



## شبیه سازی و مدل سازی خودروی پراید هیبرید باتری-پیل سوختی

علی فرهادی<sup>۱</sup>، پیمان نادری<sup>۲</sup>، سمیرا سردارزاده<sup>۳</sup>

دانشکده مکانیک دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران

[a.farhadi@sru.ac.ir](mailto:a.farhadi@sru.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله با استفاده از یک پیل سوختی، به طراحی یک استراتژی کنترلی جهت استفاده از آن در یک خودروی پراید برقی پرداخته می شود. به همین منظور فرض می شود که خودرو به جای موتور احتراقی از باتری و پیل سوختی استفاده نموده و مجموع وزن نیز بر اساس حذف موتور احتراقی، جعبه دنده، کلاچ و با اضافه شدن تجهیزات الکتریکی منظور میگردد. در ابتدا با وارد نمودن مشخصات خودرو به نرم افزار ADVISOR، میزان قدرت درخواستی راننده در یک سیکل رانشی استاندارد بدست آمده و سپس با قراردن یک پیل سوختی و باتری به طور موازی، به تامین این قدرت درخواستی توسط مجموعه پیل سوختی و باتری پرداخته شده و با طراحی یک کنترل کننده فازی، میزان مشارکت باتری و پیل سوختی در تامین قدرت درخواستی تعیین می گردد. در پایان، نتایج حاصل از شبیه سازی تاثیر استراتژی کنترلی طرح شده را در طراحی این خودروی برقی، به اثبات می رساند.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی، حالت شارژ باتری، فازی

### ۱- مقدمه

یکی از مهمترین توجهات جهان امروزی کاهش مصرف سوختهای فسیلی است و خودروها از مهمترین مصرف کننده این ذخائر طبیعی هستند. طراحی بدنه های آیرودینامیک، کاهش وزن خودرو، کاهش دسته سیمهای متعدد و طراحی موتورهای احتراقی با راندمان بالاتر، همگی در جهت کاهش مصرف سوخت در خودرو بوده است لیکن جدیدترین مطالعات نشان می دهد که کاهش مصرف سوخت بیش از یک حد معین، با دیدگاههای صرف مکانیکی امکان پذیر نیست. از اینرو در دهه اخیر توجه محققین برق به استفاده از انرژی الکتریکی در خودرو جلب گردیده است. با توجه به تکنولوژی ساخت باتریها و تخلیه سریع در آنها، امکان ایجاد خودروی برقی خالص موجود نبوده و به نظر می رسد که این تکنولوژی در سالهای آینده نیز پیشرفت چندانی نداشته باشد. به همین دلیل، بیشترین توجه به استفاده از انرژی الکتریکی در کنار انرژی فسیلی در خودروها بوده است که به این خودروها، خودروهای هیبرید گفته می شود. در این خودروها مهمترین مسئله استراتژی کنترلی حاکم بر سیستم است که تعیین کننده نحوه مشارکت انرژی الکتریکی در رانش خودرو است. بر همین اساس خودروهای هیبرید به دسته های سری، موازی و ترکیبی تقسیم بندی می شوند. در هر یک از این دسته ها نیز رقابت برای طرح استراتژی کنترلی بهینه ای که بیشترین کاهش مصرف سوخت و بازیافت انرژی را داشته باشد، ادامه دارد. در [1] برای خودروهای هیبرید موازی، یک

۱- مدرس گروه مکانیک دانشگاه شهید رجایی تهران

۲- عضو هیئت علمی گروه برق دانشگاه آزاد واحد بروجرد. [naderi@ee.kntu.ac.ir](mailto:naderi@ee.kntu.ac.ir)

