

# بهره‌برداری بهینه هاب انرژی با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

زهرا هاشمی، امین رضانی و محسن پارسامقدم

می‌توانند جایگزین یکدیگر شوند، درجه خاصی از آزادی را در تأمین بار موجب می‌شود [۴]. ذخیره‌سازی حامل‌های انرژی نیز بهره‌برداری سامانه هاب انرژی را در بعد زمانی منعطف نموده است [۵]. هاب انرژی می‌تواند در بازه‌های زمانی مختلف و بر اساس معیارهای بهینه‌سازی متفاوت حامل‌های انرژی را جایگزین کند. معیار بهینه‌سازی سیستم چندگانه انرژی علاوه بر دیدگاه‌های اقتصادی، کاهش تولید آلاینده‌ها و افزایش قابلیت اطمینان نیز می‌تواند در نظر گرفته شود [۶].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متفاوتی روی مدل‌سازی ریاضی هاب‌های انرژی همراه با بهینه‌سازی آرایش اجزا، جریان توان و برنامه‌ریزی بهره‌برداری آنها صورت گرفته است [۲]. برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری هاب انرژی معمولاً با در نظر گرفتن چارچوب قطعی داده‌های بار، قیمت و محدودیت‌ها، تابع هزینه کلی سیستم حداقل می‌شود [۷] و [۸]. در [۹] برنامه‌ریزی بهره‌برداری و بهینه‌سازی آرایش اجزای یک هاب انرژی تجاری بدون برنامه پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن تابع هزینه زیست‌محیطی و قابلیت اطمینان در چارچوب قطعی بار و قیمت صورت گرفته است [۱۰]. اتصال خودرو به شبکه به عنوان ذخیره‌ساز برای جبران خطای پیش‌بینی توان تولیدی توربین بادی با استفاده از روش کنترل پیش‌بین به کار گرفته شده است. مرجع [۱۱] برنامه پاسخ‌گویی بار را در مدل‌سازی شبکه سیستم چندحامله به عنوان بازیگری فعال گنجانده است. همچنین تأثیر مدیریت بار حرارتی روی رفتار هاب انرژی خانگی که توسط پمپ‌های حرارتی و سیستم‌های تولید هم‌زمان تأمین می‌شود، با در نظر گرفتن توابع هزینه زیست‌محیطی و اقتصادی در چارچوب قطعی بار و قیمت مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۲] عدم قطعیت قیمت با استفاده از سناریو مونت کارلو در مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسأله علاوه بر این که نقطه بهینه ضمن حل آن به دست نمی‌آید بار محاسباتی بالایی نیز به وجود می‌آید. هاب انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری ضرایب بازده مبدل‌ها بدون برنامه پاسخ‌گویی بار و منابع تجدیدپذیر با پروفایل قطعی بار و قیمت با روش کنترل مقاوم برنامه‌ریزی شده است [۱۳]. از آخرین پژوهش‌های در حوزه کنترل که مسأله کنترل هاب‌های انرژی در ساعات مختلف بهره‌برداری با هدف بهینگی اقتصادی با استفاده از روش کنترل پیش‌بین انجام گرفته می‌توان به [۱] و [۱۴] اشاره کرد. در این مقالات مسأله بهره‌برداری بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار حل شده است. هر چند روش‌های مختلفی برای مسأله بهره‌برداری سیستم‌های انرژی چندحامله در مقالات ارائه شده اما همچنان طراحی یک روش کنترلی مناسب برای بهره‌برداری این سیستم‌ها به علت داشتن ساختار دینامیکی سیستم و به لحاظ داشتن عدم قطعیت‌های ناشی از پیش‌بینی پروفایل‌های بار و قیمت همچنان مورد بررسی است.

در این مقاله رویکردی کنترلی برای مدل‌سازی و بهره‌برداری هاب انرژی پیشنهاد می‌شود. ابتدا مدل‌سازی فضای حالت سامانه با در نظر

چکیده: مفهوم سامانه هاب انرژی به عنوان مدلی برای مطالعه یک پارچه زیرساخت‌های مختلف انرژی مطرح می‌شود. هاب انرژی مجموعه‌ای متشکل از مبدل‌ها و ذخیره‌کننده‌هاست که از یک سو حامل‌های انرژی را از شبکه بالادست دریافت می‌کند و از سوی دیگر به تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان انرژی می‌پردازد. در این مقاله مدل‌سازی فضای حالت برای این سامانه ارائه می‌شود، سپس برای بهره‌برداری این سامانه به علت داشتن ساختار دینامیکی و به لحاظ داشتن عدم قطعیت ناشی از پیش‌بینی پروفایل بار و قیمت، روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل ارائه می‌شود. روش ارائه‌شده بر روی هاب انرژی شامل ترانسفورماتور، بویلر، CHP و ذخیره‌سازهای حرارتی و الکتریکی با در نظر گرفتن برنامه پاسخ‌گویی بار اعمال می‌شود. نتایج به دست آمده، اثربخشی روش پیشنهادی را برای مسأله بهره‌برداری این سامانه نشان می‌دهد.

کلیدواژه: هاب انرژی، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، بهره‌برداری، بارهای کنترل‌پذیر.

## ۱- مقدمه

به همراه توسعه صنعتی و افزایش مصارف انرژی، زیرساخت‌های انتقال انرژی در سراسر جهان شروع به گسترش نموده و گوشه و کنار آن را در بر گرفت. همچنین با توجه به ملاحظات اقتصادی، فناوری و زیست‌محیطی در هر حوزه، حامل یا حامل‌هایی وظیفه انتقال انرژی را بر عهده گرفته‌اند. در حال حاضر این زیرساخت‌های رایج انرژی همانند شبکه برق و گاز جداگانه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۱]. منابع نوظهور و مبدل‌های جدیدی مثل CHP سبب وابستگی این زیرساخت‌ها شد و نیاز به مطالعات مشترک آنها را ضروری کرد. اولین بار در پروژه "چشم‌انداز شبکه‌های انرژی آینده" در دانشگاه ETH مفهوم سامانه هاب انرژی مطرح شد [۲]. هاب انرژی مجموعه‌ای تشکیل‌شده از مبدل‌ها و ذخیره‌کننده‌هاست که از یک سو حامل‌های انرژی را از شبکه بالادست دریافت می‌کند و از سوی دیگر به تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان انرژی می‌پردازد [۳]. با توجه به مطالعات صورت‌پذیرفته می‌توان سامانه هاب را با ابعاد مختلف مدل‌سازی کرد. این ابعاد می‌تواند از سطح یک خانه و حتی یک وسیله خانگی آغاز گشته و تا حوزه جغرافیای بزرگی در ابعاد یک کشور را در بر گیرد. در نظر گرفتن حامل‌های انرژی در یک هاب که

این مقاله در تاریخ ۲۰ تیر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۸ مهر ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

زهرا هاشمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: zahra.Hashemi@modares.ac.ir).

