

# طراحی، ساخت و بهینه سازی پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) برای به کارگیری در شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین

علی مختاری<sup>۱\*</sup>، احمد علی ربیع نتاج<sup>۲</sup>، ابراهیم علیزاده<sup>۳</sup>

۱- گرگان، دانشگاه گلستان، دانشکده فنی و مهندسی

۲- بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مکانیک

۳- فریدونکنار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری دفاعی شمال

پیام نگار: a.mokhtari@gu.ac.ir

## چکیده

این تحقیق شامل توسعه پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) جهت رانش شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین است. تک سلول ساخته شده، اولین نمونه ساخته شده داخلی است و به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت کار در یک سیکل بسته (الکترولیت گردان) را جهت استفاده در زیر آب داشته باشد و به راحتی بتوان آنرا به مقیاس‌های بزرگتر تبدیل کرد. در آزمایش‌های انجام شده، پارامترهای شیمیایی و دستگاهی سلول طی چند مرحله بهینه‌سازی شدند. در آزمایش‌های به عمل آمده از این سلول با مساحت ۷۵ سانتی متر مربع، توان حداکثر ( $W_{max}$ ) ده وات حاصل شد. در گام دوم، با توجه به نتایج حاصل از تک سلول، یک سری پیل سوختی با توان ۵۰۰ وات طراحی گردید که با توجه به وزن و حجم این سیستم و سوابقی که از استفاده از این پیل سوختی در جهان وجود دارد، امکان استفاده از این نوع پیل سوختی در شناورهای زیرسطحی داخلی وجود دارد.

کلمات کلیدی: سیستم رانش، شناور زیر سطحی، پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن)

## ۱- مقدمه

است. پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) جزو دسته پیل‌های (فلز-اکسیژن) می‌باشد که در آن از الکترولیت قلیایی (معمولاً پتاس)، کاتد هوا (با کاتالیزور پلاتین) و آلیاژهای آلومینیم با درجه خوردگی پایین در محیط قلیایی، استفاده می‌گردد. ولتاژ نظری سلول در حد ۲/۷۵ ولت است اما در عمل به (۱/۵-۱/۱) ولت کاهش می‌یابد که به دلیل تشکیل لایه اکسید بر روی سطح آند (آلومینیم) و ایجاد یک مقاومت درونی می‌باشد. از طرفی پلاریزه شدن الکترودها نیز یکی از دلایل این کاهش می‌باشند [۲]. واکنش‌های مرتبط با این پیل سوختی عبارت‌اند از:

اولین تلاش‌ها روی سیستم آلومینیم-هوا (اکسیژن) در اواخر دهه ۶۰ توسط زارومب<sup>۱</sup> انجام شد و از آن به بعد به عنوان پیل سوختی مطرح گردید و تاکنون از آن در انواع کاربردهای سطح بالا همچون دریایی و نظامی، استفاده شده است [۱]. آلومینیم به عنوان یک منبع انرژی که انرژی آن می‌تواند بارها و بارها بازیابی شود مطرح می‌باشد. این سوخت با توجه به فراوانی، ایمنی، انرژی بالا و قابلیت تولید مجدد، گزینه مناسبی جهت استفاده در پیل‌های سوختی

1. Zaromb

نفت در بستر دریاها و اقیانوس‌ها به کار گرفته می‌شوند [۵]. همچنین استفاده از این نوع پیل سوختی جزو برنامه‌های آینده مرکز تحقیقات دفاعی نیروی برای استفاده در مدل‌های نظامی شناورهای هیوجین گزارش شده است [۶]. پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن) در بسیاری از شناورها دارای انرژی بالا و توان متوسط می‌باشد که این حالت امکان عملیات طولانی (نوعاً ۶۰-۵۰ ساعت) را در سرعت‌های پایین (حدود ۷ کیلومتر بر ساعت) برای یک شناور زیرسطحی دو تنی در اعماق بیشتر از ۳۰۰۰ متر، فراهم می‌سازد.

سیستم (آلومینیم - اکسیژن) می‌تواند برای تامین توان در حد یک وات تا چند کیلووات مورد استفاده قرار گیرد. سلول (آلومینیم - اکسیژن) دارای چگالی انرژی حدود ۷۵ بار بیشتر از سلول‌های معمولی یون لیتیم معمولی می‌باشد و می‌تواند توان بیشتری در وسایل قابل حمل و نقل داشته باشند. این پیل سوختی می‌تواند از طریق تعویض کارتریج‌ها به صورت مکانیکی شارژ شود. در این کارتریج‌ها هم آلومینیم و هم الکترولیت جای داده می‌شود. در این حالت الکترولیت براساس وزن خود وارد فضای بین کاتد و آند آلومینیم می‌گردد. این پیل از لحاظ زیست محیطی سازگار، و چرخه عمر آن کامل است، یعنی قابل تجدید می‌باشد. همچنین ساختار ساده آن باعث می‌شود که با تغییر اندازه بتوان از آن در بیشتر کاربردها استفاده کرد.

در جدول (۱) مزایا و معایب کلی چند سیستم پیل سوختی به همراه پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن) جهت ارزیابی امکان استفاده آنها در شناورهای زیر سطحی آورده شده است:

از جمله مزایای این پیل سوختی، انرژی بسیار بالای آن است که امکان برد بالا را برای شناور فراهم می‌نماید. ضمن اینکه چگالی توان نیز در حد نسبتاً بالایی قرار دارد. یکی از معایب این نمونه پیل سوختی این است که برای دستیابی به توان‌های بالا، نیاز به محیط مایع و قلیایی غلیظ است که در این محیط آلومینیم وارد واکنش‌های خوردگی نیز می‌گردد که ضمن کم شدن توان آن، گاز هیدروژن تولید می‌شود که از ایمنی سیستم می‌کاهد. البته این مشکل هنگام استفاده از آلیاژهای خاص و ضد خوردگی مرتفع می‌گردد.

