

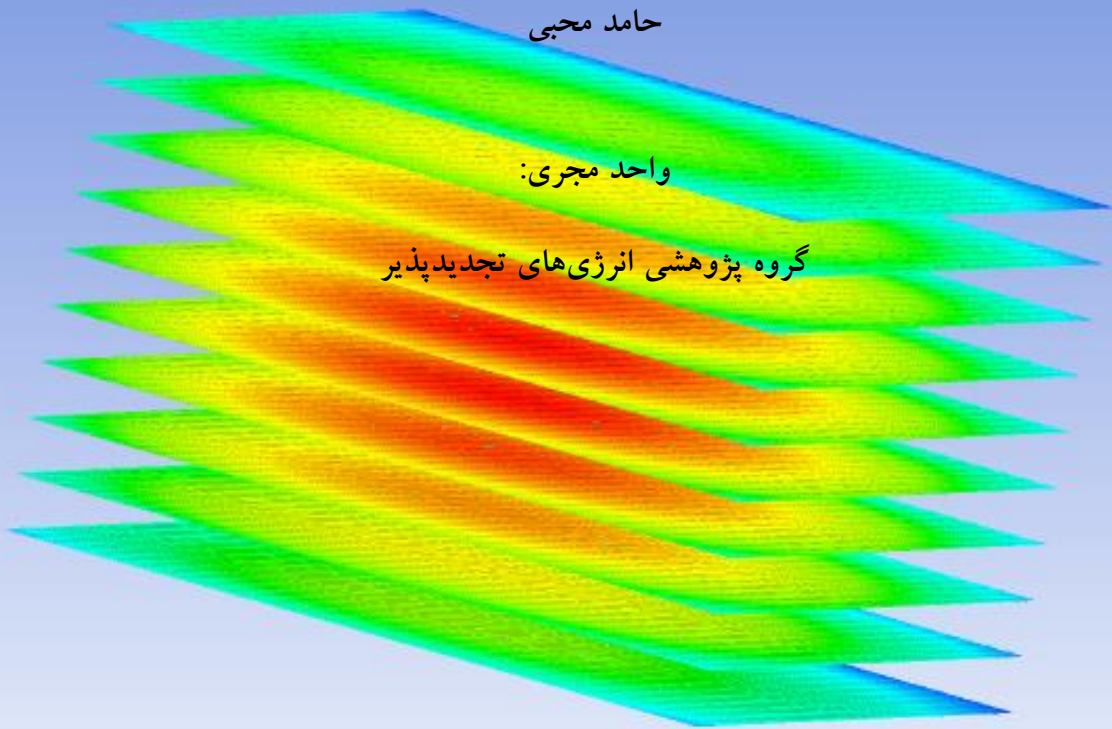
شبیه‌سازی طراحی و ساخت واحد تولید توان سیستم پیل سوختی اکسید جامد به ظرفیت ۷۰۰ وات

مدیر پروژه:

حامد محبی

واحد مجری:

گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شبیه سازی طراحی و ساخت واحد تولید توان سیستم پیل سوختی اکسید جامد به ظرفیت ۷۰۰ وات

مدیر پروژه:

حامد محبی

گروه پژوهشی پشتیبان:

گروه پژوهشی انرژی های تجدیدپذیر

همکاران پروژه:

همایون کنعانی

موسی اشرفی

واحد مجری:

پژوهشکده انرژی و محیط زیست

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد ثبت گزارش: NRI-ER-799-PNEPN13-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.318

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر
شبیه‌سازی طراحی و ساخت واحد تولید توان سیستم پیل سوختی اکسید جامد به ظرفیت
۷۰۰ وات/مدیر پروژه: حامد محبی. ویراستار: عاطفه سهرابی کاشانی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو،
۱۴۰۰.

۸۴ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. کنعانی، همایون، همکار پروژه. ۲. اشرفی، موسی، همکار پروژه. ۳. پژوهشکده
انرژی و محیط زیست. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر



انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در
حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دامن، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب حامد محبی، مدیر پروژه «شبیه‌سازی طراحی و ساخت واحد تولید توان سیستم پیل سوختی اکسید جامد به ظرفیت ۷۰۰ وات» و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام مرحله از مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. همایون کنعانی

۲. موسی اشرفی

پیشگفتار

گزارش حاضر گزارش نهایی پروژه "طراحی و شبیه سازی واحد تولید توان *SOFc* به ظرفیت ۷۰۰ وات" است که به ارائه گزارش فعالیتهای انجام شده در این پروژه در دو بخش طراحی اتصال دهنده داخلی با هدف افزایش یکنواختی در طبقات مختلف استک، و روابط انتقال حرارت در محفظه داغ می پردازد. در این گزارش سعی شده است تا با بررسی طراحی های مختلف برای یک استک بلند با ظرفیت حدود ۷۰۰ وات به عنوان واحد تولید توان به یک طراحی مناسب با حداکثر یکنواختی در پارامترهای تعیین شده دست یافته شود تا بر مبنای آن در گام بعد، طراحی و ساخت یک سیستم تولید توان پیل سوختی اکسید جامد به انجام برسد.

این گزارش مربوط به مرحله نهایی از پروژه شبیه سازی طراحی و ساخت واحد تولید توان سیستم پیل سوختی اکسید جامد به ظرفیت ۷۰۰ وات است که پشتیبانی آن، بر عهده گروه پژوهشی انرژی های تجدیدپذیر و نظارت بر آن، بر عهده سرکار جناب آقای دکتر مهرزاد شمس بوده است.