امین رضانی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: Ramezani@modares.ac.ir).

محسن پارسامقدم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: Parsa@modares.ac.ir).

1. Vision of Future Energy Networks (VoFEN)

ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. رابطه (۲) ضرایب شارژ  $\eta_e^{ch}$  و دشارژ  $\eta_e^{dis}$  ذخیره‌ساز را مشخص می‌کند. تلفات ذخیره‌ساز با (۳) بیان می‌شود که در این رابطه  $\alpha_h^{loss}$  ضریب تلفات ذخیره‌ساز است. حداقل و حداکثر ظرفیت این ذخیره‌سازها نیز با (۴) محدود می‌شود

$$P_s^e(t) = P_s^e(t-1) + \eta P_e^b(t) - P_e^{loss}(t) \quad (1)$$

$$\eta_e = \begin{cases} \eta_e^{ch} & \text{if } P_e^b(t) > 0 \\ \eta_e^{dis} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_e^{loss} = \alpha_e^{loss} P_s^e \quad (3)$$

$$\alpha_e^{\min} P_e^M \leq P_s^e(t) \leq \alpha_e^{\max} P_e^M \quad (4)$$

### ۲-۲ ذخیره‌ساز حرارتی

ذخیره‌سازهای حرارتی را نیز می‌توان با در نظر گرفتن تلفات و محدودیت‌ها با دقت مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی گسسته ذخیره‌ساز حرارتی  $P_s^h(t)$  به صورت (۵) بیان شده است. در این رابطه  $P_s^h(t)$  و  $P_h^b(t)$  به ترتیب انرژی ذخیره‌شده، انرژی شارژ و دشارژ و تلفات ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. رابطه (۶) ضرایب شارژ  $\eta_h^{ch}$  و دشارژ  $\eta_h^{dis}$  ذخیره‌ساز را مشخص می‌کند. تلفات ذخیره‌ساز  $P_h^{loss}(t)$  با (۷) بیان می‌شود. حداقل و حداکثر ظرفیت این ذخیره‌سازها با (۸) محدود می‌شود

$$P_s^h(t) = P_s^h(t-1) + \eta P_h^b(t) - P_h^{loss}(t) \quad (5)$$

$$\eta_h = \begin{cases} \eta_h^{ch} & \text{if } P_h^b > 0 \\ \eta_h^{dis} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_h^{loss} = \alpha_h^{loss} P_s^h \quad (7)$$

$$\alpha_h^{\min} P_h^M \leq P_s^h(t) \leq \alpha_h^{\max} P_h^M \quad (8)$$

### ۳-۲ بارهای الکتریکی

در این پژوهش، دو نوع بار الکتریکی در نظر گرفته می‌شود، (۱) بارهای قطعی  $de^{cri}(t)$  که باید در زمان مشخص تأمین شوند و (۲) بارهای کنترل‌پذیر که می‌توان در بازه زمانی مشخصی آن را انتقال داد

$$dr(t+1) = dr(t) - P_e(t) + de(t) \quad (9)$$

متغیر  $dr(t)$  برای نشان‌دادن بارهای کنترل‌پذیر استفاده شده است که مقدار این متغیر برابر است با مجموع بارهای کنترل‌پذیری که انتقال داده می‌شود و هنوز تأمین نشده‌اند (رابطه (۹)). در این رابطه  $de(t)$  و  $P_e(t)$  به ترتیب نمادهای تقاضای بار الکتریکی در هر گام زمانی و مقدار انرژی خالصی که برای تأمین بار الکتریکی فرستاده می‌شود، هستند. اگر در زمان  $t$  همه بارها تأمین شده باشد، مقدار این متغیر برابر صفر است

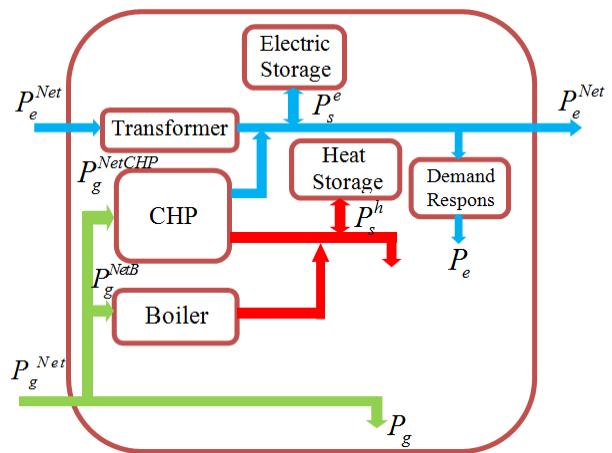
$$de^{cul} = \beta de(t) \quad (10)$$

$$dr(t) - dr(t-1) \leq \beta de(t) \quad (11)$$

بر اساس (۱۰) و (۱۱) مقدار بار کنترل‌پذیر در هر گام زمانی به صورت ضریبی  $\beta$  از تقاضای بار الکتریکی در هر مرحله زمان  $de(t)$  در نظر گرفته می‌شود

$$de^{cri}(t) = (1-\beta)de(t) \quad (12)$$

رابطه (۱۲) مقدار بارهای قطعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمونه‌ای از یک هاب انرژی.