واکنش آندی

$$E^0 = -2.35V$$

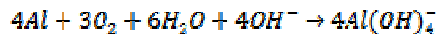
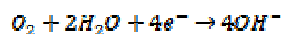
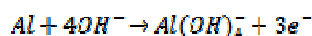
واکنش کاتدی

$$E^0 = +0.40V$$

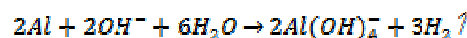
واکنش کلی

$$E^0 = 2.75V$$

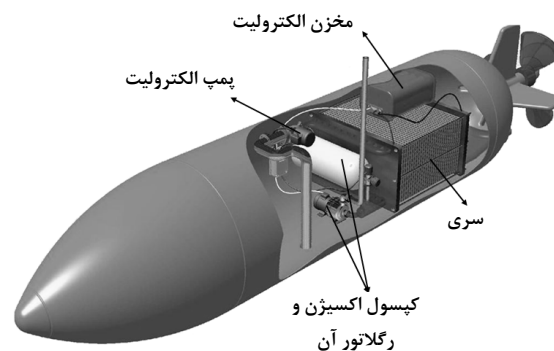
واکنش رسوب گذاری



واکنش خوردگی



پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن) به‌عنوان یکی از سیستم‌های رانش مستقل از هوا در شناورهای زیر سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳ و ۴]. این سیستم از سال ۱۹۸۹ تاکنون در شناورهای زیرسطحی مانند (ایکس پی-۲۱)، آلتکس<sup>۱</sup>، آرکس<sup>۲</sup>، هیوجین<sup>۳</sup> و شناورهای زیرسطحی دیگر مورد استفاده قرار گرفته است که علت آن مزایایی همچون زمان عملیات بالاتر در مقایسه با سایر باتری‌های معمولی مانند (سرب - اسید) می‌باشد. در شکل (۱) اجزای مختلف این پیل سوختی در یک شناور زیرسطحی بدون سرنشین نشان داده شده است.



شکل ۱- اجزای مختلف پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن) در شناور زیر سطحی بدون سرنشین

امروزه کاربرد ویژه این پیل سوختی در شناورهای زیر سطحی هیوجین و نقشه بردار دریا<sup>۴</sup> می‌باشد که جهت مطالعات در اعماق حداکثر ۴۵۰۰ متر زیر آب و در مطالعات زمین شناسی و اکتشاف

1. ALTEX
2. ARCS
3. HUGIN
4. C-Surveyor

جدول ۱- بررسی مشخصات چند پیل سوختی جهت کاربری زیرسطحی [۷ و ۸]

مزایا	معایب
دمای عملکرد پایین	نیاز به تنظیم دقیق دما و رطوبت
الکترولیت جامد	حساسیت نسبت به مونوکسید کربن
مقاوم در برابر خوردگی گازها	قیمت بالا به علت حضور کاتالیزور و الکترولیت جامد
طول عمر بالا	
بالاتر بودن چگالی جریان خروجی آن از تمامی پیل‌های شناخته شده	پایین بودن سرعت احیای اکسیژن روی کاتد هوا و کم شدن عملکرد
دسترسی سریع به حدود ۵۰٪ از حداکثر توان آن در دمای اتاق و حصول تمامی توان آن بعد از سه دقیقه	
چگالی تولید انرژی بالا	کند بودن واکنش در آند، نسبت به نوع هیدروژنی
ساده بودن سیستم	تولید توان پایین در مقایسه با نوع هیدروژنی
امکان شارژ سریع	نفوذ متانول از عرض الکترولیت جامد
سوخت متنوع	در مقابل تنش‌های حرارتی آسیب‌پذیر
تبدیل سوخت خام به هیدروژن، با استفاده از گرمای تولید شده توسط پیل (عدم نیاز به مبدل خارجی)	
عدم حساسیت به مونوکسید کربن و گوگرد	سخت بودن آب‌بندی سیستم و امکان نفوذ سوخت و اکسیدان از هر دو طرف به الکترولیت نازک
جامد بودن تمام اجزا و امکان ساخت پیل در اشکال مختلف	
عدم تخریب اجزا در اثر درجه حرارت بالا	
عدم نیاز به تزریق مجدد الکترولیت	
بازدهی بالا	
محلول الکترولیت قیمت پایین هیدروکسید پتاسیم	گرانی کاتالیزورهای پلاتینی عامل قیمت بالا
پیل‌های سوختی قلیایی	حساسیت به وجود ناخالصی در گازهای استفاده شده
	بسته شدن منافذ تحت تاثیر تشکیل یون $\text{CO}_3^{2-}$
	حساسیت به نوسان
بالاترین بازدهی (۵۰ تا ۷۰ درصد)	عدم مقاومت مواد در دماهای بالا
دارای رفرمر داخلی برای هیدروژن یا متان	
عدم استفاده از فلزات خنثی در لایه کاتالیزوری عامل	دمای کاری بالا
افزایش سرعت واکنش اکسیژن در دماهای بالا	
عدم وجود اثرات منفی مونوکسید و دی‌اکسید کربن	
دمای کار پایین (۸۰-۶۰ درجه سلولسیوس)	پیچیده بودن سیستم
طول عمر بالا (۱۰ سال در صورت عدم تماس الکترولیت و آند آلومینیم)	الکترولیت مایع
زمان راه اندازی سریع	خوردگی آلومینیم در حضور الکترولیت قلیایی
امکان شارژ سریع	
چگالی انرژی بالا	نیاز به کنترل هیدروژن، ذرات جامد و دما جهت بهبود کارایی

## ۲-۲ طرح تک سلول

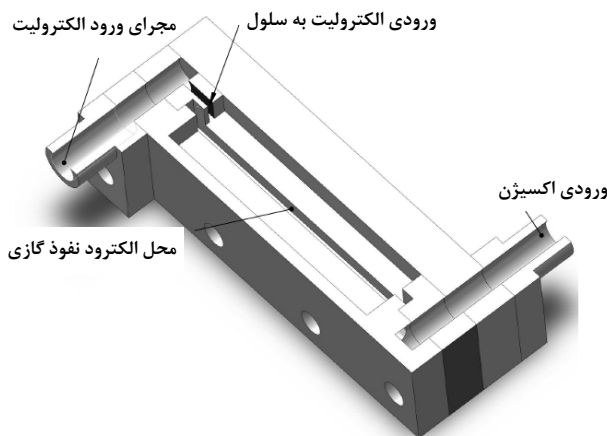
برای ساخت تک سلول ملاحظات ذیل در نظر گرفته شد:

- کل تک سلول از ۴ قطعه تشکیل شده است.
  - مجاری ورود و خروج الکترولیت و اکسیژن در بدنه تک سلول تعبیه شده‌اند.
  - در سری نهایی، سلول‌ها بدون هیچ سیم موصلاتی خارجی (یعنی از داخل) با هم ارتباط الکتریکی دارند.
- نمای تک سلول ساخته شده، در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمای تک سلول ساخته شده

در شکل (۳) و (۴) نیز نماهای برش خورده تک سلول از جهات مختلف ملاحظه می‌گردد.



