توجه به اینکه یکی از ضعف‌های کنترل پیش‌بین عدم تضمین پایداری در سیستم‌های غیرخطی است، بنابراین به کار بردن تابع لیاپانوف در ساختار این کنترل‌کننده می‌تواند ضمن مقابله با این پدیده، عملکرد کنترل‌کننده را مقاوم سازد. در ادامه مقاله مراحل طراحی کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر روش لیاپانوف برای سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی مدل شده در این پژوهش آمده است.

اولین گام برای طراحی کنترل پیش‌بین مبتنی بر لیاپانوف، انتخاب تابع هزینه‌ی مناسب است. برای این کار، منابع زیادی بررسی شد و در نهایت با توجه به دینامیک سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی، تابع هزینه‌ی ارائه شده در مرجع[31] انتخاب گردید. ساختار این تابع به صورت رابطه‌ی زیر است:

$$J = \int_{t_k}^{t_k+N_p} [\tilde{x}(\tau)^T Q_c \tilde{x}(\tau) + u_k(\tau)^T R_c u_k(\tau)]d\tau \quad (۳۸)$$

که در آن، $\tilde{x}(\tau)$ متغیرهای حالت پیش‌بینی شده‌ی سیستم، $N_p$ افق پیش‌بینی و $Q_c$ و $R_c$ ماتریس‌های وزنی تعیین‌کننده‌ی هزینه می‌باشند. هدف استراتژی کنترلی در این پژوهش، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_k^*(t) = \min_{u_k \epsilon\, S(N_c)} J \quad (۳۹)$$

با توجه به رابطه‌ی (۳۹)، هدف یافتن یک قانون کنترل به صورت $u_k^*(t)$ بوده که بتواند تابع هزینه‌ی تعریف شده در $J$ را کمینه کند. در این رابطه، $N_c$ افق کنترل و $S$ خانواده‌ای از توابع ثابت تکه‌ای پیوسته با دوره‌ی نمونه‌برداری $N_c$ است.

### ۱-۲-۳- ارائه تابع لیاپانوف جهت تضمین پایداری

مرحله‌ی نخست جهت حل مسأله‌ی بهینه‌سازی (۳۹)، تشکیل سیستم حلقه بسته‌ی زیر است:

$$\dot{\hat{x}}(t) = f\left(\hat{x}(t), h\left(\hat{x}(t)\right)\right) \quad (۴۰)$$

در رابطه‌ی (۴۰)، $\hat{x}(t)$ متغیرهای حالت به دست آمده از مدل غیرخطی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی و $u = h\left(\hat{x}(t)\right)$ قانون کنترل فیدبک بوده که به کمک تابع لیاپانوف محاسبه می‌شود. هدف از به کار بردن تابع لیاپانوف در ساختار کنترل پیش‌بین غیرخطی طراحی شده در این پژوهش، تضمین پایداری سیستم هاب انرژی است. بدین منظور پس از بررسی منابع مختلف، تابع لیاپانوف معرفی شده در مرجع[۲۰] انتخاب گردید. این تابع مربعی بوده و ساختار آن به صورت زیر است:

$$V(x) = X^T P X \quad (۴۱)$$

بردار $X$ در ساختار تابع لیاپانوف، حاصل اختلاف متغیرهای حالت سیستم با مقدار حالت پایدار این مقادیر بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

$$X = [T_h - T_h^s \quad T_a - T_a^s \quad T_p - T_p^s] \tag{۴۲}$$

همچنین، ماتریس $P$ در ساختار تابع لیاپانوف، یک ماتریس معین مثبت بوده که از حل معادله‌ی ریکاتی زیر به دست می‌آید:

$$A^T P\, A - P - A^T P\, B\, (B^T P\, B + R)^{-1} B^T P\, A + Q = 0 \tag{۴۳}$$

که در آن $A$ و B ماتریس‌های سیستمی مدل خطی شده‌ی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی و $Q$ و $R$ ماتریس‌های وزنی موجود در ساختار تابع هزینه است. پس از تعیین تابع لیاپانوف، جهت تشکیل سیستم حلقه بسته‌ی (۴۰)، لازم است که سیگنال کنترلی $u = h(\hat{x}(t))$ محاسبه شود که در ادامه بیان شده است:

$$h(x) = \begin{cases} -\dfrac{L_f V + \sqrt{(L_f V)^2 + (L_g V)^4}}{L_g V} & if\ L_g V \neq 0 \\ 0 & if\ L_g V = 0 \end{cases} \tag{۴۴}$$