گرفتن بارهای کنترل‌پذیر به عنوان دینامیک سیستم ارائه می‌شود. روش پیشنهادی، یک کنترل پیش‌بین نظارتی با در نظر گرفتن دینامیک ذخیره‌سازهای انرژی، برنامه پاسخ‌گویی و پروفایل بار و قیمت است. در این روش از یک مدل برای پیش‌بینی خروجی‌های سیستم استفاده می‌شود. برای تعیین عملکرد بهینه، تابع بهینه‌سازی مربعی با هدف بهینگی اقتصادی با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم حداقل می‌شود. نقاط کار سیستم برای ورودی‌های سامانه، مبدل‌ها و ذخیره‌سازها تعیین می‌شود. با استفاده از این رویکرد کنترلی می‌توان برنامه‌ریزی را به تغییرات قیمت انرژی و پروفایل بار تطبیق داد. سیستم به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شود که بارهای کنترل‌پذیر از زمان اوج قیمت انرژی به ساعت‌های ارزان‌تر انتقال یابد. همچنین به دلیل این که این روش ماهیتی حلقه بسته دارد، خطای پیش‌بینی بار و منابع تجدیدپذیر را در هر تکرار تصحیح می‌کند و بنابراین پایداری و قوام سیستم افزایش می‌یابد. چارچوب مقاله به این صورت است که در بخش ۲ مدل‌سازی هاب انرژی توضیح داده می‌شود. بخش ۳ راهبرد کنترل پیش‌بین را برای حل مسأله معرفی می‌کند. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای مدل معرفی‌شده در بخش ۲ ارائه می‌شود و بخش پایانی مقاله به جمع‌بندی و ارائه نتایج می‌پردازد.

### ۲- مدل‌سازی هاب

در این بخش مدل‌سازی هاب انرژی معرفی می‌شود. هاب انرژی در نظر گرفته شده در این مقاله شامل ترانسفورماتور، بویلر، CHP و ذخیره‌سازهای حرارتی و الکتریکی است (شکل ۱). همچنین در مدل‌سازی این سامانه برنامه پاسخ‌گویی بار نیز گنجانده می‌شود. در بخش اول دینامیک‌های ذخیره‌سازهای الکتریکی و گرمایی و بارهای الکتریکی کنترل‌پذیر فرموله می‌شود. در بخش دوم معادلات تعادل انرژی و محدودیت‌ها بیان می‌شود و سرانجام مدل کلی به صورت مدل فضای حالت بازنویسی می‌شود. مفهوم مدل هاب انرژی بر اساس [۱۵] بیان می‌شود که در آن اطلاعات بیشتری در مورد جزئیات مدل‌سازی می‌توان یافت.

### ۱-۲ ذخیره‌ساز الکتریکی

ذخیره‌سازهای الکتریکی را می‌توان با در نظر گرفتن تلفات و محدودیت‌ها با دقت مدل‌سازی کرد. مدل‌سازی گسسته ذخیره‌ساز الکتریکی به صورت (۱) بیان شده است. در این رابطه  $P_s^e(t)$ ،  $P_e^b(t)$  و  $P_e^{loss}(t)$  به ترتیب انرژی ذخیره‌شده، انرژی شارژ و دشارژ و تلفات

$$u(t) = \begin{bmatrix} P_e^{Net}(t) \\ P_e(t) \\ P_g^{NetCHP}(t) \\ P_g^{Netboiler}(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$d(t) = \begin{bmatrix} de(t) \\ P_h(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

در این فرمول بندی  $x(t)$ ،  $u(t)$  و  $d(t)$  به ترتیب بردارهای متغیرهای حالت، ورودی و اغتشاش است.  $y(t)$  بردار خروجی سیستم که شامل انرژی ذخیره سازهای الکتریکی و حرارتی و بارهای کنترل پذیر است

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \alpha_e^{loss} & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 - \alpha_h^{loss} & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & -1 \\ 1 & \cdot \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$A$ ،  $B_u$ ،  $B_d$  و  $C$  ماتریس های سیستم هستند.

### ۳- کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

امروزه کنترل پیش بین مبتنی بر مدل یکی از روش های کنترلی کارآمد برای حل مسایل مقید چندورودی- چندخروجی در صنعت به حساب می آید. به دلیل این که برنامه ریزی بهره برداری سامانه هاب انرژی باید با در نظر گرفتن رفتار آینده سامانه انجام شود، روش کنترل پیش بین برای حل این مسأله پیشنهاد می شود. در این بخش مسأله کنترل پیش بین به گونه ای فرمول بندی می شود که برای محاسبه دنباله سیگنال کنترل تابع هزینه بهره برداری هاب انرژی با در نظر گرفتن دینامیک سیستم و محدودیت ها حداقل شود [۱۶]. مراحل الگوریتم پیشنهادی برای هر مرحله زمانی در کل دوره بهره برداری باید تکرار شود در شکل ۲ آمده است.

### ۳-۱ پیش بینی حالت ها و متغیرهای خروجی

در این بخش بر اساس مدل فضای حالت سیستم پیش بینی خروجی بر حسب دنباله ورودی کنترلی محاسبه می شود [۱۷]. فرض بر این است که بردار حالت سیستم در هر مرحله زمانی  $t$  قابل اندازه گیری است. دنباله ورودی کنترل به صورت زیر است

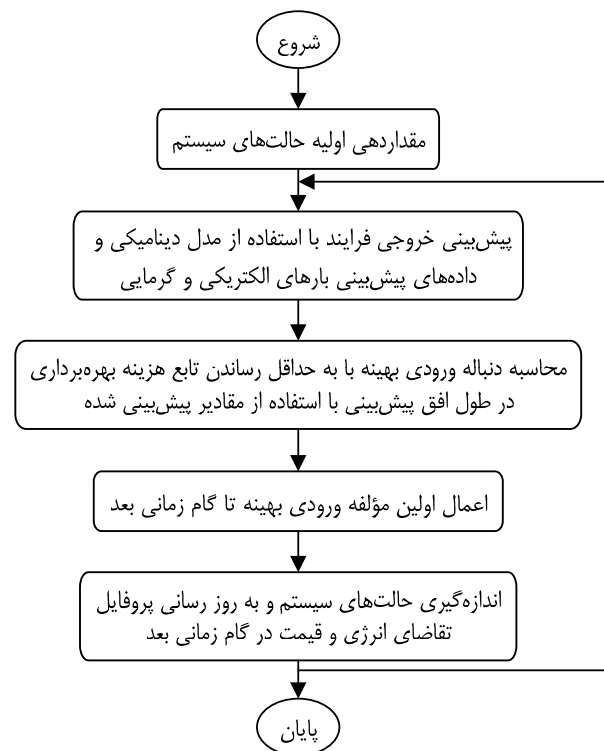
$$u(t), u(t+1), \dots, u(t+N_c-1) \quad (24)$$