شکل ۳- نمای برش خورده افقی تک سلول

با توجه به این مشخصات، می‌توان از این پیل سوختی در شناورهای زیرسطحی کوچک جهت کسب اطلاعات از فواصل دور و ارسال آن به مرکز برای اتخاذ تاکتیک مناسب استفاده کرد. در این کشور تاکنون در زمینه طراحی، ساخت و یا استفاده از این پیل سوختی تجربه‌ای وجود نداشته و پیل سوختی ساخته شده و مدل طراحی شده اولین نمونه‌ها در کشور هستند.

## ۲- بخش تجربی

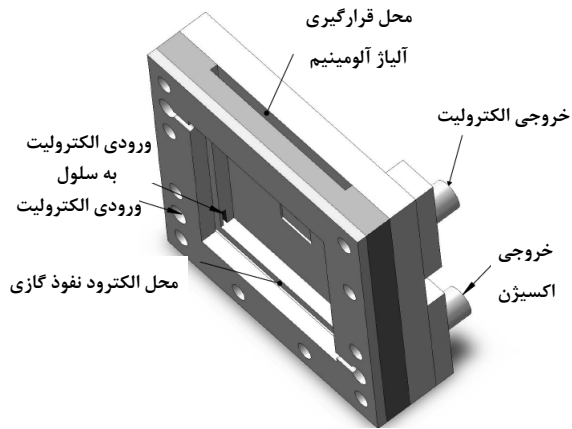
این بخش شامل مواد مورد استفاده، نقشه‌های ساخت و نحوه انجام آزمایشات می‌باشد.

### ۱-۲ مواد و روش‌ها

در کلیه آزمایش‌ها از مواد شیمیایی خالص تجزیه‌ای و آب مقطر استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده در فاز طراحی مفهومی مشخص شد که آلیاژ آلومینیم با کد استاندارد ۱۰۵۰ با توجه به خلوص و حضور گونه‌های ضد خوردگی و در دسترس بودن، مناسب‌تر از سایر ترکیبات آلومینیم است. لذا از یک ورق آلیاژ آلومینیم ۱۰۵۰ به ضخامت ۴ mm استفاده شد و طراحی سلول نیز براساس همین نمونه انجام گردید. با توجه به سوابقی که در جهان در بهینه‌سازی نوع الکترولیت انجام شده بود، بهترین الکترولیت بین الکترولیت‌های خنثی و قلیایی، الکترولیت پتاس<sup>۱</sup> ساخت شرکت مرک آلمان انتخاب گردید و مورد استفاده قرار گرفت. جهت ساخت بدنه سلول نیز از ورق‌های پلکسی گلاس ساخت تایلند با ضخامت ۲ cm، بخاطر قابلیت تراشکاری، نشت‌گیری و همچنین بخاطر عایق بودن الکتریکی استفاده گردید. جهت تامین اکسیژن نیز از مخازن گاز اکسیژن آزمایشگاهی استفاده شد.

از کاتد هوا (الکترود نفوذ گازی<sup>۲</sup>) ساخت شرکت (ای-تک)<sup>۳</sup> نیز در ساخت تک سلول استفاده شد. مقدار پلاتین بارگذاری شده در این کاتد، بر روی ولکان (ایکس سی-۷۲)<sup>۴</sup> به میزان  $0.50 \text{ mg cm}^{-2}$  می‌باشد. این محصول از شرکت فیول سلول استوری<sup>۵</sup> خریداری گردید.

1. KOH
2. Gas Diffusion Electrode (GDE)
3. E-TEK
4. Vulcan XC-72
5. Fuel Cell Story



شکل ۴- نمای برش خورده عمودی تک سلول

اندازه‌گیری جریان استفاده شده است. برای رسم منحنی نیز از مقاومت‌های الکتریکی در مسیر عبور جریان استفاده شد. برای کم کردن افت ولتاژ مربوط به مدار اندازه‌گیری، کلیه مدارها و کابل‌های ارتباطی در کوتاه‌ترین اندازه و ضخیم‌ترین حد ممکن انتخاب شدند. برای کم کردن مقاومت اتصال نیز، ورق آلومینیم سوراخ شد و اتصال الکتریکی با استفاده از پیچ و مهره برقرار گردید. برای برقراری ارتباط الکتریکی از کاتد، یک ورق مسی در پشت کاتد قرار گرفت و از نقاط مختلف ورق مسی، اتصالات الکتریکی برقرار، و به کابل مربوطه وصل گردید. برای رساندن اکسیژن نیز از یک شلنگ پلی اتیلنی استفاده شد که اکسیژن را از مخزن به پشت الکترود کاتد انتقال می‌دهد. برای گردش الکترولیت نیز از یک سیستم شیشه شوی اتومبیل استفاده شد و بهینه‌سازی شدت جریان از طریق تغییر ولتاژ یک آداپتور انجام پذیرفت (به گونه‌ای که باعث پارگی کاتد هوا نشده و توان خارج نمودن رسوبات تشکیل شده حین واکنش را از فضای بین آند و کاتد نیز داشته باشد).

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تاثیر ترکیب ورق آلومینیم

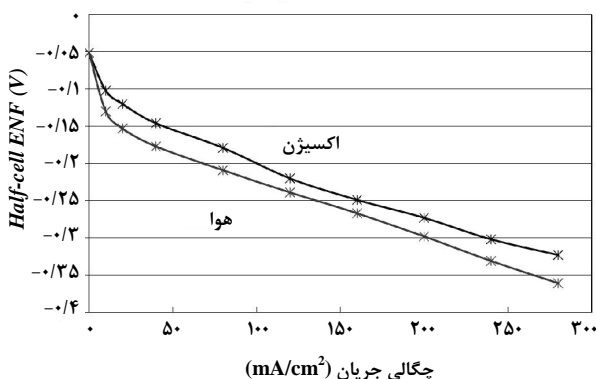
برای بررسی تاثیر جنس ورق آلومینیم، سه نوع ورق مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا از ورق‌های در و پنجره سازی با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. این ورق‌ها با توجه به داشتن مقادیر زیاد آهن و مس به شدت در محیط قلیایی غلیظ، واکنش‌پذیر بوده و تولید مقدار زیادی هیدروژن می‌نمایند بطوری که سهم عمده‌ای از جریان صرف این واکنش الکتروشیمیایی می‌شود و کارایی به شدت کاهش می‌یابد. ضمن اینکه با توجه به بسته بودن محیط گردش الکترولیت، فشار مضاعفی در سیستم ایجاد و باعث نشی می‌گردد، همچنین تولید چنین حجمی از هیدروژن، خطر انفجار را به دنبال خواهد داشت. لذا این گزینه کنار گذاشته شد. در آزمایش بعدی از فویل آلومینیم چند لایه استفاده گردید. این فویل‌ها دارای درجه خلوص بالایی هستند اما ولتاژ کار آنها از ولتاژ آلیاژ استاندارد آلومینیم با کد ۱۰۵۰ پایین‌تر بود. در شکل (۵) منحنی (جریان-ولتاژ) مربوط به آلیاژ ۱۰۵۰ و فویل آلومینیومی استفاده شده، آورده شده است. آلیاژ آلومینیم ۱۰۵۰ دارای مقادیر اندکی منیزیم است که فرایند خوردگی آلومینیم در محیط قلیایی را کاهش داده و کارایی