فهرست مطالب

۱- مروری بر نرم افزارهای قابل استفاده برای شبیه سازی	۱۵
۲- مراحل به کاررفته برای بهینه سازی میدان جریان <i>SOFC</i>	۱۶
۲-۱- میدان های جریان شبیه سازی شده	۱۷
۲-۲- معادلات حاکم	۱۷
۲-۳- فرضیات فیزیکی حاکم	۱۷
۲-۴- مدل هندسی میدان های جریان	۱۸
۲-۴-۱- نمونه اول؛ میدان جریان متقاطع	۱۸
۲-۴-۲- نمونه دوم؛ میدان جریان متقاطع	۱۹
۲-۴-۳- نمونه سوم؛ میدان جریان متقابل	۱۹
۲-۴-۴- نمونه چهارم؛ میدان جریان متقابل	۲۰
۲-۴-۵- نمونه پنجم و ششم؛ میدان جریان متقابل	۲۱
۲-۵- شرایط مرزی	۲۲
۳- نتایج حاصل از شبیه سازی طراحی های مختلف استک یک طبقه ای	۲۳
۳-۱- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه اول	۲۳
۳-۲- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه دوم	۲۴
۳-۳- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه سوم	۲۵
۳-۴- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه چهارم	۲۶
۳-۵- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه پنجم	۲۶
۳-۶- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه ششم	۲۷
۳-۷- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه هفتم	۲۸
۳-۸- مقایسه یکنواختی دبی کانال های نمونه های شبیه سازی شده و افت فشار	۲۹
۴- بررسی توزیع جریان در استک های ۵۰ طبقه ای	۳۰
۴-۱-۱- طراحی اول	۳۰
۴-۱-۲- طراحی دوم	۳۲
۴-۱-۳- طراحی سوم	۳۴
۴-۱-۴- مقایسه ی طراحی های با جریان متقاطع	۳۵

۳۶	۴-۲-۱- طراحی چهارم
۳۸	۴-۲-۲- طراحی پنجم
۴۰	۴-۲-۳- مقایسه طرح‌های جریان متقابل
۴۰	۴-۳- جمع بندی
۴۱	۵- شبیه سازی الکتروشیمیایی پیل های بهبود یافته
۴۸	۵-۲-۱- استک تک طبقه ای
۵۴	۵-۲-۲- استک دو طبقه ای
۶۱	۵-۲-۳- استک ۱۰ طبقه ای
۷۳	۶- مدل سازی انتقال حرارت سیستم پیل سوختی
۷۳	۶-۱- مقدمه
۷۶	۶-۲- مدل سازی ریاضی
۷۶	۶-۲-۱- فرضیات:
۷۸	۶-۲-۲- ظرفیت حرارتی:
۷۸	۶-۲-۳- معادله انتقال حرارت:
۸۲	۶-۳- جمع بندی
۸۴	۷- جمع بندی و دستاوردها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نرم افزارهای تجاری استفاده شده برای شبیه سازی پیل سوختی ۱۵
- شکل ۲-۱: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقاطع ۱۸
- شکل ۲-۲: دامنه محاسباتی نمونه اول ۱۹
- شکل ۲-۳: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقاطع نمونه دوم ۱۹
- شکل ۲-۴: دامنه محاسباتی نمونه دوم ۱۹
- شکل ۲-۵: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقابل نمونه سوم ۱۹
- شکل ۲-۶: دامنه محاسباتی نمونه سوم ۲۰
- شکل ۲-۷: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقابل نمونه چهارم ۲۰
- شکل ۲-۸: دامنه محاسباتی نمونه چهارم ۲۰
- شکل ۲-۹: میدان جریان ساخته شده نمونه پنجم ۲۱
- شکل ۲-۱۰: دامنه محاسباتی نمونه پنجم ۲۱
- شکل ۲-۱۱: دامنه محاسباتی نمونه ششم ۲۱
- شکل ۳-۱: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه اول ۲۴
- شکل ۳-۲: توزیع فشار در میدان جریان ۲۴
- شکل ۳-۳: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه دوم ۲۴
- شکل ۳-۴: توزیع فشار در میدان جریان نمونه دوم ۲۵
- شکل ۳-۵: توزیع فشار در میدان جریان نمونه سوم ۲۵
- شکل ۳-۶: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه سوم ۲۵
- شکل ۳-۷: توزیع فشار در میدان جریان نمونه چهارم ۲۶
- شکل ۳-۸: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه چهارم ۲۶
- شکل ۳-۹: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه پنجم ۲۷
- شکل ۳-۱۰: توزیع فشار در میدان جریان ۲۷
- شکل ۳-۱۱: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه ششم ۲۷
- شکل ۳-۱۲: توزیع فشار در میدان جریان نمونه ششم ۲۸
- شکل ۳-۱۳: توزیع فشار در میدان جریان ۲۸
- شکل ۳-۱۴: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه هفتم ۲۸
- شکل ۳-۱۶: مقایسه یکنواختی جریان در نمونه ها و افت فشار آن ها ۲۹
- شکل ۳-۱۷: مقایسه یکنواختی جریان در نمونه ها و افت فشار آن ها در آرایش های جریان متقابل و متقاطع ۲۹
- شکل ۴-۱: کانتور فشار طراحی اول ۳۰
- شکل ۴-۲: کانتور سرعت در استک ۵۰ طبقه ای طراحی اول ۳۱
- شکل ۴-۳: نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال های استک ۵۰ طبقه ای طراحی اول ۳۱