$N_c$  افق کنترل را نمایش می دهد. متغیرهای حالت با استفاده از اطلاعات حالت سیستم در مرحله زمان  $t$  تا  $N_p$  (افق پیش بینی) مرحله بعد پیش بینی می شود. دنباله متغیرهای حالت آینده به صورت زیر است

$$x(t+1|t), x(t+2|t), \dots, x(t+N_p|t) \quad (25)$$

که  $x(t+N_p|t)$  حالت پیش بینی شده در زمان  $t+N_p$  با استفاده از اطلاعات لحظه  $t$  را نمایش می دهد که با استفاده از (۲۶) محاسبه می شود

$$x(t+N_p|t) = A^{N_p} x(t) + \sum_{j=1}^{N_p-1} A^{N_p-j} B_u u(t+j) + \sum_{j=1}^{N_p-1} A^{N_p-j} B_d d(t+j) \quad (26)$$



شکل ۲: الگوریتم کنترل پیش بین مبتنی بر مدل.

### ۲-۴ تعادل الکتریکی و گرمایی

تعادل انرژی الکتریکی در خروجی هاب با (۱۳) نمایش داده می شود

$$P_e(t) = A^{Net} \eta_{ee}^T P_e^{Net}(t) + A^{CHP} \eta_{ge}^{CHP} P_g^{NetCHP}(t) - P_e^b(t) \quad (13)$$

که  $A^{Net}$ ،  $\eta_{ee}^T$ ،  $A^{CHP}$  و  $\eta_{ge}^{CHP}$  به ترتیب ضریب دسترسی پذیری به شبکه برق، ضریب بهره ترانسفورماتور، ضریب دسترسی پذیری و ضریب بهره تبدیل گاز به الکتریسیته CHP است. همچنین در (۱۳)  $P_e^{Net}(t)$  و  $P_g^{NetCHP}$  به ترتیب مقدار انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه و میزان گاز ورودی CHP است که هر دو ورودی سامانه هاب محسوب می شوند

$$P_h(t) = \eta_{gh}^B P_g^{NetB}(t) + A^{chp} \eta_{gh}^{CHP} P_g^{NetCHP}(t) - P_h^b(t) \quad (14)$$

رابطه (۱۴) تعادل انرژی حرارتی را در خروجی هاب نشان می دهد. در این رابطه  $\eta_{gh}^B$ ،  $\eta_{ge}^{CHP}$  و  $P_g^{NetB}(t)$  به ترتیب ضریب بهره بویلر، ضریب بهره تبدیل گاز به گرما مبدل CHP و میزان گاز ورودی بویلر است

$$P_g(t) = P_g^{Net}(t) - P_g^{NetCHP}(t) - P_g^{NetB}(t) \quad (15)$$

رابطه (۱۵) تأمین تقاضای گاز طبیعی خروجی هاب را نشان می دهد. در این رابطه  $P_g(t)$  و  $P_g^{Net}(t)$  مقدار تقاضای گاز خروجی هاب و میزان گاز طبیعی خریداری شده از شبکه است.

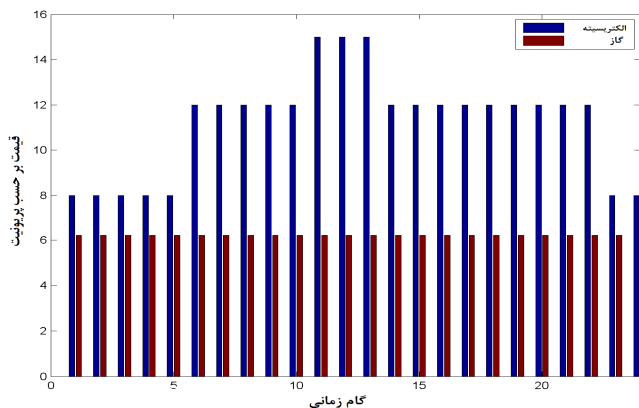
### ۲-۵ مدل سازی فضای حالت

در این بخش مدل سازی هاب انرژی به صورت مدل فضای حالت بازنویسی می شود (روابط (۱۶) تا (۲۰))

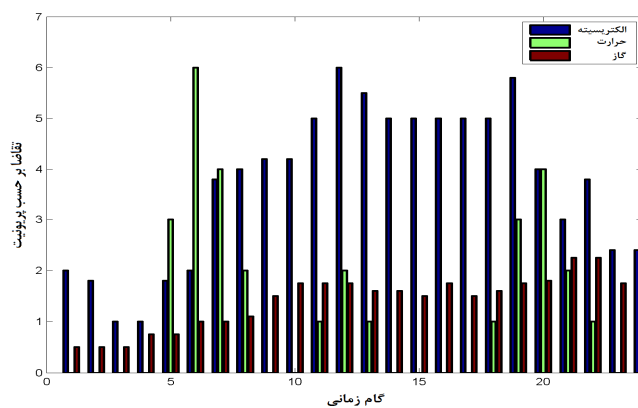
$$x(t+1) = Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t) \quad (16)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (17)$$

$$x(t+1) = \begin{bmatrix} P_s^e(t+1) \\ P_s^h(t+1) \\ dr(t+1) \end{bmatrix} \quad (18)$$



شکل ۴: پروفایل قیمت انرژی الکتریکی و گاز به مدت ۲۴ ساعت.



شکل ۳: پروفایل بار الکتریکی، حرارتی و گاز طبیعی هاب به مدت ۲۴ ساعت.