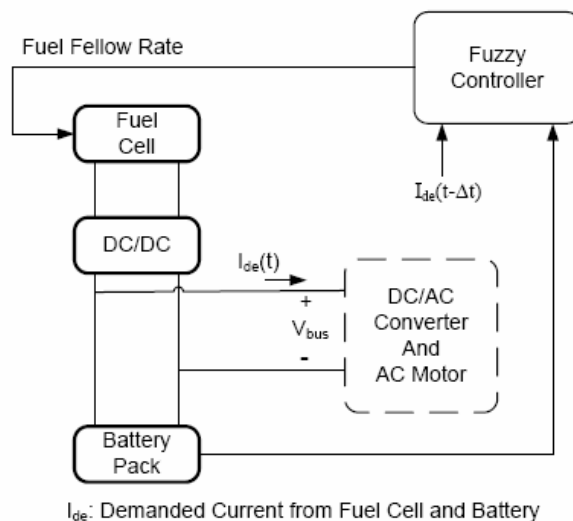
۳- دانشجوی کارشناسی الکترونیک دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب. [s\\_sardarzadeh@yahoo.com](mailto:s_sardarzadeh@yahoo.com)



استراتژی کنترلی زمان-حقیقی که بر مبنای وضعیت جاده تصمیم گیری می کند، پیشنهاد گردیده و در [2] یک کنترل کننده بهینه که بر اساس مینیمم مصرف سوخت، سهم مشارکت موتور الکتریکی و موتور احتراقی را تعیین می کند، طرح شده است. در [3] نیز روش کنترل میدان چرخان در ماشینهای الکتریکی جهت کاربرد در خودروهای هیبرید بیان گردیده است. با توجه به نتایج آخرین تحقیقات، یک روش دیگر جهت هیبرید سازی خودروها استفاده از پیل سوختی به عنوان مولد انرژی است که در آن با انجام عملی معادل با عکس عمل شیمیایی الکترولیز، با ترکیب اکسیژن و هیدروژن، انرژی الکتریکی را تولید نموده و می توان از آن برای شارژ باتریهای استفاده شده در یک خودروی هیبرید و یا تامین انرژی الکتریکی ماشینهای الکتریکی استفاده شده در آن، استفاده کرد. در این مقاله نیز هدف استفاده از پیل سوختی و باتری به جای استفاده از موتور احتراقی در خودروی پراید است به نحوی که با مدلسازی دینامیکی باتری و پیل سوختی، طراحی یک استراتژی کنترلی مناسب انجام و عمل رانش در یک سیکل شهری توسط این مجموعه انجام گردد.

## ۲- ساختار پیشنهادی

در شکل ۱ ساختار پیشنهادی مقاله نشان داده شده است که در آن از یک کنترل کننده فازی برای تعیین نرخ سوخت مصرفی پیل سوختی استفاده شده است. کنترل کننده فازی از روی جریان درخواستی و همچنین حالت شارژ باتری، میزان سوخت پیل سوختی را تعیین نموده و طراحی این کنترل کننده به نحوی خواهد بود که هر چه حالتها شارژ کم و جریان درخواستی بیشتر باشد، پیل سوختی با توان بیشتری کار کرده و علاوه بر تامین جریان درخواستی، باتری را نیز شارژ نماید. با توجه به تغییرات ولتاژ خروجی پیل سوختی بر حسب جریان خروجی، از یک مبدل DC/DC نیز استفاده شده تا ولتاژ خروجی از پیل سوختی در سطح ولتاژ باتری ثابت بماند.



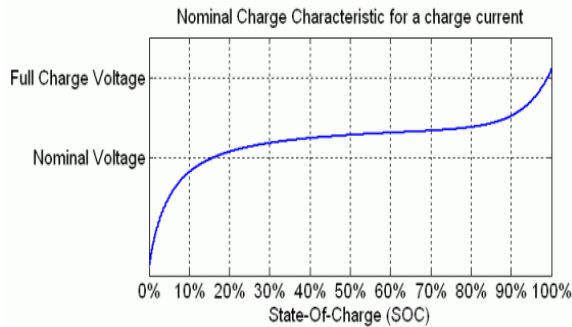
شکل ۱- ساختار پیشنهادی

## ۳- مدل سازی باتری

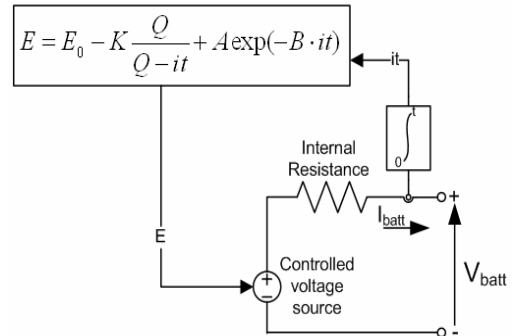
در این مقاله از مدل دینامیکی باتری با مدل مقاومت داخلی استفاده شده است [5]. در این مدل ولتاژ مدار باز باتری وابسته به حالت شارژ بوده و حالت شارژ نیز وابسته به جریان کشیده شده از آن کاهش میابد. شکل ۲ مدل مقاومت داخلی را نشان می-