- شکل ۴-۴ نمودار دبی جریان نرمالیز شده که به هر طبقه وارد می‌شود ۳۲
- شکل ۴-۵ کانتور فشار در استک طراحی دوم ۳۲
- شکل ۴-۶ کانتور سرعت در استک طراحی دوم ۳۳
- شکل ۴-۷ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی دوم ۳۳
- شکل ۴-۸ نمودار دبی جریان نرمالیزه شده که به هر طبقه طراحی دوم وارد می‌شود ۳۴
- شکل ۴-۹ کانتور فشار در استک طراحی سوم ۳۴
- شکل ۴-۱۰ کانتور سرعت در استک طراحی سوم ۳۴
- شکل ۴-۱۱ نمودار دبی جریان نرمالیز شده که به هر طبقه طراحی دوم وارد می‌شود ۳۵
- شکل ۴-۱۲ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی سوم ۳۵
- شکل ۴-۱۳ کانتور فشار در استک طراحی چهارم ۳۶
- شکل ۴-۱۴ کانتور سرعت در استک طراحی چهارم ۳۷
- شکل ۴-۱۵ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی چهارم ۳۷
- شکل ۴-۱۶ نمودار دبی جریان نرمالیزه شده که به هر طبقه طراحی چهارم وارد می‌شود ۳۸
- شکل ۴-۱۷ کانتور فشار در استک طراحی پنجم ۳۸
- شکل ۴-۱۸ کانتور سرعت در استک طراحی پنجم ۳۹
- شکل ۴-۱۹ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی پنجم ۳۹
- شکل ۴-۲۰ نمودار دبی جریان نرمالیز شده که به هر طبقه طراحی چهارم وارد می‌شود ۳۹
- شکل ۵-۱ هندسه پیل سوختی موازی با میدان جریان متقابل ۴۱
- شکل ۵-۲ منحنی پلاریزاسیون و صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی و عددی ۴۱
- شکل ۵-۳ توزیع هیدروژن روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل ۴۲
- شکل ۵-۴ توزیع آب روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل ۴۲
- شکل ۵-۵ توزیع اکسیژن روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل ۴۳
- شکل ۵-۶ توزیع نیتروژن روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل ۴۳
- شکل ۵-۷ توزیع پتانسیل الکتریکی روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل ۴۳
- شکل ۵-۸ توزیع دما روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل ۴۴
- شکل ۵-۹ خطوط جریان هوا در سمت کاتد میدان جریان ۴۴
- شکل ۵-۱۰ توزیع دما روی سطح اینترکانکت سمت کاتد میدان جریان متقابل ۴۵
- شکل ۵-۱۱ توزیع دما روی سطح اینترکانکت سمت آنود میدان جریان متقابل ۴۵
- شکل ۵-۱۲ توزیع چگالی جریان روی سطح الکترولیت ۴۵
- شکل ۵-۱۳ توزیع ولتاژ نرنست روی سطح الکترولیت ۴۶
- شکل ۵-۱۴ توزیع کسر جرمی هیدروژن روی سطح الکترولیت هر طبقه از استک دو واحدی ۴۶
- شکل ۵-۱۵ توزیع کسر جرمی اکسیژن روی سطح الکترولیت هر طبقه از استک دو واحدی ۴۷
- شکل ۵-۱۶ توزیع دما روی سطح الکترولیت هر طبقه از استک دو واحدی ۴۷
- شکل ۵-۱۷ توزیع دما روی اینترکانکت‌های استک دوطبقه‌ای ۴۷

شکل ۱۸-۵	توزیع کسر جرمی اکسیژن روی الکترولیت	۴۸
شکل ۱۹-۵	توزیع هیدروژن روی الکترولیت	۴۸
شکل ۲۰-۵	توزیع هیدروژن روی الکترولیت	۴۹
شکل ۲۱-۵	توزیع هیدروژن روی الکترولیت	۴۹
شکل ۲۲-۵	توزیع دما روی الکترولیت	۵۰
شکل ۲۳-۵	توزیع دما در مجموعه استک	۵۰
شکل ۲۴-۵	توزیع دما روی اینترکانکت ها	۵۱
شکل ۲۵-۵	منحنی توان و ولتاژ پیل سوختی	۵۱
شکل ۲۶-۵	منحنی چگالی توان پیل سوختی	۵۲
شکل ۲۷-۵	نمودار متوسط دمای سل برحسب جریان	۵۲
شکل ۲۸-۵	نمودار حرارت اتلافی و انحراف معیار دما روی سل	۵۳
شکل ۲۹-۵	اختلاف دمای ماکزیمم و مینیمم در سل برحسب جریان	۵۳
شکل ۳۰-۵	دمای سوخت و اکسنده خروجی از استک برحسب جریان	۵۴
شکل ۳۱-۵	توزیع کسر جرمی اکسیژن روی الکترولیت در طبقات	۵۴
شکل ۳۲-۵	توزیع کسر جرمی هیدروژن روی الکترولیت در طبقات	۵۵
شکل ۳۳-۵	توزیع کسر جرمی هیدروژن روی الکترولیت در طبقات	۵۵
شکل ۳۴-۵	توزیع دما روی سل در طبقات	۵۶
شکل ۳۵-۵	توزیع چگالی جریان در طبقات	۵۶
شکل ۳۶-۵	توزیع دما روی مجموعه استک	۵۷
شکل ۳۷-۵	توزیع دما روی اینترکانکت ها	۵۷
شکل ۳۸-۵	منحنی عملکرد استک دوطبقه‌ای	۵۸
شکل ۳۹-۵	منحنی چگالی توان استک دوطبقه‌ای	۵۸
شکل ۴۰-۵	دمای گازهای خروجی از استک برحسب جریان	۵۹
شکل ۴۱-۵	ماکزیمم دمای سل در طبقات	۵۹
شکل ۴۲-۵	مینیمم دمای سل در طبقات	۶۰
شکل ۴۳-۵	اختلاف دمای ماکزیمم و مینیمم هر طبقه؛ انحراف معیار دمای در هر طبقه	۶۰
شکل ۴۴-۵	اختلاف دمای ماکزیمم و مینیمم هر طبقه؛ انحراف معیار دمای در هر طبقه	۶۱
شکل ۴۵-۵	هندسه‌ی استک ۱۰ طبقه‌ای به همراه ابعاد آن	۶۲
شکل ۴۶-۵	محل ورودی و خروجی سمت آند و کاتد (آرایش U-شکل)	۶۲
شکل ۴۷-۵	کانتور سرعت در سمت آند	۶۳
شکل ۴۸-۵	خطوط جریان در سمت آند	۶۳
شکل ۴۹-۵	توزیع سرعت در منیفولدها و کانال‌های کاتد	۶۴
شکل ۵۰-۵	خطوط جریان در منیفولدها و کانال‌های سمت کاتد	۶۴
شکل ۵۱-۵	توزیع کسر جرمی هیدروژن در طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای	۶۵