در طول افق کنترل که هدف حداقل کردن هزینه خریداری حامل‌های انرژی از شبکه را دنبال می‌کند. بردار سیگنال مرجع به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$R_s = [r(t)^T \quad r(t+1)^T \quad \dots \quad r(t+N_p+1)^T] \quad (35)$$

تابع هزینه  $J$  نیز به صورت زیر تعریف می‌شود

$$J = (R_s - Y)^T Q (R_s - Y) + U^T R U \quad (36)$$

$R$  و  $Q$  ماتریس وزن دو هدف کنترلی تابع هزینه است که به صورت ماتریس قطری برای تنظیم عملکرد حلقه بسته سیستم تعریف می‌شود. این دو ماتریس وزن متناسب با قیمت بازار مقداره‌ی و به روز می‌شوند.

#### ۴- شبیه‌سازی

راهبرد کنترلی پیشنهادی برای سامانه هاب انرژی توصیف شده در شکل ۱ به کار برده می‌شود. در بخش اول شبیه‌سازی عملکرد روش پیشنهادی برای افق پیش‌بینی مشخص بررسی می‌شود. در بخش دوم، هزینه‌های بهره‌برداری برای ضرایب متفاوت بارهای کنترل‌پذیر مقایسه می‌شود. برای حل مسأله از QP solver در جعبه ابزار بهینه‌سازی MATLAB استفاده می‌شود.

در هاب انرژی، پروفایل تقاضای بار و قیمت پیش‌بینی شده است. شکل ۳ و ۴ پروفایل‌های ۲۴ ساعته بار و قیمت را نمایش می‌دهد [۱۸]. این پژوهش فرض بر این است این پیش‌بینی‌ها به طور کامل صحیح است ولی در واقعیت این پیش‌بینی‌ها دارای خطاست که با استفاده از رویکرد کنترل پیش‌بین این خطاها در هر گام تصحیح می‌شود. قیمت برق در طول شبانه‌روز متغیر است در حالی که قیمت گاز ثابت فرض می‌شود (شکل ۳). ماتریس ضرایب وزن تابع هزینه، ماتریسی قطری است که درایه‌های قطر اصلی آن تابع نمایی از قیمت بازار است. ضرایب و پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ لیست شده و بر اساس پروفایل‌ها، تابع هزینه برای شبیه‌سازی ۲۴ گام زمانی حداقل می‌شود که هر گام زمانی ۱ ساعت است.

#### ۴-۱ بررسی عملکرد روش پیشنهادی

برای بررسی عملکرد کلی رویکرد پیشنهادی، افق پیش‌بینی  $N = 24$  و ضریب بارهای کنترل‌پذیر را  $\beta = 0.8$  انتخاب می‌کنیم. به طور کلی برای انتخاب افق پیش‌بینی مناسب عواملی مانند عملکرد کنترلی مناسب، بار محاسباتی و اطلاعات پیش‌بینی در دسترس را باید در نظر گرفت. مسأله بهینه‌سازی برای ۳۰ گام زمانی حل می‌شود. در هر گام زمانی

رابطه پیش‌بینی خروجی سیستم با استفاده از متغیرهای حالت به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$y(t+N_p|t) = CA^{N_p} x(t) + \sum_{j=0}^{N_p-1} CA^{N_p-1-j} B_u u(t+j) + \sum_{j=0}^{N_p-1} CA^{N_p-1-j} B_d d(t+j) \quad (27)$$

بردارهای جدید به صورت زیر تعریف می‌شود

$$Y = [y(t+1|t)^T, y(t+2|t)^T, \dots, y(t+N_p|t)^T] \quad (28)$$

$$U = [u(t)^T, u(t+1)^T, \dots, u(t+N_p)^T] \quad (29)$$

$$D = [d(t+1|t)^T, d(t+2|t)^T, \dots, d(t+N_p|t)^T] \quad (30)$$

رابطه پیش‌بینی به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$Y = \Gamma x(t) + \Phi U + \Omega D \quad (31)$$

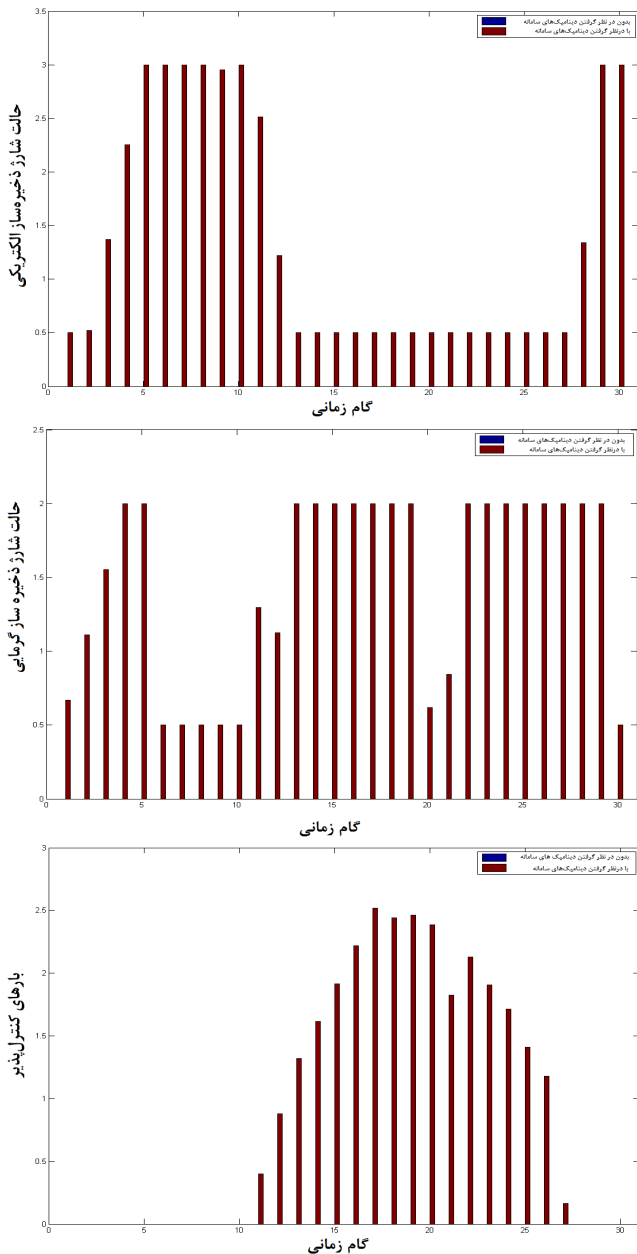
$$\Gamma = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB_u & \cdot & \dots & \cdot \\ CAB_u & CB_u & \dots & \cdot \\ CA^2 B_u & CAB_u & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} B_u & CA^{N_p-2} B_u & \dots & CA^{N_p-N_c} B_u \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} CB_d & \cdot & \dots & \cdot \\ CAB_d & CB_d & \dots & \cdot \\ CA^2 B_d & CAB_d & \dots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} B_d & CA^{N_p-2} B_d & \dots & CB_d \end{bmatrix} \quad (34)$$