این تک سلول به گونه‌ای طراحی شده است که امکان گردش الکترولیت جهت افزایش ظرفیت انرژی و خروج ذرات جامد فراهم گردد. ضمن اینکه اکسیژن و الکترولیت از مجاری مخصوص وارد شده و پس از انجام واکنش، از مجرای متناظر در پشت سلول خارج می‌گردند. این طراحی به گونه‌ای انجام شده است که سری شدن به سهولت امکان‌پذیر باشد. برای اینکار، دو قطعه اصلی تک سلول، به صورت تکراری و پشت سرهم به یکدیگر پیچ و مهره می‌شوند و در دو طرف سری نیز صفحات انتهایی قرار می‌گیرند. این تک سلول به گونه‌ای طراحی شده است که امکان تعویض ورق آلومینیم بصورت کشویی و سریع وجود داشته باشد. لذا در صورت مصرف آلومینیم، و نیاز به تعویض آن، احتیاجی به باز کردن کل سری نیست بلکه ورق آلومینیمی که بیشتر آن مصرف شده است به راحتی از جای خود خارج شده، و ورق جدید جایگزین آن می‌شود. این تک سلول با ابعاد ۱۲ در ۱۲ سانتی‌متر، به گونه‌ای ساخته شده که سطح موثر تک سلول بعد از اتصال کاتد هوا به تک سلول در حد ۷۵ سانتیمتر مربع بود.

#### ۳-۲ نحوه انجام آزمایش‌ها

این آزمایش‌ها به منظور بررسی و بهبود توان خروجی تک سلول انجام گردید. آزمایش‌ها در چند مرحله انجام شد و تاثیر استفاده از اکسیژن بجای هوا، تاثیر غلظت الکترولیت و نوع آلیاژ آلومینیم بررسی گردیده است. برای رسم منحنی‌های (جریان-ولتاژ) از دو مولتی‌متر حساس با دامنه جریان بالای ۱۰ آمپر استفاده گردید. از یکی از مولتی‌مترها برای اندازه‌گیری ولتاژ و از دیگری برای

به هنگام استفاده از اکسیژن بجای هوا افزایش می یابد که این امر را می توان بخاطر حضور غلظت بالاتر اکسیژن دانست که باعث می شود میزان جریان در یک ولتاژ مشخص، هنگام استفاده از اکسیژن خالص، بیشتر باشد.



شکل ۷- مقایسه اکسیژن بجای هوا در کاتد هوا مدل AC65. محلول ۵ مولار KOH و استفاده از الکتروود

مرجع (Hg/HgO) [۹]

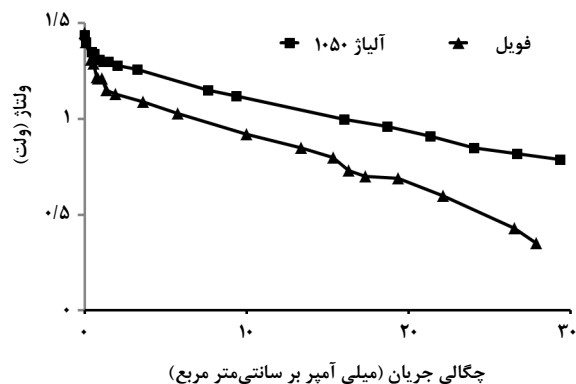
### ۳-۳ تأثیر نوع و غلظت الکتروولیت قلیایی

از بین الکتروولیت های مورد استفاده مانند NaCl، KOH و NaOH، KOH الکتروولیت مناسب تری است زیرا هدایت آن زیاد و قابلیت انحلال آلومینیم در آن بیشتر است [۳].

محلول الکتروولیت پتاس با غلظت حدود ۵ مولار همانگونه که در تحقیقات نیز ذکر شده بود [۳]، کارایی بیشتری نسبت به محلول ۲/۷ و ۹ مولار از خود نشان داد (شکل ۸). همانگونه که در شکل ۸) زیر ملاحظه می شود، منحنی (ولتاژ- جریان) مربوط به محلول ۵/۳ مولار بالاتر از دو منحنی دیگر قرار گرفته است. بدین معنی که در یک جریان ثابت، ولتاژ بیشتری بدست آمده است.

این نکته قابل توجه است که هنگام استفاده از الکتروولیت KOH، بهتر است غلظت آلومینات محلول (یا  $Al(OH)_4^-$ ) پایین نگه داشته شود زیرا دارای هدایت پایین تری نسبت به یون  $OH^-$  است. زمانیکه غلظت آلومینات کاهش می یابد، کریستال های  $Al(OH)_3$  تشکیل می شوند و رسوب می کنند در نتیجه  $OH^-$  اضافی به محیط برمی گردد. بنابراین اگر  $Al(OH)_3$  رسوب کرده از محیط خارج شود، هدایت الکتروولیت ثابت باقی می ماند [۷].

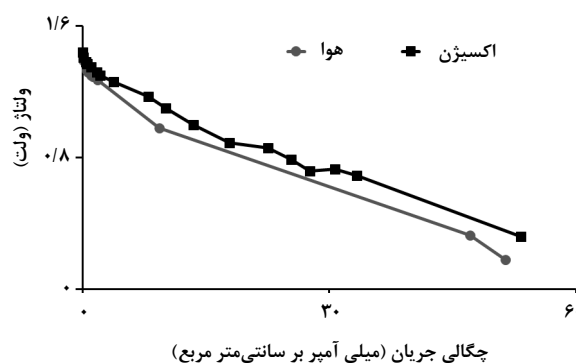
الکتروشیمیایی (یا دشارژ) را افزایش می دهد. ضمن اینکه دارای ضخامت ۴ میلی متر است که طبق محاسبات قابلیت استفاده طی حداقل ۳۰ ساعت را دارا می باشد.