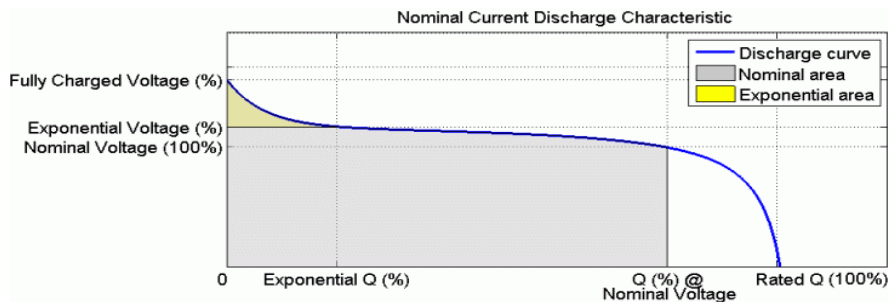
دهد. که در آن  $E_0$  ولتاژ مدار باز باتری،  $Q$  ظرفیت باتری بر حسب  $A.h$ ، ثابت  $K$ ، ولتاژ پلاریزه شده و  $E$  ولتاژ ترمینال باتری در حالت مدار باز و  $A$  و  $B$  ضرایب ثابتی است که به دینامیک باتری مربوط است و به ترتیب ولتاژ و ظرفیت نمایی نامیده می-شوند. شکل ۳، ولتاژ مدار باز بر حسب حالت شارژ و شکل ۴، منحنی شارژ و دشارژ باتری و نحوه رفتار باتری بر اساس پارامترهای باتری را نشان می دهد.



شکل ۳- ولتاژ مدار باز بر حسب حالت شارژ



شکل ۲- مدل مقاومت داخلی باتری



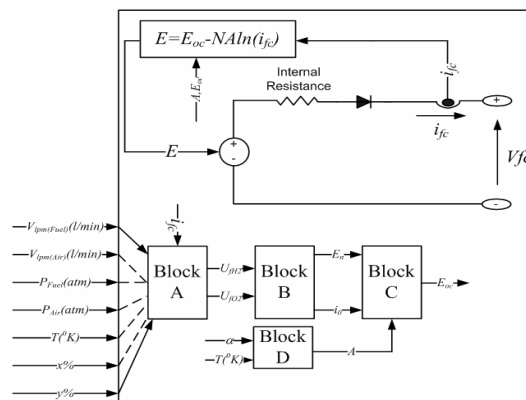
شکل ۴- منحنی شارژ و دشارژ باتری

برای محاسبه حالت شارژ باتری (SoC) نیز که به جریان کشیده شده از باتری و در نتیجه ظرفیت باقیمانده از آن مرتبط است، رابطه زیر استفاده می گردد.

$$SoC = 1 - (1.05 Q) / \int i dt \quad (1)$$

#### ۴-مدلسازی پیل سوختی

در این مقاله، برای مدلسازی پیل سوختی از یک مدل دینامیکی و کامل استفاده شده است [6]. مدل بر مبنای مدار معادلی مطابق با شکل ۵ می باشد. پارامترهای به کار رفته در این مدل، به شرح لیست شده در جدول ۱ می باشد.