که در آن، $f$ و g توابع غیرخطی تشکیل دهنده‌ی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی بوده و عملگر $L$ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_f V = \frac{\partial V(x)}{\partial x} f$$
$$L_g V = \frac{\partial V(x)}{\partial x} g \tag{۴۵}$$

در نتیجه، سیستم حلقه بسته‌ی ارائه شده در رابطه‌ی (۴۰) به کمک داده‌های به دست آمده از مدل غیرخطی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی به‌دست می‌آید.

### ۲-۲-۳- پیش بینی متغیرهای حالت آینده سیستم به کمک سامانه حلقه بسته مبتنی بر تابع لیاپانوف

پس از ایجاد سیستم حلقه بسته‌ی مبتنی بر تابع لیاپانوف، در مرحله‌ی بعد، بردار متغیرهای حالت آینده‌ی سیستم که طول آن برابر با افق پیش‌بینی (Np) است، جهت ایجاد سیگنال کنترلی پیش‌بین تعیین می‌شود. برای این منظور، سیستم حلقه بسته‌ی مرحله‌ی قبل که یک مدل ریاضی شامل معادلات دیفرانسیل غیرخطی است را به صورت عددی حل کرده و نتایج به دست آمده، طبق رابطه‌ی زیر، متغیرهای حالت پیش‌بینی شده‌ی آینده‌ی سیستم را تشکیل می‌دهد.

$$\tilde{x}(t_k) = \hat{x}(t_k) \tag{۴۶}$$

$\tilde{x}(t_k)$ متغیرهای حالت پیش‌بینی شده‌ی آینده سیستم است.

### ۳-۲-۳- بررسی پایداری سیستم با ایجاد قید روی تابع لیاپانوف

به منظور اطمینان از پایداری روش کنترلی پیشنهادی، تابع لیاپانوف حاصل از متغیرهای حالت $\hat{x}(t)$ و $\tilde{x}(t)$ را به دست آورده و در نامساوی زیر جایگذاری می‌شود:

$$V(\tilde{x}) \leq V(\hat{x}) \tag{۴۷}$$

قید (۴۷) بیان‌گر این واقعیت است که جهت تضمین پایداری سیستم به کمک کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر لیاپانوف پیشنهادی در این مطالعه، لازم است که تابع لیاپانوف حاصل از متغیرهای حالت پیش‌بینی شده‌ی سیستم همواره کوچکتر و یا مساوی با تابع لیاپانوف حاصل از متغیرهای به دست آمده از مدل سیستم باشد.

### ۴-۲-۳- تشکیل سیستم حلقه بسته‌ی نهایی به کمک کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مبتنی بر لیاپانوف

در این مرحله، ابتدا با استفاده از متغیرهای حالت پیش‌بینی شده به کمک تابع لیاپانوف، تابع هزینه‌ی تعریف شده در رابطه‌ی J کمینه شده و سیگنال‌های کنترلی $u_k^*(t)$ تعیین می‌شوند. سیگنال کنترلی به دست آمده همان قانون کنترل پیش‌بین مبتنی بر لیاپانوف است. به منظور تعیین قانون کنترل بهینه‌ی پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر لیاپانوف، ماتریس هامیلتونین طبق رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود.

$$H(x,u,\lambda) = (\tilde{x}^T\, Q_c\, \tilde{x} + u_k{}^T\, R_c\, u_k) + \lambda^T(Ax + Bu) \tag{۴۸}$$

که در آن، $\lambda$ ضریب لاگرانژ است. رابطه‌ی (۴۹) نیز از اعمال اصل بیشینگی پونتریاگین بر روی تابع هامیلتونین به دست می‌آید.

$$0 = \frac{\partial H}{\partial u} = R_c\, u_k + B^T \lambda \tag{۴۹}$$

از رابطه‌ی (۴۹)، قانون کنترل پیش‌بین مبتنی بر لیاپانوف به شکل رابطه‌ی (۵۰) ارائه می‌شود.

$$u_{LNMPC} = -R_c{}^{-1}(t)\, B^T(t)\, \lambda \tag{۵۰}$$

با استفاده از تئوری LQR، ضریب لاگرانژ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda = P(t) \tag{۵۱}$$

که در آن، ماتریس P همان ماتریس به دست آمده از حل معادله‌ی ریکاتی در رابطه‌ی (۴۳) است. بنابراین:

$$u_k^*(t) = u_{LNMPC} = -R^{-1}(t)\, B^T(t)\, P(t)\, x \tag{۵۲}$$

سپس به کمک این قانون کنترلی و متغیرهای حالت سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی، سیستم حلقه بسته‌ی نهایی طبق رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود.