#### ۳-۲ تابع بهینه‌سازی

در این بخش، تابع هدف به گونه‌ای تعریف می‌شود که دو هدف کنترلی ردیابی و جریمه سیگنال‌های کنترل را برآورده کند، (۱) مجموع مربعات انحراف بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و نقاط مرجع آنها در طول افق پیش‌بینی که در این مسأله حداقل نگه داشتن انرژی ذخیره‌شده و متغیر بارهای کنترل‌پذیر مد نظر است و (۲) مجموع مربعات دنباله کنترل

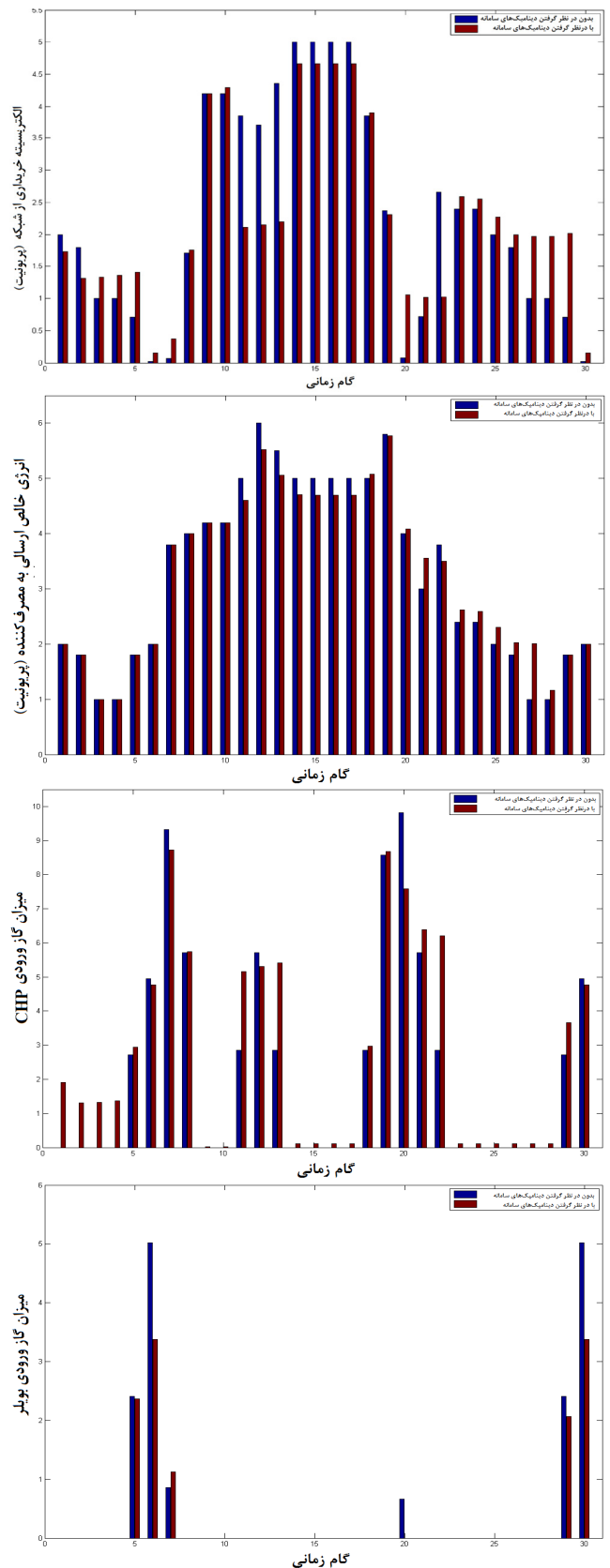


شکل ۶: متغیرهای حالت‌های سامانه در طول دوره بهره‌برداری.

جدول ۱: پارامترهای هاب انرژی.

$\alpha_{e,h}^{loss}$	۰٫۰۲	$A^{CHP}$	۰٫۹۶
$\eta_{ee}^T$	۰٫۹۸	$A^{net}$	۰٫۹۹
$\eta_e^{ch}$	۰٫۹	$P_e^M$	۳
$\eta_e^{dis}$	۰٫۹	$P_h^M$	۲
$\eta_h^{ch}$	۰٫۹	$P^T$	۸
$\eta_h^{dis}$	۰٫۹	$P^{CHP}$	۸
$\eta_{ge}^{CHP}$	۰٫۴	$P^B$	۸
$\eta_{gh}^{CHP}$	۰٫۳۵	$\alpha_{e,h}^{min}$	۰٫۰۵
$\eta_{gh}^B$	۰٫۸۵	$\alpha_{e,h}^{max}$	۰٫۹

شکل ۵ و ۶ روند تغییرات برق خریداری شده از شبکه، انرژی خالص ارسالی به مصرف‌کننده، توان ورودی میدل‌ها و متغیرهای حالت را برای دوره بهره‌برداری ۳۰ ساعته برای دو حالت بدون در نظر گرفتن دینامیک‌ها و با در نظر گرفتن آن نشان می‌دهد. در حالتی که دینامیک‌های سامانه در



شکل ۵: متغیرهای کنترلی سامانه در طول دوره بهره‌برداری.

متغیرهای کنترل برای کل افق پیش‌بینی در طی بهینه‌سازی محاسبه می‌شود ولی فقط اولین متغیر کنترلی به سیستم اعمال می‌شود. بهینه‌سازی برای گام زمانی بعد دوباره تکرار می‌شود. در این بخش برنامه‌ریزی این سامانه در دو حالت متفاوت بدون در نظر گرفتن دینامیک و با در نظر گرفتن آن مقایسه می‌شود.