شکل ۵- مدار معادل و بلوک دیاگرام پیل سوختی  
جدول ۱- پارامترهای به کار رفته در مدلسازی پیل سوختی

سمبل	شرح	واحد
P <sub>Fuel</sub>	فشار مطلق سوخت ورودی	At
P <sub>air</sub>	فشار مطلق هوای ورودی	At
V <sub>lpm(fuel)</sub>	نرخ جریان سوخت ورودی	Litr/min
V <sub>lpm(air)</sub>	نرخ جریان هوای ورودی	Litr/min
x	میزان هیدروژن موجود در سوخت ورودی	%
y	میزان اکسیژن موجود در اکسیدانت	%
w	میزان بخار آب موجود در اکسیدانت	%
P <sub>H2</sub>	فشار جزئی هیدروژن درون پشته سلول	%
P <sub>O2</sub>	فشار جزئی اکسیژن درون پشته سلول	%
P <sub>H2O</sub>	فشار جزئی بخار آب درون پشته سلول	%
k	ثابت بولتزمن معادل با $1.38 \times 10^{-23}$	J/k
h	ثابت پلانک معادل با $6.626 \times 10^{-34}$	J.s
ΔG	سایز سد فعال سازی که بر مبنای نوع الکترود و کاتالیزور است	No Unit
η <sub>nom</sub>	ماکزیمم بازده پشته سلول	%
R	ضریب ثابت معادل با 8.3145	J/(mol k)
f	ضریب ثابت معادل با 96485	A s/mol
z	تعداد الکترونهاى متحرک	No Unit
E <sub>n</sub>	ولتاژ ترمودینامیکی سلول که بر اساس فشار جزئی، درون پشته ایجاد می شود	v
i <sub>0</sub>	جریان تبدیلی که در نتیجه حرکت پیوسته الکترونها در الکترولیت ایجاد می شود	A
α	ضریب انتقال شارژ که بر مبنای نوع الکترود و کاتالیزور است	No Unit
T	دمای کار	k
N	تعداد سلولهای پشته	No Unit
U <sub>FH2</sub>	نرخ تبدیل هیدروژن که همیشه بین صفر و یک خواهد بود	No Unit
U <sub>fO2</sub>	نرخ تبدیل اکسیژن که همیشه بین صفر و یک خواهد بود	No Unit
V <sub>nom</sub>	ولتاژ نامی	v
I <sub>nom</sub>	جریان نامی	A
V <sub>lpm(air)nom</sub>	مقدار مطلق نرخ جریان هوا	Litr/min
P <sub>airnom</sub>	فشار مطلق هوای منبع	pas
T <sub>nom</sub>	دمای نامی کارکرد	°k
Δh <sup>0</sup> (H <sub>2</sub> O(gas))	ضریبی ثابت معادل با $241.83 \times 10^3$	J/mol

با توجه به پارامترهای لیست شده در جدول ۱ معادلات دینامیکی پیل سوختی به شرحی که در ادامه آورده شده است، قابل بیان است. ولتاژ مدار باز در یک پیل سوختی که از یک پشته سلول تشکیل شده است، به صورت زیر حاصل میشود:

$$E_{oc} = N(E_n - A \cdot \ln(i_0)) \quad (2)$$

که در آن ضریب A به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{R \cdot T}{z \cdot a \cdot f} A = \quad (3)$$



نرخهای تبدیل اکسیژن و هیدروژن که در بلوک A شکل ۵ محاسبه می شود نیز به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$U_{fH2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot I_{fc}}{z \cdot F \cdot P_{Fuel} \cdot V_{imp(fuel)} \cdot x\%} \quad (۴)$$

$$U_{fO2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot I_{fc}}{2z \cdot F \cdot P_{air} \cdot V_{imp(air)} \cdot y\%} \quad (۵)$$

عملیات انجام شده در بلوک B که ولتاژ و جریان تبدیل شده را محاسبه می کند، به صورت روابط زیر است.

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{z \cdot F} + \frac{RT}{z \cdot F} \left( P_{H2} \cdot P_{O2}^{\frac{1}{2}} \right) & \text{if } T \leq 100^{\circ}C \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{z \cdot F} + \frac{RT}{z \cdot F} \left( \frac{P_{H2} \cdot P_{O2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H2O}} \right) & \text{if } T > 100^{\circ}C \end{cases} \quad (۶)$$

$$i_0 = \frac{z \cdot F \cdot k(P_{H2} + P_{O2})}{R \cdot h} e^{\frac{\Delta G}{RT}} \quad (۷)$$