- شکل ۵-۵۲ توزیع کسر جرمی آب تولیدشده در طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای ۶۵
- شکل ۵-۵۳ توزیع کسر جرمی اکسیژن در طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای ۶۶
- شکل ۵-۵۴ توزیع دما روی تمامی الکترولیت‌های استک ۱۰ طبقه‌ای ۶۶
- شکل ۵-۵۵ توزیع دما روی الکترولیت‌های طبقات ۱-۵-۱۰ ۶۷
- شکل ۵-۵۶ توزیع دما روی اینترکانکت ها ۶۷
- شکل ۵-۵۷ توزیع دما روی اینترکانکت ها ۶۸
- شکل ۵-۵۸ برش طولی از استک، توزیع دما روی سطوح جامد ۶۸
- شکل ۵-۵۹ برش عرضی از استک، توزیع دما روی سطوح جامد ۶۹
- شکل ۵-۶۰ برش عرضی از استک، توزیع دما در سیال داخل کانال‌های کاتد ۶۹
- شکل ۵-۶۱ برش عرضی از استک، توزیع دما در کانال‌های حاوی سیال آند ۷۰
- شکل ۵-۶۲ برش عرضی از استک، شامل محیط سیال و جامد ۷۰
- شکل ۵-۶۳ توزیع چگالی جریان روی الکترولیت تمامی طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای ۷۱
- شکل ۵-۶۴ توزیع دمای متوسط هر روی الکترولیت در طبقات ۷۱
- شکل ۵-۶۵ توزیع تلفات در طبقات استک ۷۲
- شکل ۶-۱ سیستم ساده‌شده‌ی یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد ۷۴
- شکل ۶-۲ حجم سیستم و استک SOFC برحسب چگالی جریان ۷۶
- شکل ۶-۳ مکانیزم‌های انتقال حرارت در استک ۷۹
- شکل ۶-۴ انرژی مورد نیاز و زمان به دما رسیدن یک سیستم SOFC بر اساس جرم آن ۸۲

فهرست جداول

جدول ۱-۲- ابعاد نمونه‌های هندسی شبیه‌سازی شده	۱۷
جدول ۱-۴- انحراف معیار دبی جریان نرمالیزه شده طرح‌های جریان متقاطع	۳۶
جدول ۲-۴- انحراف معیار دبی جریان نرمالیزه شده طرح‌های جریان متقاطع	۴۰
جدول ۱-۶- اجزای استک پیل سوختی فرضی	۷۵
جدول ۲-۶- اجزای سیستم SOFC	۷۵
جدول ۳-۶- سیستم‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی	۷۶
جدول ۴-۶- حجم عایق برحسب ضخامت‌های مختلف	۷۷

مقدمه

در این پژوهش، با هدف توسعه دانش در خصوص طراحی استکهای بلند^۱ پیل سوختی اکسید جامد به بررسی انواع طراحی‌های پیل سوختی پرداخته شده است. در گام نخست به بهینه سازی طراحی استکهای کوچک^۲ مورد استفاده در پژوهشگاه نیرو پرداخته شده است. با شبیه سازی عملکرد طراحی‌های مختلف، طراحی بهینه برای استفاده در استکهای آزمایشگاهی یک طبقه و دو طبقه معرفی شد. سپس با توجه به گزارشات موجود در منابع، طراحی‌های مختلف برای استکهای بلند انجام و عملکرد آنها به لحاظ یکنواختی توزیع اجزا (دما، فشار، واکنشگرها و ...) با استفاده از مدلسازی و شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اهمیت عملکرد یکسان و مشابه طبقات مختلف در جلوگیری از بروز عیب و از کار افتادن استک خصوصاً در عملکرد طولانی مدت، با توجه به نتایج به دست آمده، طراحی بهینه با حداکثر یکنواختی قابل حصول در طبقات، انتخاب و عملکرد الکتروشیمیایی آن در یک استک ۱۰ طبقه به عنوان واحد تولید توان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که به دلیل گرمازا بودن واکنشها، در استکهای بلند دمای استک از حد تحمل سل‌های سرامیکی فراتر رفته و منجر به از کار افتادن آنها خواهد شد. لذا اتخاذ تدابیری به منظور مدیریت حرارتی استکها در افزایش طول عمر استکها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پایان نیز روابط انتقال حرارت سیستم پیل سوختی در محفظه داغ و مدلسازی مربوطه ارائه شده است.

¹ - tall stack

² - short stack

۱- مروری بر نرم افزارهای قابل استفاده برای شبیه سازی

کارکرد پیل سوختی شامل چندین پدیده همزمان است، از جمله آن‌ها می‌توان به انتقال جرم، انرژی، مومنتوم، گونه‌ها و بار الکتریکی اشاره نمود که به صورت کوپل با واکنش‌های الکتروشیمیایی / شیمیایی است. عملکرد یک سیستم *sofc* به صورت مستقیم به فرآیندهای انتقال مرتبط است. علاوه بر آن دمای حاصل از عملکرد پیل سوختی به صورت مستقیم عمر مواد، آب‌بندها و تماس‌های مکانیکی و الکتریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور درک کامل جزئیات فرآیندها و پیش‌بینی اثرات شرایط عملکردی بر کارکرد پیل سوختی، می‌توان از شبیه‌سازی‌های عددی برای بررسی و بهینه‌سازی پیل سوختی استفاده نمود.