### ۴-۲ تأثیر بارهای کنترل‌پذیر

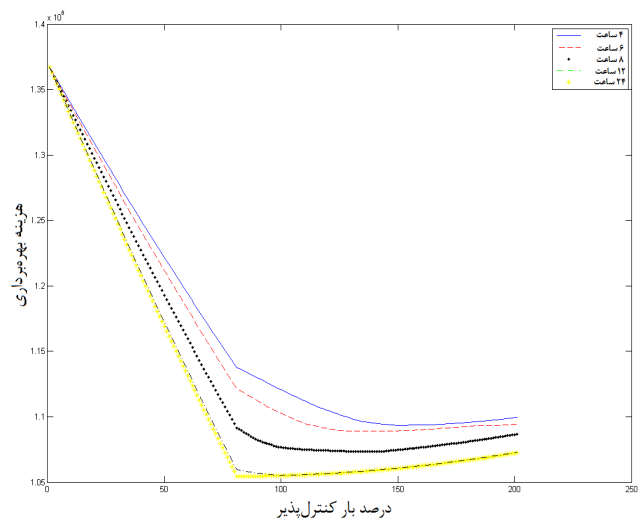
برای نشان‌دادن اثر بارهای کنترل‌پذیر، عملکرد برنامه کنترلی با ضریب بارهای کنترل‌پذیر متفاوت مقایسه می‌شود. این ضریب از مقدار  $\beta = 0$ ، هیچ بار کنترل‌پذیر تا  $\beta = 0.2$ ،  $20\%$  بار کنترل‌پذیر تغییر می‌کند. با در نظر گرفتن بارهای کنترل‌پذیر، مقدار تابع هزینه بهره‌برداری برای این ضرایب متفاوت مقایسه می‌شود. شکل ۷ هزینه بهره‌برداری را برای این ضرایب متفاوت  $\beta$  به تصویر کشیده است. به طور کلی، هزینه بهره‌برداری با افزایش این ضریب کاهش می‌یابد. نرخ سریع کاهش در هزینه بهره‌برداری برای حالت تأخیر ۶ ساعته تا  $\beta = 0.12$  اتفاق می‌افتد. همان‌طور که توضیح داده شد هر بار کنترل‌پذیر تا زمان مشخص  $T$  می‌تواند به تأخیر بیافتد. به این بازه زمانی دوره بهره‌برداری گفته می‌شود که معمولاً توسط مصرف‌کننده تعیین می‌شود. شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تغییر این زمان هزینه بهره‌برداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل ۷ هزینه بهره‌برداری را با تغییر این زمان و تغییر ضرایب بارهای کنترل‌پذیر نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که انتخاب  $\beta = 0.08$  و  $T = 12$  کمترین هزینه بهره‌برداری را در بر داشته است. برای انتخاب  $\beta$  و  $T$  عملکرد روش کنترلی، هزینه بهره‌برداری و امکان عملی بودن مقدار این پارامترها باید به طور هم‌زمان بررسی شود.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رویکردی کنترلی برای مدل‌سازی و بهره‌برداری هاب انرژی پیشنهاد شد. هاب انرژی با در نظر گرفتن دینامیک ذخیره‌سازها و بارهای کنترل‌پذیر به صورت فضای حالت مدل‌سازی و سپس یک کنترل پیش‌بین نظارتی با در نظر گرفتن دینامیک سیستم، برنامه پاسخ‌گویی بار و پروفایل بار و قیمت ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی اثربخشی این راهبرد پیشنهادی را برای این سیستم نشان داد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از این رویکرد کنترلی می‌توان برنامه‌ریزی بهره‌برداری را به تغییرات قیمت انرژی و پروفایل بار تطبیق داد. در این روش مدیریت بار نیز به گونه‌ای انجام شد که بارهای کنترل‌پذیر از ساعاتی که قیمت انرژی تا ساعات ارزان‌تر به تأخیر بیفتند. در نهایت نیز تأثیر ضرایب متفاوت بارهای کنترل‌پذیر روی مقدار تابع هزینه بهره‌برداری سیستم بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که برای تعیین بهینه این ضریب باید اثر هم‌زمان بازه بهره‌برداری را نیز در نظر گرفت.

### مراجع

- [1] M. Arnold, R. R. Negenborn, G. Andersson, and B. De Schutter, "Model-based predictive control applied to multi-carrier energy systems," in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting. PES'09*, 8 pp., Jul. 2009.
- [2] M. Geidl, G. Koepfel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson, and K. Frohlich, "Energy hubs for the future," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 24-30, Jan./Feb. 2007.
- [3] R. Frik and P. Favre-Perrod, *Proposal for a Multifunctional Energy Bus and Its Interlink with Generation and Consumption*, Master Thesis, ETH Zurich: High voltage Laboratory, 2004.
- [4] G. Koepfel and G. Andersson, "The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply," in *Proc. the 6th World Energy System Conf.*, pp. 10-12, Torino, Italy, Jun. 2006.
- [5] K. Alanne and A. Saari, "Distributed energy generation and sustainable development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 6, pp. 539-558, Dec. 2006.
- [6] G. Koepfel and G. Andersson, "Reliability modeling of multi-carrier energy systems," *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 235-244, Mar. 2009.
- [7] A. Hajimiragha, C. Canizares, M. Fowler, M. Geidl, and G. Andersson, "Optimal energy flow of integrated energy systems



شکل ۷: مقدار تابع هزینه بر حسب ضریب بارهای کنترل‌پذیر.