که در آنها:

$$P_{H2} = P_{Fuel} \cdot x\% (1 - U_{fH2}) \quad (۸)$$

$$P_{O2} = P_{air} \cdot y\% (1 - U_{fO2}) \quad (۹)$$

$$P_{H2O} = P_{Air} (w\% + 2y\%U_{f-2}) \quad (۱۰)$$

در بلوکهای C و D، ولتاژ مدارباز جدید محاسبه می گردد و مقادیر نامی نرخ تبدیل گاز به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$U_{fH2} = \frac{\eta_{nom} \cdot \Delta h_0 (H2O(g)) \cdot N}{z \cdot F \cdot V_{nom}} \quad (۱۱)$$

$$U_{fO2} = \frac{60000 \cdot R \cdot T_{nom} \cdot N \cdot I_{nom}}{2z \cdot F \cdot V_{imp(air)nom} \cdot 0.21} \quad (۱۲)$$

پارامترهایی از قبیل  $\alpha$ ،  $\Delta G$ ، بر اساس منحنی پلارریزه شونددگی در ولتاژ نامی و با استفاده از پارامترهایی از قبیل حداقل دمای کار، میزان ترکیب سوخت و هوا، دما و فشار منبع و سایر پارامترها که همگی از کارخانه سازنده قابل دریافت هستند، محاسبه می گردند.

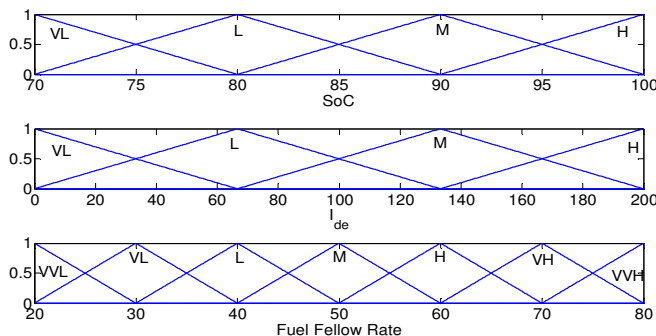
## ۵- استراتژی کنترلی

برای طراحی استراتژی کنترلی فرض می شود که خودرو از طریق ۲ منبع انرژی باتری و پیل سوختی، قدرت درخواستی را تامین نماید. با توجه به ساختار معرفی شده در شکل ۱، پیل سوختی از طریق یک مبدل DC/DC با باتری موازی شده و به طور مشترک قدرت درخواستی موتور الکتریکی را تامین نمایند. در طراحی استراتژی کنترلی موارد زیر مورد توجه قرار گرفته است:

- با توجه به محدودیت پیل سوختی از نظر خاموش و روشن شدن، پیل سوختی همواره در حالت روشن باشد.

- هر چه قدرت درخواستی بیشتر باشد، در یک حالت شارژ معین، پیل سوختی با قدرت بیشتری کار کند.
  - در یک قدرت درخواستی معین، هر چه حالت شارژ باتری کمتر باشد، پیل سوختی با قدرت بیشتری کار کند.
- برای برقراری اهداف فوق از یک کنترل کننده فازی با دو ورودی که یکی حالت شارژ باتری و دیگری جریان درخواستی است، استفاده شده و خروجی کنترل کننده نیز نرخ جریان سوخت ورودی به پیل سوختی که هیدروژن است، در نظر گرفته شده است. با توجه به معادلات آورده شده در مدلسازی پیل سوختی، ولتاژ و جریان خروجی پیل سوختی متناسب با نرخ هیدروژن ورودی بوده و جریان خروجی به شدت به این پارامتر وابسته است. شکل ۶، توابع عضویت این کنترل کننده و جدول ۲، پایگاه قوانین آنرا نشان می دهد. در ورودی کنترل کننده، جریان درخواستی  $I_{de}$  از روی قدرت درخواستی و ولتاژ باتری به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$I_{de} = \frac{P_{demand}}{V_{bus}} \quad (13)$$