شکل ۵- مقایسه کارایی ورق آلیاژ آلومینیم شماره ۱۰۵۰ در مقایسه با فویل آلومینیمی چند لایه

### ۳-۲ تأثیر استفاده از اکسیژن بجای هوا

همانگونه که در شکل (۶) ملاحظه می شود، استفاده از اکسیژن بجای هوا تأثیر قابل توجهی در افزایش ولتاژ دارد (حدود ۰/۲ ولت افزایش). این نتیجه با نتایج بدست آمده از ارزیابی کاتد هوای (GDE) ساخت شرکت الوپاور<sup>۱</sup> (مدل AC-65) همخوانی دارد (شکل (۷)).

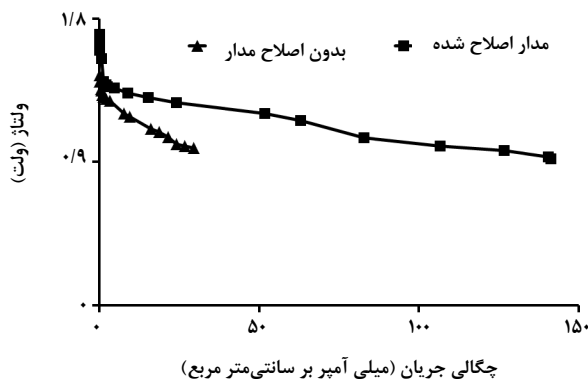


شکل ۶- مقایسه اکسیژن بجای هوا در تک سلول پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن) ساخته شده

همانگونه که در دو شکل (۶) و (۷) ملاحظه می شود، کارایی سلول

1. Alupower

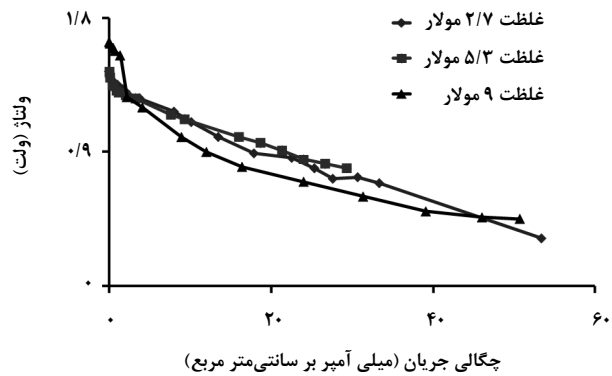
مشخص شد که این کمبود مربوط به افت ولتاژی است که در جریان‌های بالا اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه در بارگذاری‌های کم (یعنی زمانی که مقاومت‌های قرار داده شده در مسیر جریان کوچک هستند) جریان بالایی در حد ۱۰ آمپر از مدار گذر می‌کند، لذا کوچکترین افزایش در مقاومت در مسیر حرکت الکترون‌ها، باعث ایجاد افت ولتاژ (IR) قابل ملاحظه‌ای می‌شود که از کارایی سیستم می‌کاهد. بنابراین برای اصلاح مدار به گونه‌ای عمل شد که مسیرهای عبور جریان تا حد امکان کوتاه باشند. همچنین اتصالات به نحو موثری بهبود یافتند. به عنوان مثال برای گرفتن اتصال از آند آلومینیمی، این ورقه سوراخ شد و اتصال با استفاده از پیچ و مهره برقرار گردید. یکی از مشکلات، گرفتن اتصال از کاتد هوا بود که برای اینکار نیز از یک ورق مسی استفاده شد که به پشت کاتد هوا متصل گردید و اتصالات به نقاط مختلف آن برقرار گردید. در شکل (۹) نمودار (جریان-ولتاژ) مربوط به تک سلول ساخته شده قبل و بعد از اصلاح مدار الکتریکی نشان داده شده است. در شکل (۱۰) نیز نمودار (جریان-ولتاژ-توان) مربوط به تک سلول که در آزمون نهایی بدست آمده است، ملاحظه می‌گردد. با توجه به این نمودار، توان حداکثر ۱۰ وات از این تک سلول حاصل شده است و در ولتاژ ۱/۰ ولت، توان سلول در حد ۸/۴ وات می‌باشد (به عبارتی، به ولتاژ ۱/۰ ولت در چگالی جریان  $112 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$  دست یافته شده است).



شکل ۹- مقایسه ولتاژ سلول قبل و بعد از اصلاح مدار الکتریکی تک سلول

۳-۵ طراحی سیستم پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) ۵۰۰ وات

با توجه به شناورهای زیرسطحی بدون سرنشین که توان مصرفی آنها



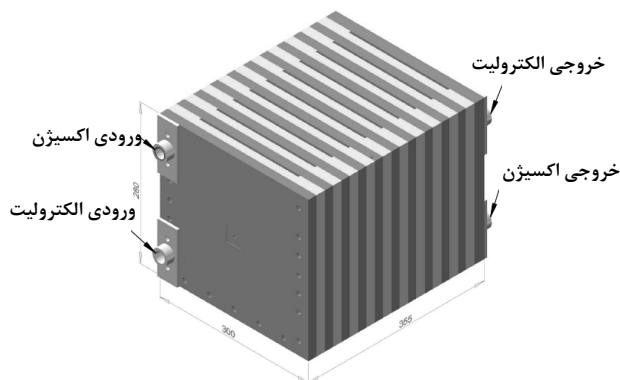
شکل ۸- بررسی تاثیر الکترولیت قلیایی پتاس بر کارایی تک سلول پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن)

بنابراین، بهبود در کارایی محلول ۵ مولار را می‌توان مربوط به هدایت بالاتر این محلول نسبت به دو محلول دیگر دانست. در محلول ۹ مولار رسوب  $\text{Al(OH)}_3$  به خاطر حضور غلظت بالای یون هیدروکسید به شکل یون  $\text{Al(OH)}_4^-$  محلول تبدیل می‌شود. بنابراین در محلول ۹ مولار رسوب تشکیل نمی‌شود و سطح آلومینیم با رسوب پوشانده نمی‌شود لذا افت ولتاژ و جریان بخاطر پوشیده شدن سطح آند کمتر اتفاق می‌افتد در عوض در محلول ۹ مولار یون  $\text{OH}^-$  با تحرک بالا مصرف می‌شود و به همان تعداد یون  $\text{Al(OH)}_4^-$  کم تحرک تولید می‌گردد. بنابراین هدایت و کارایی محلول ۹ مولار کمتر از محلول ۵ مولار است که در آن یون  $\text{Al(OH)}_4^-$  بسیار کم تولید می‌شود و یون پر تحرک  $\text{OH}^-$  عهده‌دار هدایت محلول است. اما این نکته را باید مد نظر داشت که در محلول ۵ مولار رسوبات تشکیل شده بایستی با استفاده از سیرکوله شدن خارج شوند. در تک سلول ساخته شده خروج رسوبات از طریق سیرکوله شدن، انجام شد. محلول ۲/۷ مولار نیز بخاطر غلظت پایین تر یون  $\text{OH}^-$  هدایت کمتری نسبت به محلول ۵/۳ مولار دارد. بنابراین کمتر بودن کارایی آنرا می‌توان به این امر مرتبط دانست.