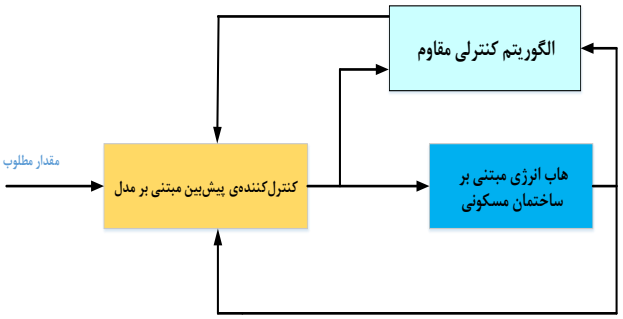
$$\dot{\tilde{X}}(t) = f\left(\tilde{X}(t), u_k^*(t)\right) \tag{۵۳}$$

در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم کنترلی پیش‌بین غیرخطی مبتنی بر لیاپانوف معرفی شده در سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی هوشمند، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

## ۳-۳- نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم بر روی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی

به منظور پیاده‌سازی استراتژی ترکیبی پیش‌بین مقاوم در نرم‌افزار متلب ابتدا ارتباط این استراتژی‌های کنترلی و نحوه‌ی اعمال آن‌ها بر روی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی در قالب یک بلوک دیاگرام در شکل زیر نشان داده است.

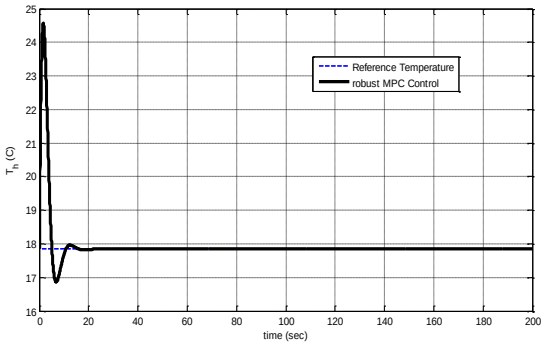



شکل(۷): بلوک دیاگرام حلقه بسته‌ی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی تحت کنترل پیش‌بین مقاوم

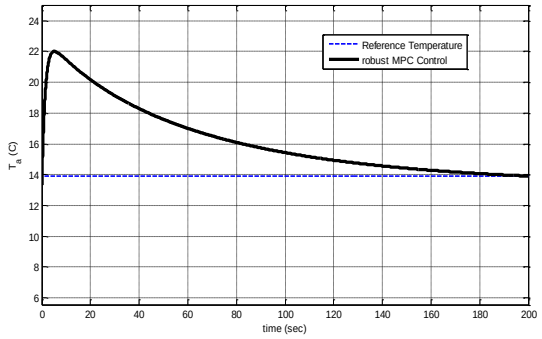
الگوریتم کنترلی مقاوم یک روش کنترلی است که به منظور مقابله با عدم‌قطعیت‌های موجود در بخش‌های مختلف سیستم هاب انرژی مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته است. در این مقاله، با استفاده از روش کنترل‌کننده پیش‌بینی مبتنی بر کنترل مقاوم، سیستم هاب انرژی به گونه‌ای کنترل می‌گردد که در مواجهه با عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاشات شناخته شده و ناشناخته‌ی سیستم مقاوم باشد.

طراحی قانون کنترل پیش‌بین مقاوم برای پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد هاب انرژی در این مقاله پیاده‌سازی شده است و منجر به بهبود عملکرد پایداری سیستم با حضور عدم‌قطعیت‌ها و اغتشاشات می‌گردد. برای طراحی آن، ابتدا یک تابع هزینه مناسب با توجه به دینامیک‌های سیستم هاب انرژی و محدودیت‌های آن در نظر گرفته می‌شود و هدف یافتن قانون کنترلی است تا تابع هزینه را کمینه نماید. در این مقاله برای تعیین قانون کنترل پیش‌بین مقاوم، از ماتریس هامیلتونین استفاده شده است و پس از محاسبه ضریب لاگرانژ، سیگنال کنترلی به دست می‌آید.