شکل ۱-۱: نرم افزارهای تجاری استفاده شده برای شبیه سازی پیل سوختی

اگرچه محققان در گذشته برنامه‌هایی را اجرا می‌کردند که خودشان با استفاده از الگوریتم‌ها در زبان‌های برنامه‌نویسی از جمله فرترن نوشته بودند، اما در سال‌های اخیر، اکثر محققان پیل سوختی از نرم افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی *CFD* برای این امر استفاده می‌کنند (شکل ۱-۱). به طور مثال *Recknagle* و همکاران به کمک نرم افزار *STAR-CD* که بر مبنای روش اختلاف محدود عمل می‌کند، محاسبات انتقال حرارت و جرم روی یک پیل سوختی صفحه‌ای را انجام دادند. *Khaleel* و همکاران، از کد المان محدود *Marc®* برای شبیه‌سازی استفاده نمود. *Beale* و همکاران از *PHOENICS and Fluent* و یک کد به زبان ++C به صورت همزمان استفاده نمودند. *Gubner* و همکاران، از فلوئنت برای شبیه‌سازی استک‌های کیلوواتی استفاده نمودند. *Akhtah* و همکاران یک مدل کوپل را به کمک *COMSOL Multiphysics* شبیه‌سازی نمودند. همچنین از نرم افزار *AVL FIRE* برای شبیه‌سازی پدیده انتقال و الکتروشیمیایی در پیل‌های سوختی استفاده نمود. در این بین محقانی هم به کمک نرم افزار *OPENFOAM* مدل‌هایی ارائه داده‌اند. مزیت آن‌ها منبع باز بودن آن کدها است.

کدهای تجاری توسعه یافته، هم دارای مزیت و هم معایبی هستند. از نگاه مثبت، مزیت آن‌ها این است که کاربر را قادر می‌سازند تا در به سرعت مدل‌های نسبتاً پیچیده را که پدیده‌های انتقال و سینتیک واکنش‌های شیمیایی / الکتروشیمیایی را در *sofc* بدون اختراع مجدد چرخ! انجام دهند؛ اما از طرف دیگر جعبه سیاه کدها دیدگاه کاربر را به

یک پلتفرم محدود می‌کند و مانع از گسترش ایده‌ها می‌شود. همچنین، عموماً فضای بهینه‌ای را برای گسترش کاربردهای تحقیقات ارائه نمی‌دهند.

در این پروژه از نرم‌افزار *Fluent* برای شبیه‌سازی استک پیل سوختی استفاده شده است. در مقایسه با نرم‌افزار *Comsol* نرم‌افزار فلوئنت حجم محاسباتی خیلی کمتری دارد. ماژول *unresolved electrolyte* فلوئنت این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوانیم استک‌های کیلوواتی را شبیه‌سازی نماییم. در این مدل با مدل‌سازی هوشمندانه‌ای الکترولیت به صورت دوبعدی شبیه‌سازی می‌شود تا به صورت قابل ملاحظه‌ای تعداد سلول‌های محاسباتی کاهش بیابد. مزیت‌های فلوئنت به شرح زیر است:

- مدلی برای تمام انواع پیل‌های سوختی *SOFC* ارائه می‌دهد.
 - قابل اعمال برای مقیاس‌های کیلوواتی است؛ که در نرم‌افزار نظیر کامسول این امر نیازمند هزینه محاسباتی و سخت‌افزاری بسیار بالایی است.
 - صحت سنجی آن برای انواع پیل‌های سوختی انجام شده است و با اطمینان می‌توان از آن استفاده نمود.
 - نتایج با داده‌های آزمایشگاهی تطابق قابل توجهی دارند.
 - یک ابزار مناسب را برای توسعه‌دهندگان پیل سوختی ارائه می‌دهد.
 - می‌توان از سوخت‌های گوناگونی نظیر گاز طبیعی استفاده نمود.
- فضای نرم‌افزار فلوئنت در اعمال هندسه‌ها و شرایط کارکردی به طور قابل توجهی دست کاربر را باز می‌گذارد و می‌توان سامانه‌های واقعی *SOFC* را به کمک آن شبیه‌سازی نمود. مزیت ماژول *SOFC* فلوئنت این است که هم‌زمان با اجزای دیگر می‌توان کوپل حل نمود و تأثیر سایر اجزا بر عملکرد پیل سوختی را ارائه نمود.

۲- مراحل به کاررفته برای بهینه‌سازی میدان جریان *SOFC*

یک راهکار برای کاهش افت فشار، استفاده از میدان‌های جریان با کانال‌های موازی است که نسبت به میدان جریان مارپیچ افت فشار کمتری دارد؛ اما یکی از مشکلات طراحی این میدان جریان، توزیع یکنواخت واکنش‌دهنده‌ها است [۱]. مدل‌هایی تحلیلی برای توزیع واکنش‌دهنده‌ها در میدان جریان *U*-شکل و *Z*-شکل ارائه گردیده است [۲]. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که توزیع یکنواخت، به پارامترهای هندسی نظیر ابعاد کانال‌ها و راهگاه‌های اصلی بستگی دارد. در مطالعه‌ای دیگر [۳] انواع چینش‌های میدان جریان موازی بررسی شده است که در آن استفاده از آرایش *U*-شکل با چندین مرتبه تکرار، به جای آرایش *U*-شکل ساده پیشنهاد شده است تا از طرفی افت فشار قابل قبول و از طرف دیگر توزیع یکنواخت به وجود آید. یک واحد پیل سوختی تقریباً ولتاژ الکتریکی پایینی (در حدود ۰/۷ ولت) تولید می‌کند که برای بسیاری از دستگاه‌های صنعتی کاربردی ندارد. لذا پیل‌های سوختی با توجه به نیازی‌های موجود در ابعاد و انواع مختلف وجود دارند. توان خروجی یک استک به صورت ایده‌آل، برابر است با مجموع توان واحدهایی که به صورت سری یا موازی قرار گرفته‌اند و عمر و قابلیت اطمینان استک با بدترین واحد سنجیده می‌شود. بدین منظور طراحی استک پیل سوختی باید به گونه‌ای صورت پذیرد که توزیع واکنش‌دهنده‌ها در تمامی طبقات استک تا حد امکان یکنواخت باشد و همچنین از افت فشار قابل قبولی برخوردار باشد. یکی از راهکارهای کاهش افت فشار افزایش تعداد راهگاه‌های توزیع واکنش‌دهنده‌ها است این در حالی است که در آرایش ساده *U*-شکل و *Z*-شکل یک راهگاه وجود دارد.