### ۳-۴ تأثیر بهینه سازی مدارها و اتصالات

با توجه به اینکه برای دستیابی به حداکثر توان تک سلول بایستی از مقاومت‌های الکتریکی کوچکتری در مدار استفاده شود و سپس تغییرات (جریان-ولتاژ) دنبال گردد، اگر خود مدار و اتصالات دارای مقاومت باشند، توان واقعی سلول قابل دستیابی نخواهد بود زیرا افت ولتاژ اهمی (IR) قابل توجه است. در آزمون‌های اولیه مشخص شد که مقادیر دستیابی شده پایین تر از مقادیر مورد انتظار هستند و

بنابراین تعداد سلول‌های یک مجموعه ۵۰۰ وات با مشخصات بالا ۱۰ سلول می‌باشد. در شکل (۱۱) نمای کلی از سری ۱۰ سلولی پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن) با توان ۵۰۰ وات نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمای کلی از سری ۱۰ سلولی پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن) با توان ۵۰۰ وات

ابعاد خارجی این سری ۲۸۰×۳۰۰×۳۵۵ میلی‌متر می‌باشد که معادل با ۳۰ دسی‌متر مکعب است.

### ۳-۵-۲ محاسبه وزن و حجم آلومینیم مورد نیاز

وزن آلومینیمی که در هر ساعت، طی الکترولیز در یک سلول مصرف می‌شود، بصورت زیر محاسبه می‌گردد (F: فاراد=۲۶/۸ آمپر ساعت):

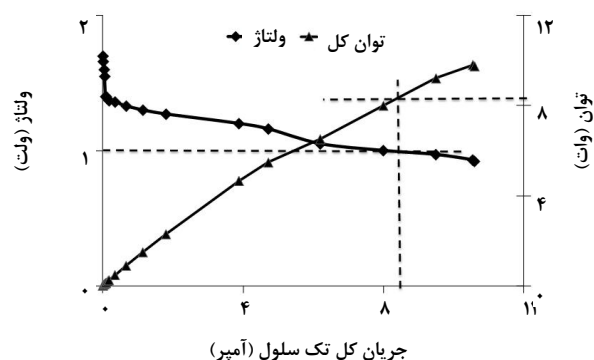
$$gAl = n_{Cell} \times \frac{400cm^2}{1Cell} \times \frac{0.1A}{cm^2} \times \frac{1F}{26.8Ah} \times \frac{1mol e}{1F} \times \frac{1mol Al}{3mol e} \times \frac{27gAl}{1mol Al} = 13.5 \frac{g}{hr}$$

۱۳/۵ گرم آلومینیم در هر ساعت مصرف می‌شود. بنابراین ضخامت آلومینیم مصرف شده (با توجه به چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بعد از یک ساعت برای هر تک سلول بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{cmAl}{h} = \frac{13.5gAl}{h} \times \frac{1cm^3}{2.7gAl} \times \frac{1}{400cm^2} = 0.0125 \frac{cm}{h}$$

در نتیجه به ازای هر ساعت کار، با چگالی جریان ۰/۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع، ضخامت آلومینیم حداقل بایستی ۵ برابر این مقدار

معمولاً بین ۱۰۰ وات تا چند کیلو وات است، تصمیم بر آن شد تا پیش‌بینی‌ها برای یک سیستم ۵۰۰ وات که قابلیت استفاده در زیر سطح را داشته باشد، انجام گیرد تا امکان‌پذیری استفاده از این پیل سوختی با توجه به وزن و حجم آن در یک شناور زیرسطحی بررسی گردد. جهت برآورد مشخصه‌های یک سری ۵۰۰ وات از پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن)، محاسبات این بخش با توجه به داده‌های تجربی بدست آمده از تک سلول ساخته شده و مشخصات فیزیکی آن صورت گرفت تا ابعاد، وزن و قیمت تقریبی یک سری ۵۰۰ وات تخمین زده شوند.



شکل ۱۰- نمودار (جریان - ولتاژ - توان) تک سلول با مساحت ۷۵ سانتی‌متر مربع

### ۳-۵-۱ تخمین تعداد سلول برای یک سری پیل سوختی

#### (آلومینیم - اکسیژن) ۵۰۰ وات

تعداد سلول‌ها در صورت استفاده از تک سلول ساخته شده با ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر، با چگالی جریان ۱۰۰ میلی آمپر بر سانتی متر مربع و دستیابی به ولتاژ ۱/۲۵ ولت، به‌صورتی که در جدول (۲) آورده شده است، محاسبه می‌گردد:

جدول ۲- محاسبه تعداد سلول در پیل سوختی (آلومینیم - اکسیژن)

$A=20cm \times 20cm=400cm^2$	سطح فعال هر سلول
$I=(100mA/cm^2) \times 400cm^2=40A$	جریان بدست آمده از هر سلول
$P=I \times V=40 \times 1/25=50W$	توان قابل دریافت از هر سلول
No. of Cells=500÷50=10	تعداد سلول برای مجموعه سری ۵۰۰ وات



جریان بالاتر برای خارج سازی ذرات جامد نیاز خواهد بود. با توجه به مطالعات انجام شده [۱۰] می توان شدت جریان الکترولیت را حدود ۲/۵ لیتر در دقیقه در نظر گرفت.

### ۳-۵-۵ محاسبه حجم الکترولیت مورد نیاز

با در نظر گرفتن فاصله ۸ میلیمتری بین آند و کاتد در هر تک سلول، همچنین عرض و ارتفاع ۲۰ سانتیمتری، حجم کل الکترولیت مورد نیاز برای تک سلول بصورتی که در جدول (۳) آمده است، محاسبه می شود.

با توجه به مقدار شدت جریان (۲/۵ لیتر بر دقیقه) و زمان لازم برای سیرکوله شدن الکترولیت و ته نشست رسوبات، لازم است حجم کل حداقل ۴ برابر حجم بالا در نظر گرفته شود. بنابراین حجم کل الکترولیت حدود ۱۵ لیتر به وزن ۲۳ کیلوگرم خواهد شد. مشخصات نهایی برآورد شده برای سیستم ۵۰۰ وات پیپل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) در جدول (۴) ارائه شده است.