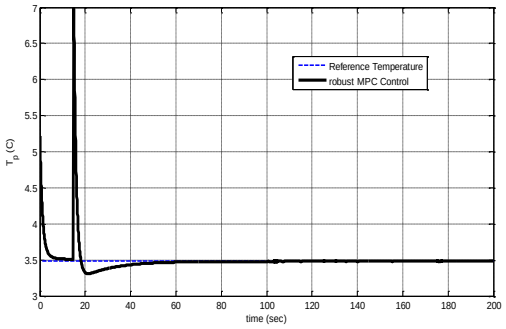
پس از طراحی قانون کنترل پیش‌بین مقاوم، سیگنال کنترلی به دست آمده از این روش بر روی مدل غیرخطی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی مدل شده در این پژوهش اعمال شده و نتایج به دست آمده به ازای اعمال ورودی‌های مرجع ثابت نشان داده شده است، در شبیه‌سازی حالت اول برای شرایط جوی، دمای ۴۵ درجه سانتیگراد و شدت تابش ۵۰۰ وات بر مترمربع فرض شده است.




شکل(۸): متغیر خروجی دمای سطح منبع گرمایی با اعمال کنترل‌کننده‌ی ترکیبی پیش‌بین مقاوم(حالت اول)



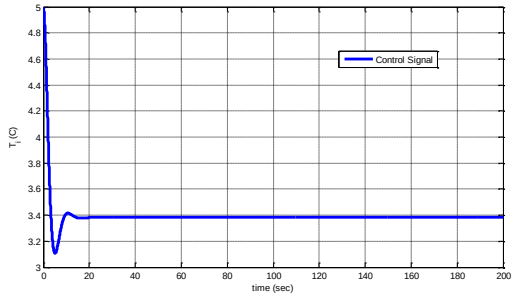

شکل(۹): متغیر خروجی دمای هوای داخل اتاق با اعمال کنترل‌کننده‌ی ترکیبی پیش‌بین مقاوم(حالت اول)




شکل(۱۰): متغیر خروجی دمای سطح تجهیزات دارای اینرسی حرارتی در ساختمان با اعمال کنترل‌کننده‌ی ترکیبی پیش‌بین مقاوم(حالت اول)

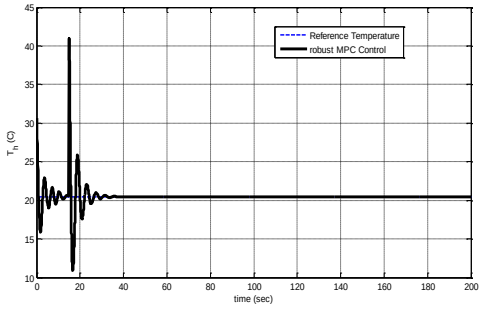
با دقت در شکل(۸)**شکل** تا شکل(۱۰) مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌ی ترکیبی و مقاوم طراحی شده توانسته متغیرهای خروجی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی مدل شده را در زمان مناسبی به مقدار مرجع همگرا کند. البته در مورد متغیر خروجی دمای هوای داخل اتاق، پارامتر زمان نشست اندکی زیاد بوده که مطلوب نمی‌باشد. در ادامه، وضعیت سیگنال کنترلی اعمال شده از طرف کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم برای استراتژی پایدارسازی مورد بحث، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

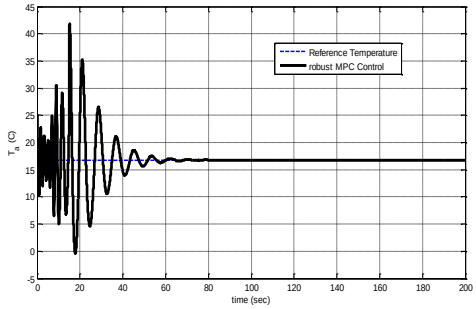



شکل(۱۱): سیگنال کنترل پیش‌بین مقاوم برای سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی(حالت اول)