در این پژوهش افزایش تعداد راهگاه‌های توزیع واکنش‌دهنده‌ها به‌عنوان راهکار مورد بررسی قرار گرفته است. چیدمان میدان‌های جریان آند و کاتد در پیل‌های سوختی اکسید جامد صفحه‌ای به‌صورت آرایش‌های جریان متقابل، جریان متقاطع و جریان همسو وجود دارد. در این مطالعه طرح‌های مختلفی برای دو آرایش جریان متقابل و متقاطع ارائه شده‌اند که توزیع یکنواخت دارند. طرح‌های ارائه‌شده با در نظر گرفتن قابلیت ساخت برای پیل‌های سوختی با توان بالا ارائه گردیده‌اند. در انتها از بین این طرح‌ها در هر دو آرایش جریان متقابل و متقاطع میدان جریان یکنواخت‌تر معرفی گردیده است.

۲-۱- میدان‌های جریان شبیه‌سازی شده

در جدول ۲-۱ ابعاد نمونه‌های هندسی شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

جدول ۲-۱- ابعاد نمونه‌های هندسی شبیه‌سازی شده

نمونه	طول (mm)	عرض (mm)
۱	۱۲۰	۹۸/۲
۲	۱۲۷	۹۸/۲
۳	۱۵۸	۹۸/۲
۴	۱۶۰	۹۸/۲
۵	۱۴۴	۹۸/۲
۶	۸۷	۸۰

۲-۲- معادلات حاکم

محاسبات *CFD* بر اساس معادلات هم‌دما و بدون واکنش‌های الکتروشیمیایی صورت گرفته است. لذا معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی به‌صورت زیر:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

که u بردار سرعت است و معادله مومنتوم به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau$$

که τ تانسور تنش است.

گسسته‌سازی مرتبه دوم برای سرعت و روش *PRESTO!* برای فشار استفاده شده است. کوپلینگ بین معادلات مومنتوم و فشار به کمک الگوریتم *SIMPLE* انجام شده است.

۲-۳- فرضیات فیزیکی حاکم

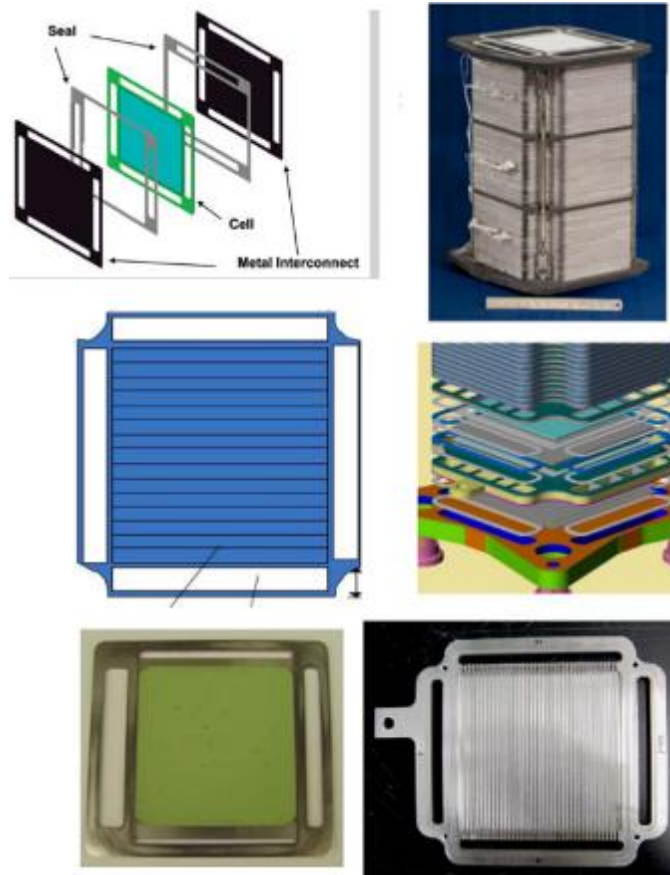
- واکنش‌های شیمیایی / الکتروشیمیایی در نظر گرفته نشده‌اند.
- انتقال حرارت و جرم نادیده گرفته شده است.
- با توجه به عدد رینولدز در دامنه محاسباتی جریان آرام لحاظ شده است.
- با توجه به عدد رینولدز جریان تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است.

- جریان داخل استک به صورت پایا در نظر گرفته شده است.
- فرض شده است که دمای کارکردی یکسان می باشد.
- فشار کارکردی سیستم 1 atm در نظر گرفته شده است.

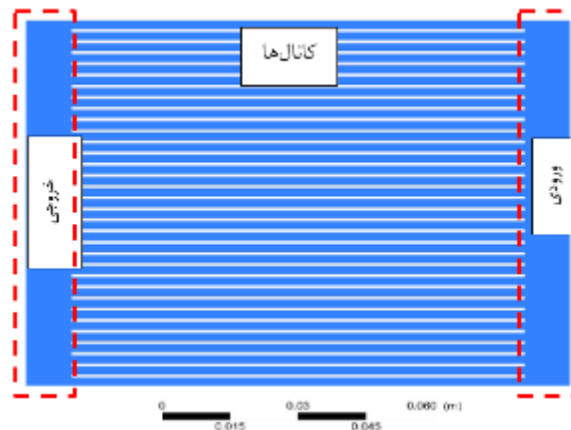
۲-۴- مدل هندسی میدان های جریان

۲-۴-۱- نمونه اول؛ میدان جریان متقاطع

در شکل ۲-۱ نمونه تجاری ساخته شده از مدل مورد نظر نشان داده شده است. در شکل ۲-۲ دامنه محاسباتی با توجه به ابعاد بهینه شده داده شده است.