شکل ۶- توابع عضویت کنترل کننده فازی

جدول ۲- پایگاه قوانین کنترل کننده فازی

		SoC			
		VL	L	M	H
$I_{de}$	VL	M	H	VH	VVH
	L	L	M	H	VH
	M	VL	L	M	H
	H	VVL	VL	L	M

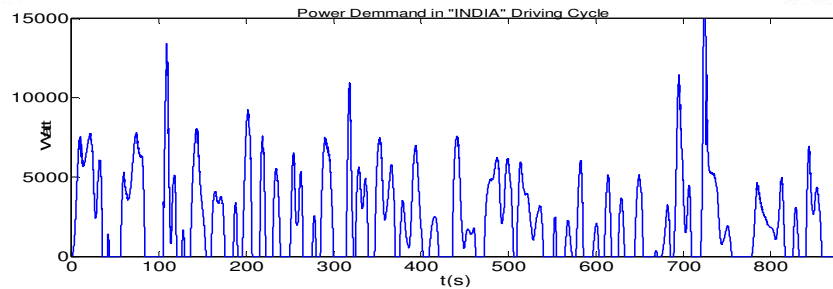
## ۶- شبیه سازی

برای شبیه سازی در ابتدا مشخصات خودروی پراید به نرم افزار ADVISOR داده شده [4] و سپس قدرت درخواستی راننده توسط این نرم افزار بدست آورده شده است. وزن خودرو بر اساس حذف موتور احتراقی، جعبه دنده و کلاچ و اضافه شدن تجهیزات الکتریکی شامل باتریها و پیل سوختی، منظور شده است. مشخصات کلی خودرو مطابق با جدول ۳ بوده و قدرت درخواستی راننده بر اساس حرکت در سیکل رانشی INDIA مطابق با شکل ۷ بدست آمده است.

جدول ۳- مشخصات خودروی پراید شبیه سازی شده در ADVISOR

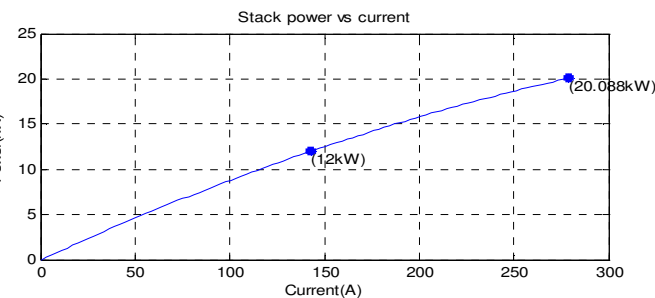
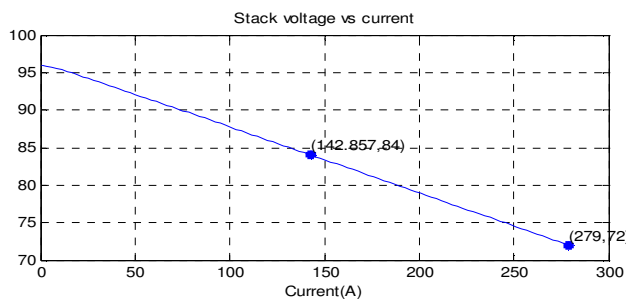
پارامتر	سمبل	واحد	مقدار
مجموع وزن	$M_t$	Kg	750
فاصله مرکز ثقل از محور جلو	$L_f$	m	1.197
فاصله مرکز ثقل از محور عقب	$L_r$	m	1.147
طول محورهای جلو و عقب	T	m	1.4
ضریب درآگ	$C_d$	$N.s^2/m^2$	0.41
سطح بادخور جلو	$A_F$	$m^2$	1.8
ضریب سختی طولی تایرها	$C_x$	N	17500
شعاع چرخها	$R_w$	m	0.272
اینرسی چرخ	$I_w$	$Kgm^2$	3.264
ضریب اصطکاک چرخ و جاده	$\mu_{peak}$	No unit	0.95