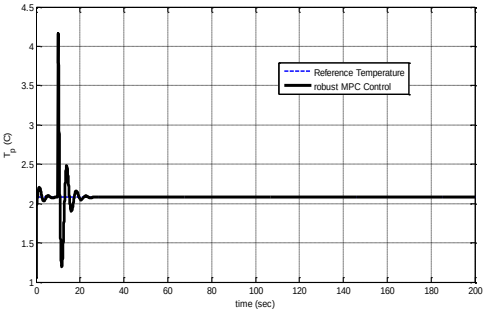
در ادامه کار و در حالت دوم، پیاده‌سازی استراتژی کنترلی پیش‌بین مقاوم بر روی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی برای شرایط جوی دمای صفر درجه سانتیگراد و شدت تابش ۸۰ وات بر مترمربع شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده برای ورودی مرجع ثابت در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نشان داده شده است.



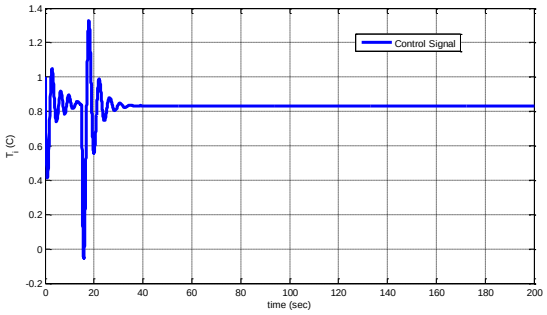

شکل(۱۲): متغیر خروجی دمای سطح منبع گرمایی با اعمال کنترل‌کننده‌ی ترکیبی پیش‌بین مقاوم(حالت دوم)




شکل(۱۳): متغیر خروجی دمای هوای داخل اتاق با اعمال کنترل‌کننده‌ی ترکیبی پیش‌بین مقاوم(حالت دوم)




شکل(۱۴): متغیر خروجی دمای سطح تجهیزات دارای اینرسی حرارتی در ساختمان با اعمال کنترل‌کننده‌ی ترکیبی پیش‌بین مقاوم(حالت دوم)

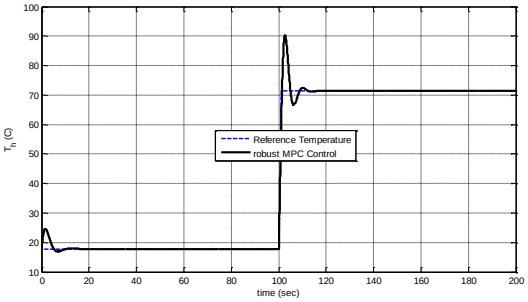



شکل(۱۵): سیگنال کنترل پیش‌بین مقاوم برای سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی(حالت دوم)

## ۴-۳- نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده‌ی هوشمند پیش‌بین مقاوم بر روی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی برای ورودی مرجع متغیر

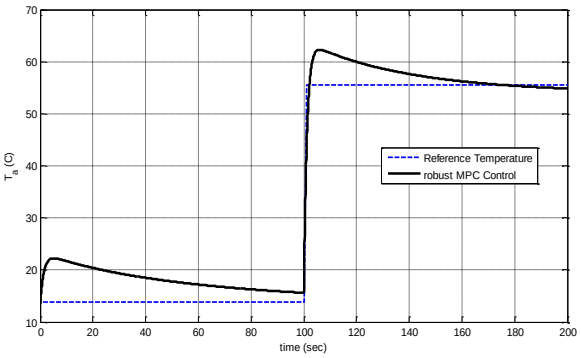
به منظور بررسی صحت عملکرد قانون کنترل مقاوم و ترکیبی طراحی شده، نتایج حاصل از پیاده‌سازی این استراتژی بر روی سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی مدل شده به ازای ورودی‌های مرجع متغیر نیز به دست آمده و در قالب شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده در شکل (۱۶) تا شکل (۱۸) عملکرد کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم را برای سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی مدل شده در این پژوهش و به ازای اعمال ورودی‌های مرجع متغیر نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عملکرد کنترل‌کننده‌ی طراحی شده بسیار مطلوب بوده و خروجی‌ها توانسته‌اند در زمان محدودی پایدار شوند. در شکل (۱۹)، وضعیت سیگنال کنترلی اعمال شده از طرف استراتژی کنترل ترکیبی طراحی شده نشان داده شده است.