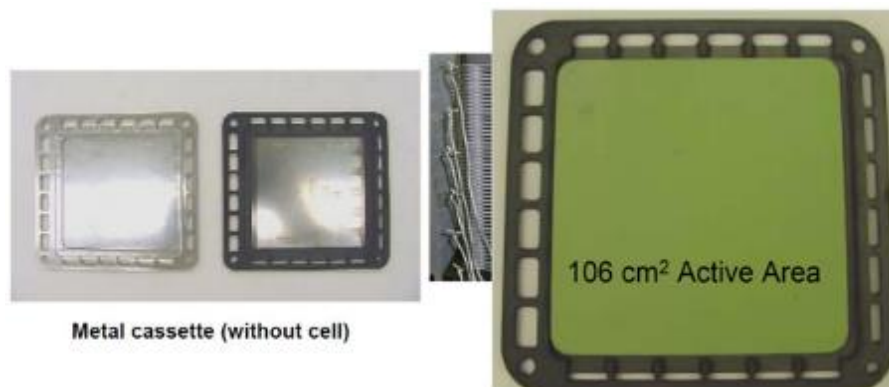
شکل ۲-۱: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقاطع



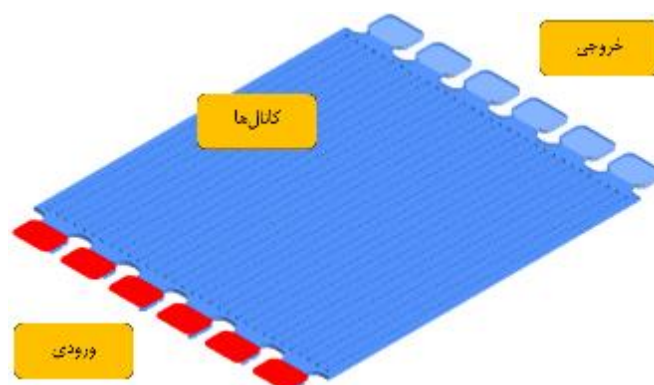
شکل ۲-۲: دامنه محاسباتی نمونه اول

۲-۴-۲- نمونه دوم؛ میدان جریان متقاطع

در شکل ۲-۳ نمونه تجاری ساخته شده از مدل موردنظر نشان داده شده است. در شکل ۲-۴ دامنه محاسباتی با توجه به ابعاد بهینه شده داده شده است.



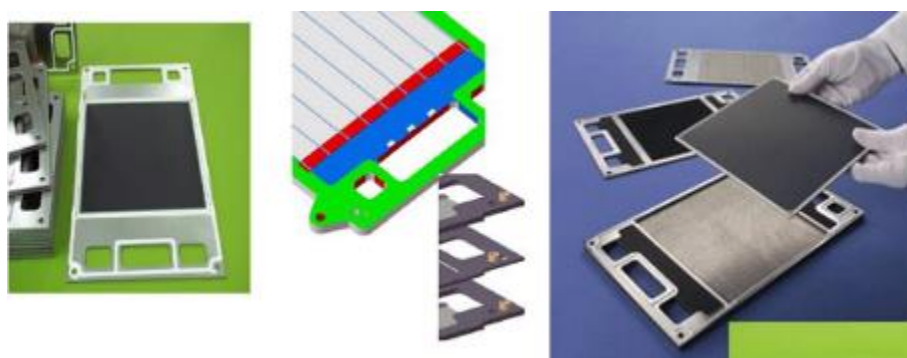
شکل ۲-۳: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقاطع نمونه دوم



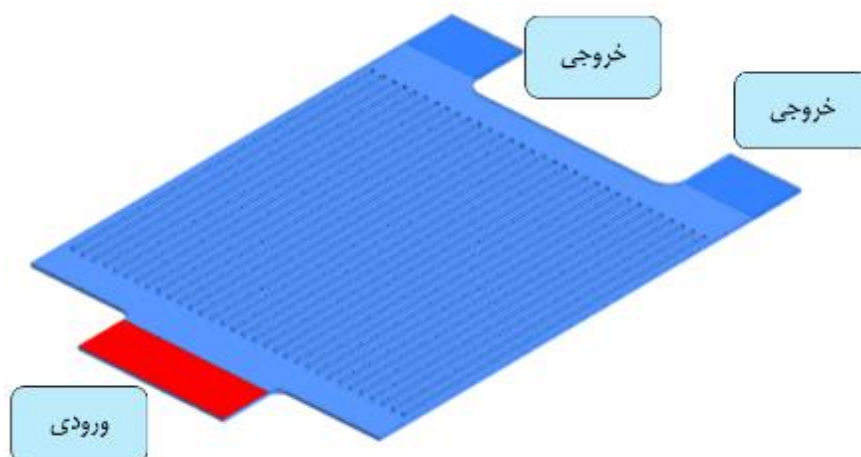
شکل ۲-۴: دامنه محاسباتی نمونه دوم

۲-۴-۳- نمونه سوم؛ میدان جریان متقابل

در شکل ۲-۵ نمونه تجاری ساخته شده از مدل موردنظر نشان داده شده است. در شکل ۲-۶ دامنه محاسباتی با توجه به ابعاد بهینه شده داده شده است.



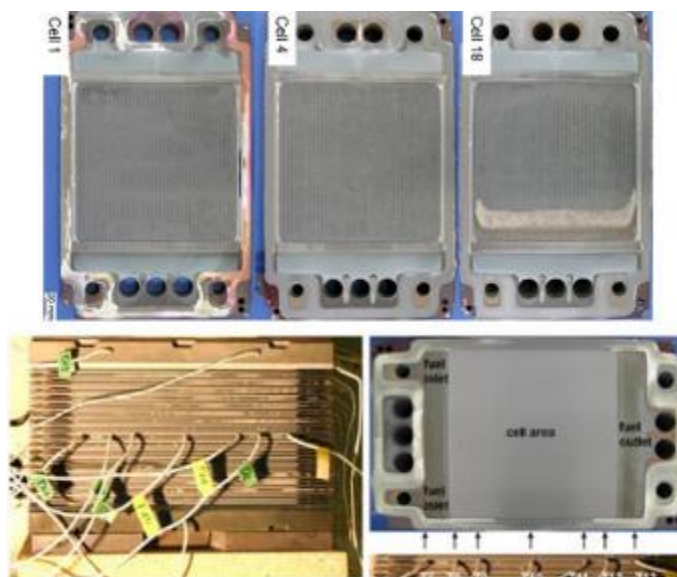
شکل ۲-۵: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقابل نمونه سوم