نظر گرفته شد، ذخیره‌ساز الکتریکی در ۵ ساعت اول ابتدایی روز که قیمت برق پایین است تا بالاترین سطح شارژ می‌شود. نکته قابل توجه این است که به دلیل تلفات، ذخیره‌ساز در ساعت ۵ به طور کامل شارژ می‌شود. روند تغییرات خریداری برق از شبکه به طور کلی متأثر از پروفایل تقاضای بار الکتریکی در طول شبانه‌روز است. اگر به این نمودار دقت کنیم در ساعت ۶ و ۷ که اوج نسبی قیمت برق با تقاضای بار حرارتی همراه می‌شود هاب انرژی تقاضای بار الکتریکی خود را از طریق CHP تأمین می‌کند. همچنین در ساعات ۱۱ تا ۱۳ که اوج قیمت برق در طول روز است خریداری برق از شبکه افت شدیدی را نشان داد. در طی این ساعات بخش اعظم بار الکتریکی از طریق تولید برق CHP و انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌سازها تأمین می‌شود. بویلر فقط در طی ساعات ۵ تا ۷ کار می‌کند. این ساعات اوج تقاضای بار حرارتی در طول روز است که CHP به دلیل پایین بودن ضریب بهره، توانایی تأمین این سطح از تقاضا را ندارد. به کارگیری ذخیره‌ساز حرارتی موجب شده که هاب بتواند در ساعاتی که بار حرارتی وجود ندارد بارهای الکتریکی خود را از طریق CHP تأمین کند. مقدار حرارتی که به صورت هم‌زمان تولید می‌شود در این ذخیره‌سازهای حرارتی ذخیره می‌شود تا در زمان تقاضای بار مصرف شود. روند تغییرات متغیر بارهای کنترل‌پذیر در نظر بگیرد. از ساعت ۱۱ که اوج قیمت برق در طول شبانه‌روز است هاب، بارهای کنترل‌پذیر را شیف‌ت می‌دهد تا در ساعت ارزان‌تر این بار را تأمین کند. در تنظیمات شبیه‌سازی بارهای کنترل‌پذیر هر ساعت می‌تواند حداکثر ۶ ساعت به تأخیر بیفتد. به طور کلی بارهای کنترل‌پذیر پس از به تأخیر افتادن از ساعت ۲۳ تا ۲۷ که پایین‌ترین سطح قیمت را دارد، به طور کامل تأمین می‌شوند. با دقت در نتایج شبیه‌سازی متوجه می‌شویم که روش کنترلی کاهش پیک تقاضای بار را نیز تا حد امکان انجام می‌دهد. در این روش بارهای کنترل‌پذیر در ساعاتی که تقاضای بار کمتری وجود دارد تأمین می‌شود تا از به وجود آمدن پیک در تقاضا جلوگیری کند.

هزینه بهره‌برداری برای کل دوره شبیه‌سازی  $30 \times 10^6 \times 1.24$  است که نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن دینامیک کاهش ۳۰ درصدی هزینه را نشان می‌دهد. مقدار این تابع هزینه شامل هزینه خرید حامل‌های انرژی از شبکه، هزینه تعمیر و نگهداری ذخیره‌سازها و هزینه اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار است.

[18] M. Geidl, *Integrated Modeling and Optimization of Multi-carrier Energy Systems*, TU Graz, 2007.

**زهرا هاشمی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴ از دانشگاه صنعتی شیراز و تربیت مدرس به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، کنترل مقاوم، شبکه هوشمند برق و کنترل توزیع شده.

**امین رمضانی** در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید بهشتی تهران و در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف تهران دریافت کرد و در سال ۱۳۹۰ موفق به اخذ درجه دکترای برق در گرایش کنترل از دانشگاه تهران گردید. از سال ۱۳۸۳ الی ۱۳۹۰ نام‌برده به عنوان کارشناس ارشد سیستم‌های ابزار دقیق و اتوماسیون در صنایع مختلف انرژی نفت و گاز و برق به کار مشغول بود. دکتر رمضانی از سال ۱۳۹۱ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی گروه کنترل این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر عیب، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، کنترل سیستم‌های هایبرید، کنترل سیستم‌های تصادفی و ابزار دقیق و اتوماسیون صنعتی می‌باشد.

**محسن پارسا مقدم** متولد ۱۳۳۵ مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۵۸ از دانشگاه صنعتی شریف در رشته مهندسی برق- قدرت اخذ نمود. مدرک کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۶۵ از دانشگاه صنعتی تویوهاشی و مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه توهوکو هر دو از کشور ژاپن و در رشته مهندسی برق- قدرت دریافت نمود. از سال ۱۳۶۷ به عنوان عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس در بخش مهندسی برق مشغول به کار می‌باشد. در حال حاضر استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر در رشته قدرت، گرایش سیستم‌های قدرت می‌باشد. از جمله زمینه‌های تحقیقاتی وی می‌توان به برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت، سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، مدیریت انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر و کاربرد هوش محاسباتی در سیستم‌های قدرت اشاره کرد.

with hydrogen economy considerations," in *Proc. Bulk Power System Dynamics and Control-VII*, 11 pp., 2007.

- [8] M. Schulze, L. Friedrich, and M. Gautschi, "Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach," in *Proc. ICSET IEEE Int. Conf. on Sustainable Energy Technologies*, pp. 83-88, Dec. 2008.
- [9] A. Sheikhi, A. Ranjbar, and H. Oraee, "Financial analysis and optimal size and operation for a multicarrier energy system," *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 71-78, May 2012.
- [10] M. D. Galus, R. La Fauci, and G. Andersson, "Investigating PHEV wind balancing capabilities using heuristics and model predictive control," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 8 pp., Jul. 2010.
- [11] P. Ahcin, "Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems," in *Proc. Int. Conf. on Proc. Power System Technology, POWERCON'10*, 7 pp., Hangzhou, China, Oct. 2010.
- [12] F. Kienzle, P. Ahcin, and G. Andersson, "Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 194-202, Apr. 2011.
- [13] A. Parisio, C. Del Vecchio, and A. Vaccaro, "A robust optimization approach to energy hub management," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 98-104, 2012.
- [14] M. Arnold, R. Negenborn, G. Andersson, and B. De Schutter, "Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks," in R. R. Negenborn, Zofia Lukszo, Hans Hellendoorn Eds., *Intelligent Infrastructures*, Ch. 10, Springer, pp. 235-273, 2010.
- [15] S. Pazouki, M. R. Haghifam, and A. Moser, "Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 335-345, Oct. 2014.
- [16] E. F. Camacho and C. B. Alba, *Model Predictive Control*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [17] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*, Springer Science & Business Media, 2009.