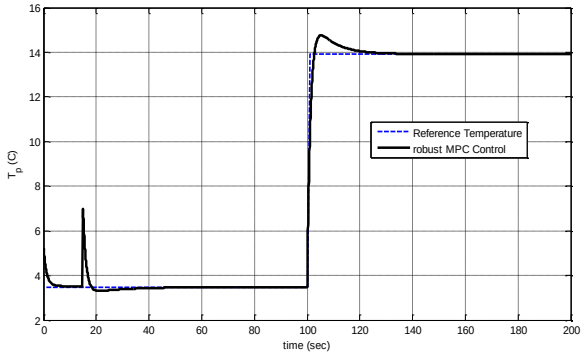



شکل(۱۶): دمای سطح منبع گرمایی در سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی با اعمال کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم برای ورودی مرجع متغیر

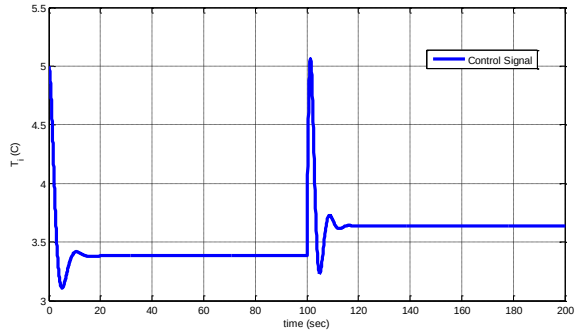
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]




شکل(۱۷): نمودار دمای هوای داخل اتاق در سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی با اعمال کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم




شکل(۱۸): نمودار دمای سطح تجهیزات دارای اینرسی حرارتی در سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی با اعمال کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم




شکل(۱۹): سیگنال کنترل پیش‌بین مقاوم برای سامانه ساختمان هوشمند با ورودی مرجع متغیر

با دقت در نتایج به دست آمده برای استراتژی کنترلی ترکیبی پیش‌بین مقاوم می‌توان گفت که این کنترل‌کننده در مورد سیستم هاب انرژی مبتنی بر ساختمان مسکونی مدل شده در این پژوهش بسیار خوب و مطلوب عمل کرده و توانسته به طور تقریبی تمام خواسته‌های طراح را از کنترل‌کننده برآورده سازد.

## ۴- نتیجه گیری

هدف کلی این مقاله، بررسی برخی پیشرفت‌های جدید در زمینه‌ی سامانه‌های هاب انرژی و نحوه کنترل بهینه آن است. برای این منظور، ابتدا مبانی نظری مربوط به این سامانه‌ها همراه با فرمول‌بندی ریاضی لازم جهت مدل‌سازی ارائه گردید. پس از آشنایی با مفاهیم نظری و ادبیات تحقیق، پیشینه موضوع و نمونه منابع پژوهشی مرتبط با موضوع کار، بررسی گردید که حاصل این بررسی، تحلیلی جامع برای چند نمونه کار جدید انجام گرفته در این حوزه‌ی پژوهشی بود. با استفاده از پژوهش‌های قبلی، یک نمونه معماری برای ریزشبکه‌ی انرژی مبتنی بر سامانه هاب و همچنین ساختار هاب انرژی فرعی پیشنهادی در نظر گرفته شد. علاوه بر این، مدل‌های جریان انرژی در هر هاب انرژی فرمول‌بندی گردید که می‌تواند به طور شهودی وضعیت جریان انرژی MEG را منعکس کند. همچنین، مدل بهره‌برداری بهینه برای MEG به منظور کمینه‌سازی هزینه عملیات روزانه پیشنهاد می‌شود.

در بخش اصلی کار یعنی طراحی کنترل‌کننده، هدف کلی مقایسه‌ی روش کنترل پیش‌بین معمولی و روش پیش‌بین غیرخطی مقاوم با هدف ارائه‌ی راهکاری دقیق جهت مقابله با اغتشاش و عدم قطعیت در سیستم‌های صنعتی است. برای این منظور، ابتدا مبانی نظری مربوط به کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مقاوم همراه با معادلات ریاضی آن بیان گردید. شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته در این پژوهش به دو قسمت مجزا تبدیل شد. در قسمت اول، تجزیه و تحلیل رفتار مدل و در قسمت دوم، پیاده‌سازی کنترل‌کننده انجام گردید. برای این کار، ابتدا یک مدل جدید و معتبر از یک نمونه سیستم هاب انرژی انتخاب گردید. پس از آن، یک روند کنترلی با استراتژی پیش‌بین غیرخطی مقاوم پیاده شد. نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار متلب گویای این واقعیت است که روش پیش‌بین غیرخطی مقاوم توانسته ضعف‌های روش کنترل پیش‌بین معمولی در مقابله با اغتشاش‌های ورودی به سیستم را به‌خوبی پوشش داده و با کمترین فراجهش ممکن، متغیرهای خروجی سیستم هاب انرژی را پایدار نماید.