### جدول ۳- محاسبات مربوط به حجم الکترولیت مورد نیاز

$V(\text{cell}) = 0.2 \times 0.2 \times 0.08 = 0.0032 \text{ m}^3$	حجم هر سلول (فاصله بین آند و کاتد ۸ میلیمتر)
$V(\text{cells or stack}) = 0.0032 \times 10 = 0.032 \text{ m}^3$	حجم کل سلول ها (۱۰ عدد سلول)
$V(\text{manifold}) = (3/14 \times 0.1^2) \times 0.35 \times 2 = 0.0022 \text{ m}^3$	حجم تقریبی الکترولیت در مجراهای سری ۵۰۰ وات (قطر مجرا ۲۰ میلیمتر و طول ۳۵۰ میلیمتر برای ۲ مجرای ورودی و خروجی)
$V(\text{tube}) = (3/14 \times 0.1^2) \times 1 = 0.00314 \text{ m}^3$	حجم تقریبی الکترولیت موجود در شلنگ های رابط مخزن به سری (به قطر ۲۰ میلیمتر و طول تقریبی ۱۰۰ سانتیمتر)
$V(\text{total}) = V_{\text{manifold}} + V_{\text{tube}} + V_{\text{cells, stack}} = 0.03734 \text{ m}^3$	حجم کل الکترولیت

یعنی حدود ۰/۰۶۳ سانتی متر باشد تا اثرات خوردگی آلومینیم که در دو سطح روبروی کاتد و پشت آن اتفاق می افتد نیز جبران گردد. بنابراین وزن ورق آلومینیم برای ۱۰ سلول ۶۸۰ گرم و حجم آن ۲۵۲ سانتی متر مکعب به ازای هر ساعت می باشد. در ساخت سری ۱۰ سلولی پیپل سوختی (آلومینیم-اکسیژن)، براساس طراحی تک سلول انجام شده، از ورق آلومینیم با ضخامت ۴ میلیمتر استفاده خواهد شد. که این مقدار برای حداقل ۳۰ ساعت کار کافی خواهد بود.

### ۳-۵-۳ محاسبه میزان اکسیژن مصرفی

میزان اکسیژن مصرفی در پیپل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) ۵۰۰ وات بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$\text{LitO}_2 = 10\text{Cell} \times \frac{0.1\text{A}}{\text{cm}^2} \times 400\text{cm}^2 \times \frac{1\text{F}}{26.8\text{Ah}} \times \frac{1\text{mol } e}{1\text{F}} \times \frac{1\text{molO}_2}{4\text{mol } e} \times \frac{22.4\text{LitO}_2}{1\text{molO}_2} = 84 \frac{\text{LitO}_2}{\text{hr}}$$

در پیپل سوختی ۱۰ سلولی با فرض اینکه در هر سطح ورق آلومینیم خوردگی کمتر از ۵ میلی آمپر بر سانتی متر مربع باشد:

$$\text{LitH}_2 = 10\text{Cell} \times \frac{0.005\text{A}}{\text{cm}^2} \times 400\text{cm}^2 \times \frac{1\text{F}}{26.8\text{Ah}} \times \frac{1\text{mol } e}{1\text{F}} \times \frac{1\text{molH}_2}{2\text{mol } e} \times \frac{22.4\text{LitH}_2}{1\text{molH}_2} \times 2 = 17 \frac{\text{LitH}_2}{\text{hr}}$$

ضریب ۲ در انتهای معادله فوق جهت در نظر گرفتن دو سطح رو و پشت ورق آلومینیم اضافه شده است زیرا خوردگی در هر دو سطح اتفاق می افتد. بنابراین حدود ۸/۵ لیتر اکسیژن جهت تبدیل هیدروژن به آب مورد نیاز است (به ازای هر ۲ مول هیدروژن ۱ مول اکسیژن مصرف می شود). پس حداقل میزان اکسیژن لازم به ازای هر ساعت ۹۲/۵ لیتر است (۸/۵ لیتر جهت تبدیل هیدروژن به آب و ۸۴ لیتر برای واکنش تخلیه).

### ۳-۵-۴ شدت جریان الکترولیت

در پیپل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) ۵۰۰ وات، جهت افزایش کارایی، غلظت بهینه الکترولیت حدود ۴/۵ تا ۵ مولار انتخاب خواهد شد که در این غلظت ذرات جامد تشکیل می شوند بنابراین به شدت

جدول ۴- مشخصات نهایی برآورد شده سیستم ۵۰۰ وات  
پیل سوختی (آلومینیم- اکسیژن)

مشخصه	توضیحات
تعداد سلول	۱۰ عدد
ابعاد سری	۳۰۰×۲۸۰×۳۵۵ میلیمتر
حجم سری	۳۰ دسی متر مکعب <sup>۱</sup>
اندازه کاتد	۲۲×۲۲ سانتیمتر
سطح موثر کاتد	۴۰۰ سانتی متر مربع
ولتاژ	۱۲/۵ ولت
جریان	۴۰ آمپر
دمای کارکرد	۶۰-۸۰ درجه سانتی گراد
وزن آلومینیم مصرفی	۰/۶۸۰ کیلوگرم برای هر ساعت
حجم آلومینیم مصرفی	۲۵۲ سانتیمتر مکعب برای هر ساعت
مقدار هیدروژن تولید شده	۱۷ لیتر بر ساعت
حجم مبدل هیدروژن	۵/۵ دسی متر مکعب
حداقل حجم اکسیژن لازم	۹۲/۵ لیتر بر ساعت
حجم سیلندر اکسیژن	۲۵ دسی متر مکعب
وزن سیلندر اکسیژن پر و رگولاتور	۲۲ کیلوگرم
حجم مخزن الکترولیت	۲۰ لیتر
حجم الکترولیت	۱۵ لیتر
وزن الکترولیت، مخزن و پمپ آن	۲۵ کیلوگرم
دبی کل الکترولیت	۲/۵ لیتر بر دقیقه
وزن سایر موارد (رابطها، کاتدهای هوا و ...)	حداکثر ۱ کیلوگرم

در جدول (۵) و جدول (۶) به ترتیب مشخصات حجم و وزن سیستم پیل سوختی (آلومینیم- اکسیژن) برای ۱۲ ساعت کار آورده شده است. مقادیر محاسبه شده بدون در نظر گرفتن قطعات الکترونیکی و فضای خالی بین قطعات مختلف می باشد. در جدول (۷) نیز برآورد هزینه نهایی ساخت یک سری پیل سوختی ۵۰۰ وات ملاحظه می شود.