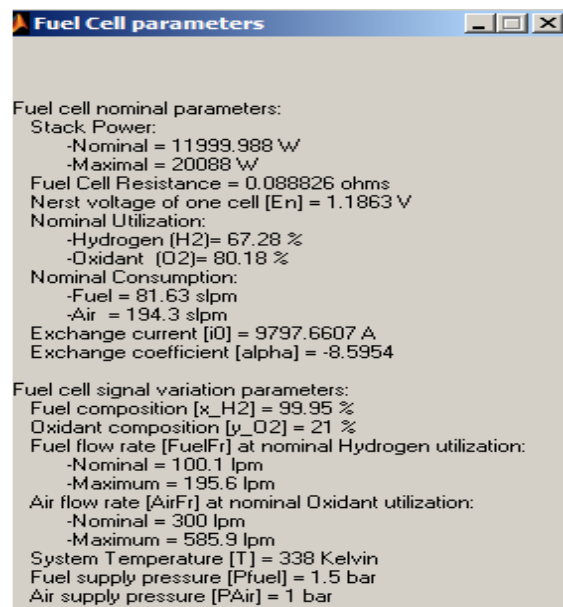


شکل ۷- قدرت درخواستی خودروی پراید در سیکل شهری INDIA نتیجه شده از شبیه سازی در ADVISOR

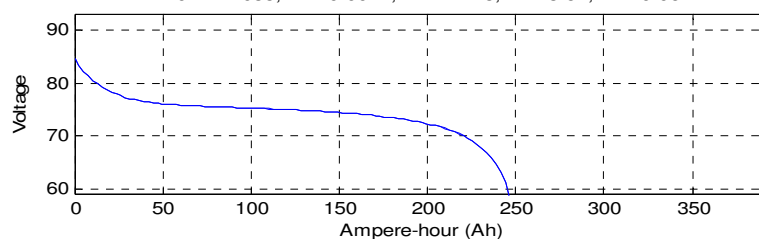
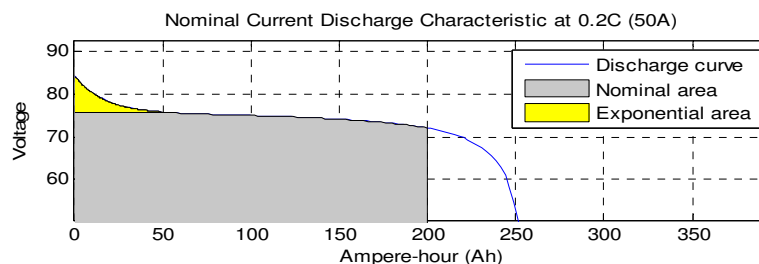
در شکل‌های ۸ و ۹ مشخصات پیل سوختی و باتری استفاده شده در شبیه سازی نشان داده شده است.