## مراجع


[1] Z. Zhao, P.Yang, Z.Xu, T.C.Green, N.Bottrell, "Control strategy of energy storage system for frequency support of autonomous microgrid", Electrical Machines and Systems (ICEMS), 18th International Conference, pp. 422–426, 2015.

[2] A.Sharif, A.Almansoori, M.Fowler, A.Elkamel, K.Alrafea, "Design of an energy hub based on natural gas and renewable energy sources", Int. J. Energy Res, vol. 38, No. 3, pp. 363–373, 2014.

[3] P.D. Lund, J.Lindgren, J.Mikkola, J.Salpakari, "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity" Renew& Sustainable Energy Review, vol. 45, pp. 785–807, 2015.

[4] J.A.Rossiter, "Model-based predictive control: a practical approach", CRC press, 2013.

[5] S.J.Qin, T.A.Badgwell,"A survey of industrial model predictive control technology", Control Eng. Pract, vol. 11, No. 7, pp. 733–764, 2003.

[6] Z.Hashemi, A.Ramezani, M.P.Moghaddam, "Energy hub management by using decentralized robust model predictive control", 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), pp. 105–110, 2016.


[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[7] C.E.Garcia and A.M.Morshedi, "Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC)", Chem. Eng. Commun., vol. 46, No. 1–3, pp. 73–87, 1986.
[8] J.Richalet, A.Rault, J.L.Testud, J.Papon, "Algorithmic control of industrial processes", Proceedings of the 4th IFAC symposium on identification and system parameter estimation, pp. 1119–1167, 1976.
[9] J.Richalet, A.Rault, J.L.Testud, J.Papon, "Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes", Automatica, vol. 14, No. 5, pp. 413–428, 1978.
[10] L.Cong, X.Liu, Y.Zhou, Y.Sun, "Generalized generic model control of high-purity internal thermally coupled distillation column based on nonlinear wave theory", AIChE J., vol. 59, No. 11, pp. 4133–4141, 2013.
[11] D.W. Clarke, C.Mohtadi, and P.S.Tuffs, "Generalized predictive control ø e Part I. The basic algorithm, Part II. Extensions and interpretations", Automatica, pp. 23–2, 1987.
[12] O.Dzobo and X.Xia, "Optimal operation of smart multi-energy hub systems incorporating energy hub coordination and demand response strategy", J. Renew. Sustain. Energy, vol. 9, No. 4, p. 450-501, 2017.
[13] J.Bollenbacher, B. Rhein, "Optimal configuration and control strategy in a multi-carrier-energy system using reinforcement learning methods", Energy and Sustainability Conference (IESC), pp. 1–6, 2017.
[14] S.Pazouki, M.R.Haghifam, and A.Moser, "Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 61, pp. 335–345, 2014.
[15] M.K.Sevindir, H.Demir, Ö.Ağra, Ş.Ö.Atayılmaz, İ.Teke, "Modelling the optimum distribution of insulation material", Renew. Energy, vol. 113, pp. 74–84, 2017.
[16] T.Law, "The Rain Tower", The Future of Thermal Comfort in an Energy-Constrained World, Springer, pp. 135–162, 2013.
[17] T.Law, "Personal Air-Conditioning", The Future of Thermal Comfort in an Energy-Constrained World, Springer, pp. 185–209, 2013.
[18] S.M.Bambrook, A.B.Sproul, D.Jacob, "Design optimisation for a low energy home in Sydney", Energy Build., vol. 43, No. 7, pp. 1702–1711, 2011.
[19] S.Yigit, B.Ozorhon, "A simulation-based optimization method for designing energy efficient buildings", Energy Build., vol. 178, pp. 216–227, 2018.
[20] M. Mahmood, P. Mhaskar, "Lyapaunov-based model predictive control of stochastic nonlinear systems", Automatica, vol. 48, No. 9, pp. 2271-2276, 2012.