1. Equivalent to 1000 Cubic Centimeter

جدول ۵- حداقل حجم سیستم پیل سوختی (آلومینیم- اکسیژن)  
۵۰۰ وات برای ۱۲ ساعت کار مداوم

مشخصه	حجم (دسی متر مکعب)
حجم کل سری حاوی کاتد هوا و آلومینیم	۳۰
حجم مخزن الکترولیت	۲۰
حجم پمپ و چند راهه	۱
حجم سیلندر اکسیژن و رگولاتور	۲۶
حجم مبدل هیدروژن	۵/۵
حجم کل	۸۲/۵

جدول ۶- حداقل وزن سیستم پیل سوختی (آلومینیم- اکسیژن)  
۵۰۰ وات برای ۱۲ ساعت کار مداوم

مشخصه	وزن (کیلوگرم)
وزن سری خالی و کاتدهای هوا	۳۰
وزن مخزن الکترولیت، الکترولیت، پمپ و چندراهه	۲۵
وزن سیلندر اکسیژن پر و رگولاتور	۲۲
وزن مبدل هیدروژن	۱۰
وزن آلومینیم	۸/۲
وزن کل	۹۵/۲

جدول ۷- تخمین قیمت ساخت یک سری ۱۰ سلولی سیستم پیل سوختی (آلومینیم- اکسیژن) با توان ۵۰۰ وات جهت استفاده طی ۱۲ ساعت کار مداوم

اجناس یا خدمات	مقدار یا تعداد	هزینه تقریبی (ریال)
ورق پلکسی گلاس	۴ متر مربع	۸۰۰۰۰۰
تراشکاری و ماشینکاری	سری ۱۰ سلول	۵۰۰۰۰۰۰
کاتد هوا	۱۰ عدد	۴۰۰۰۰۰۰
ورق آلیاژ آلومینیم	۲ متر مربع	۸۰۰۰۰۰۰
سیلندر اکسیژن	۱ عدد	۱۵۰۰۰۰۰
رگولاتور گاز اکسیژن	۱ عدد	۹۵۰۰۰۰
شارژ اکسیژن	هر بار	۳۰۰۰۰۰
الکترولیت	۱۰ کیلو گرم	۴۰۰۰۰۰۰
مواد افزودنی به الکترولیت	۰/۵ کیلوگرم	۵۰۰۰۰۰۰
مخزن الکترولیت و چندراهه	۱ سری	۲۵۰۰۰۰۰
پمپ الکترولیت	۱ عدد	۲۰۰۰۰۰۰
سایر هزینه ها	۵ درصد کل	۶۰۰۰۰۰۰
جمع		۱۲۶۰۰۰۰۰

قیمت ها در جدول (۷) مربوط به آبان ۱۳۸۹ می باشد.

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق یک نمونه تک سلول پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) برای نخستین بار در کشور طراحی و ساخته شد. این تک سلول به گونه‌ای طراحی شده که قابلیت‌های استفاده در شناورهای زیرسطحی را داشته باشد. بدین ترتیب که قابلیت استفاده در یک محیط بسته را از طریق گردش الکترولیت و خروج رسوبات تشکیل شده از فضای سلول داشته و توان آنرا به راحتی بتوان با استفاده از قراردادن قطعات اصلی تک سلول بصورت سری و پیچ نمودن آنها به هم، زیاد کرد. نتایج آزمون‌های این تک سلول در شرایطی بدست آمد که امکان دستیابی به آلیاژهای مخصوص پیل سوختی (آلومینیم-اکسیژن) (AB50V) و کاتدهای هوای ساخت شرکت امریکایی الوپاور وجود نداشت. با اینحال به ۸۰ درصد نتایج این شرکت دست یافته شد. طبق گزارش این شرکت، پیل سوختی آنها با استفاده از کاتد هوای ساخت این شرکت و آلیاژ آلومینیم مخصوص (AB50V)، به چگالی جریان  $100 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$  در ولتاژ  $1/28$  ولت رسیده است که با نتایج بدست آمده از تک سلول ساخته شده (ولتاژ  $1/02$  ولت در چگالی جریان  $100 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ )، قابل مقایسه بوده و امکان بهبود نیز در آن وجود دارد. با توجه به ارتقای ۵ برابری در نتایج که حاصل تعویض و بهبود مدارهای انتقال جریان بوده انتظار می‌رود با اصلاحات بیشتر در سیستم پیل سوختی و مدارهای انتقال جریان، به نتایج دست یافته شده توسط بهترین کارخانه سازنده کاتدهای هوا، نزدیک‌تر شد.

در گام دوم، یک سری پیل سوختی با توان ۵۰۰ وات طراحی شد که با توجه به وزن و حجم این سیستم و سوابقی که از استفاده از این پیل سوختی در جهان وجود دارد، امکان استفاده از این پیل سوختی در شناورهای زیرسطحی داخلی وجود خواهد داشت.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از دانشگاه صنعتی مالک اشتر بخاطر حمایت از این پژوهش کمال قدردانی را دارند.

## مراجع

- [1] [http://www.yardney.com/AluPower/Alupower/ 2.85%20kWh%20Man%20Portable%20Al-Air%20Fuel %20Cell%20Power%20System.pdf](http://www.yardney.com/AluPower/Alupower/2.85%20kWh%20Man%20Portable%20Al-Air%20Fuel%20Cell%20Power%20System.pdf), online date: January (2010).
- [2] Mohamad A.A., "Electrochemical properties of aluminum anodes in gel electrolyte-based aluminum-air batteries", Corrosion Science Vol. 50, pp. 3475-3479 (2008).
- [3] Scamans G.M., "Aluminum Fuel Cell Power Sources for Long Range Unmanned Underwater Vehicles". Alupower Inc., Warren, Report No.: NJ 07039, pp. 179-186 (1994).
- [4] Hasvold O., "The alkaline aluminium hydrogen peroxide power source in the Hugin II unmanned underwater vehicle", Journal of Power Sources, Vol. 80, pp. 254-260 (1999).
- [5] Hegrenæs Ø., "A Framework for Obtaining Steady-State Maneuvering Characteristics of Underwater Vehicles Using Sea-Trial Data", Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens- Greece, July, pp. 27-29 (2007).
- [6] [http://www.mil.no/felles/ffi/hugin/start/program/research /](http://www.mil.no/felles/ffi/hugin/start/program/research/), online date: January (2010).
- [7] Mart P.L., Margeridis J., "Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines", DSTO Aeronautical and Maritime Research Labora. Report No. 009-199, May (1995).
- [8] Basu S., "Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology", 1st ed., Springer, New York, USA, pp. 248-267 (2007).
- [9] <http://www.yardney.com/AluPower/Documents/AC65.pdf>, online date Jun (2012).
- [10] Lapp S.P., "Metal/air fuel cell with electrolyte flow equalization manifold "US Patent 5147736, (1992).