شکل ۸-ب- منحنی پیل سوختی

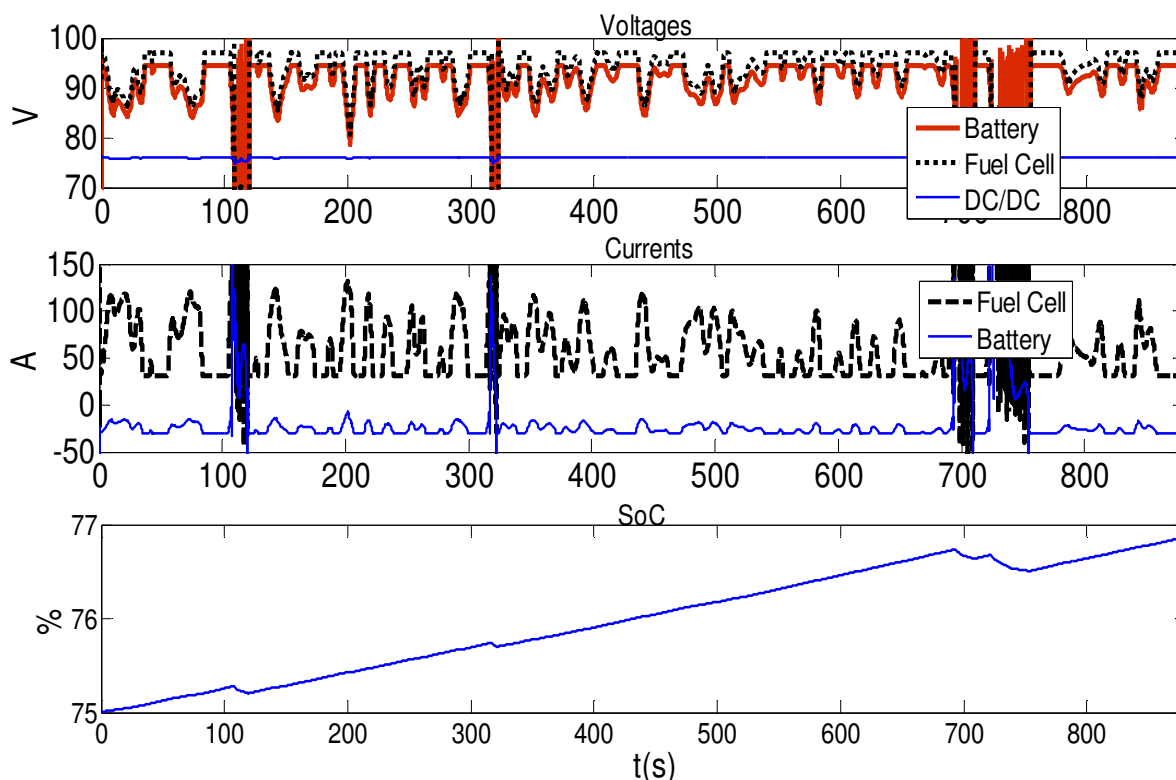


شکل ۸-الف- پارامترهای عددی پیل سوختی



شکل ۹- منحنی مشخصه و پارامترهای باتری نیکل-متال مورد استفاده در شبیه سازی

در شکل‌های زیر، نتایج حاصل از شبیه سازی به ازای حالت شارژ اولیه ای معادل با ۷۰٪، آورده شده و مشخص است که پیل سوختی با عملکردی که ناشی از کنترل کننده می باشد، حالت شارژ روندی صعودی داشته و در طول رانش به همراه پیل سوختی، در رانش خودرو مشارکت داشته است. در شکل ۱۰، جریان کشیده شده از باتری، جریان کشیده شده از پیل سوختی، حالت شارژ باتری، ولتاژ باتری، و ولتاژ خروجی از مبدل DC/DC نشان داده شده است. ضمن اینکه در شبیه سازی، برای جلوگیری از ایجاد جریان زیاد بین پیل سوختی و باتری که در اثر اختلاف ولتاژ بین خروجی باتری و پیل سوختی ایجاد می گردد، یک مقاومت کوچک در خروجی مبدل قرار داده شده است.



شکل ۱۰- نتایج حاصل از شبیه سازی به ازای حالت شارژ اولیه ۷۰٪

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از باتری و پیل سوختی، به طراحی یک استراتژی کنترلی برای شبیه سازی حرکت خودرویی با مشخصات پراید، در یک سیکل شهری پرداخته شد. در این مقاله بر خلاف نرم افزار شبیه ساز ADVISOR که به صورت استاتیکی است، مدل سازی باتری و پیل سوختی به صورت دینامیکی انجام شده و نتایج حاصل از شبیه سازی، بیانگر عملکرد مطلوب ساختار پیشنهادی در سیکل‌های رانشی شهری است.





۱۳۸۸ آبان ۲۸ و ۲۹  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران



3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



مراجع

- [1] A.Sciarretta, M.Back, L.Guzzella, "Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicle", IEEE Transaction on control system Technology. Vol. 12. No. 3. May 2004
- [2] S.Delpart, J.Lauber, T.Marie, J.Rimoux, "Control of a Parallel Hybrid Powertrain Optimal Control", IEEE Transaction on Vehicular Technology. Vol. 53. No. 3. May 2004
- [3] R.I.Davis, R.D.Lorenz, " Engine Torque Ripple Cancellation with an Integrated Starter Alternator in a Hybrid Electric Vehicle
- [4] ADVISOR Guide , Advisor, Vehicle simulation Program
- [5] Peyman. Naderi, Mojtaba. Mirsalim, S.M.Taghi. Bathaee, Driving/Regeneration and Stability Enhancement for a Two-Wheel Drive Electric Vehicle. *International Review of Electrical Engineering, (IREE Journal), Vol. 4, n.1, February 2009.*
- [6] Matlab2008 GUID, Power System Toolbox, Part of Electrical Source