## رزومه



**میثم احمدی منفرد** در قم متولد شده است(۱۳۶۱). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق-الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک(۱۳۸۵) و کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره)شهرری(۱۳۹۸) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه هاب انرژی و بهینه سازی مصرف انرژی بوده و هم اکنون مسئول نگهداری و تعمیرات نیروگاه برق و دستگاه‌های پخش و پالایش در پالایشگاه نفت شهید تندگویان تهران می باشد.



**محمد تبریزیان** در سال ۱۳۴۹ متولد شده است، تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۷۱)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد(۱۳۷۷) و دکترای مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس(۱۳۸۹) سپری کرده است، فعالیت پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده و بازار برق، برنامه‌ریزی و مدیریت و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی، مهندسی انرژی و مدیریت انرژی است و در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) شهرری می‌باشد، از نامبرده تاکنون حدود پنجاه مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی منتشر شده است.



**الهه مرادی** تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی(۱۳۸۲)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب(۱۳۸۵) و دکتری مهندسی برق-کنترل از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران(۱۳۹۶) سپری کرده است. فعالیتهای پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه کنترل مقاوم، سیستمهای تاخیردار، کنترل بهینه، سیستمهای سوئیچ شونده، شناسایی خطا و هوش مصنوعی شامل ماشین لرنینگ و دیپ لرنینگ است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره) شهرری می باشد.



**حمیدرضا شاهمیرزاد** در تهران متولد شده است(۱۳۶۴). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندس برق-الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد(۱۳۸۹)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام(ره)(۱۳۹۸) سپری کرده است. علاقه‌مندی و فعالیت‌های ایشان در زمینه‌های بهینه‌سازی و مدیریت انرژی، بازار برق، اینترنت اشیاء، طراحی و تامین و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع و تاسیسات الکتریکی پلنتهای صنعتی، بومی‌سازی تجهیزات خاص الکتریکی صنایع مادر تخصصی است و در حال حاضر مهندس برق شرکت بین المللی مهندسی ایران(ایریتک) از زیرمجموعه های سازمان توسعه و نوسازی

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

معادن و صنایع معدنی ایران(ایمیدرو) می‌باشد. از نامبرده تاکنون حدود سی مقاله علمی در مجلات و کنفرانسهای معتبر داخلی منتشر شده است.

## زیرنویس‌ها

[1] Model Predictive Control
[2] Receding Horizon Control
[3] Identification and Command
[4] Model Algorithmic Control
[5] Dynamic Matrix Control
[6] Quadratic Dynamic Matrix Control
[7] Generalized Predictive Control
[8] Controlled Auto Regressive Moving Average
[9] Auto Regressive Moving Average with Exogenous Input
[10] Lyapunov-based Model Predictive Control

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

# Investigate the optimal performance of an energy hub using a predictive controller based on robust control

**Meysam Ahmadimonfared[1], Mohamad Tabrizian[*2], Elahe Moradi[3], Hamidreza Shahmirzad[4]**

1- Shahid Tandgovian oil refinery, Tehran, Iran
2*- Department of electrical engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, mm_tabrizian@yahoo.com
3- Department of electrical engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
4- Department of electrical engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract: The issue of energy supply on the one hand and the environmental problems caused by the consumption of fossil fuels, on the other hand, have prompted researchers to turn to methods of reducing energy consumption as well as the use of renewable energy sources and hybrid vehicles. The time of several distributed generation units is optimal, but due to the uncertainties in phenomena such as solar radiation, to more accurately predict how the microgrid and its devices will work in the future to make appropriate decisions, a mechanism for processing and managing relevant data is. The answer to all these questions requires familiarity with a new concept called the "energy hub". Due to the wide scope of control of energy hub systems, in this article, while examining the definitions and concepts related to these systems, we have tried to design the control system so that the system is resistant to uncertainty and perturbation. The proposed method uses nonlinear predictive controllers. It is durable. Case study and simulation results in MATLAB software show well that the output variables of the modelled energy hub system have been able to be stable at a suitable time after input.

**Keywords:** Energy Management, Energy Hub, Predictive Controller, Nonlinear Control, Robust Control

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024