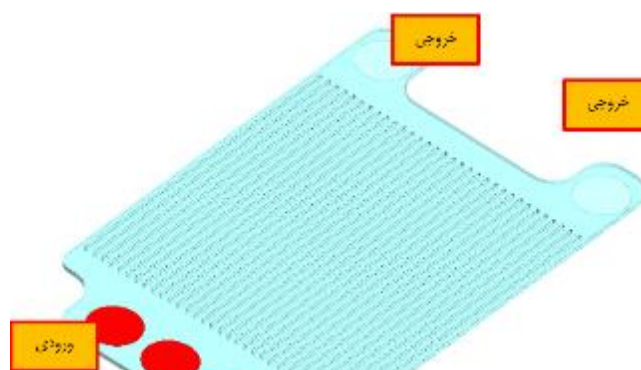
شکل ۶-۲: دامنه محاسباتی نمونه سوم

۴-۴-۲- نمونه چهارم؛ میدان جریان متقابل

در شکل ۷-۲ نمونه تجاری ساخته شده از مدل موردنظر نشان داده شده است. در شکل ۸-۲، دامنه محاسباتی با توجه به ابعاد بهینه شده داده شده است.



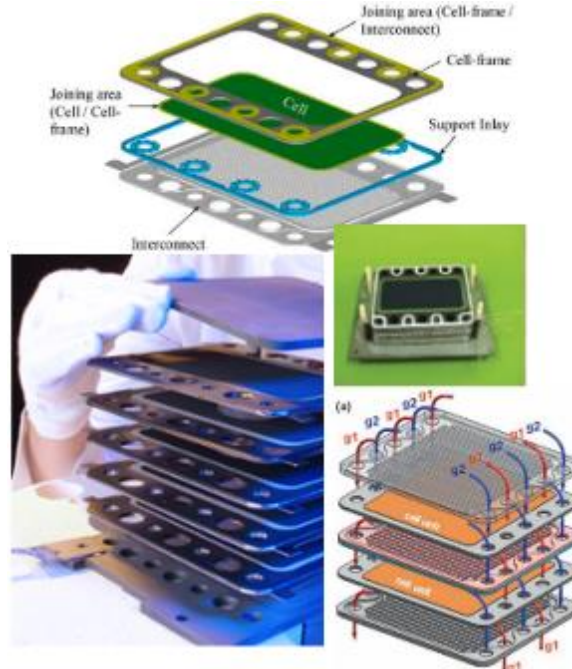
شکل ۷-۲: نمایی از نمونه پیل موازی با جریان متقابل نمونه چهارم



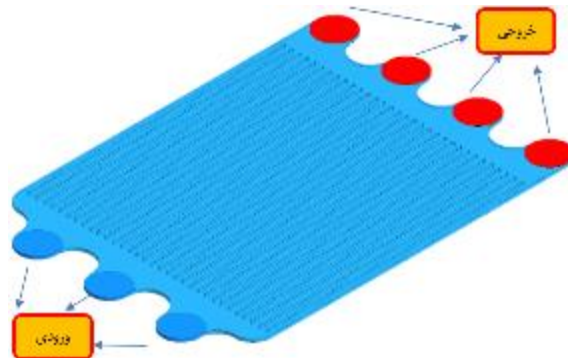
شکل ۸-۲: دامنه محاسباتی نمونه چهارم

۵-۴-۲- نمونه پنجم و ششم؛ میدان جریان متقابل

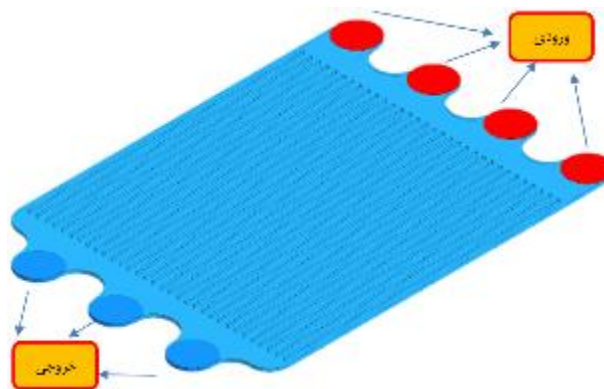
در شکل ۲-۹ نمونه تجاری ساخته شده از مدل مورد نظر نشان داده شده است. در شکل ۲-۱۰ و شکل ۲-۱۱، دامنه محاسباتی با توجه به ابعاد بهینه شده داده شده است.



شکل ۲-۹: میدان جریان ساخته شده نمونه پنجم



شکل ۲-۱۰: دامنه محاسباتی نمونه پنجم



شکل ۲-۱۱: دامنه محاسباتی نمونه ششم

۵-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی فیزیکی به کاررفته در شبیه‌سازی‌ها به صورت زیر می‌باشد:

- دبی هوای ورودی به میدان جریان برابر با $SCCM$ ۱۰۰۰ است.
- به دلیل پایین بودن رینولدز جریان، رژیم جریان آرام اعمال شده است.
- جریان به صورت خالص هیدرولیکی در نظر گرفته شده است و از تأثیر گرادیان دما صرف نظر شده است.
- شرط مرزی روی دیواره‌ها عدم لغزش در نظر گرفته شده است.
- همچنین شرط مرزی در خروجی میدان جریان فشار خروجی به اتمسفر در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی طراحی‌های مختلف استک یک طبقه‌ای

در این بخش، توزیع واکنش‌دهنده‌ها برای دو آرایش جریان متقاطع و جریان متقابل مقایسه می‌شود. به منظور بررسی کمی میزان یکنواختی دبی در کانال‌های هر طرح، پارامتری به نام دبی جریان نرمال شده (NMR) تعریف می‌شود که برابر است با نسبت دبی جریان در هر کانال به دبی متوسط در تمامی کانال‌های هر طرح که برابر است با:

$$NMR_i = \frac{\dot{m}_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{m}_i} \quad (3-1)$$

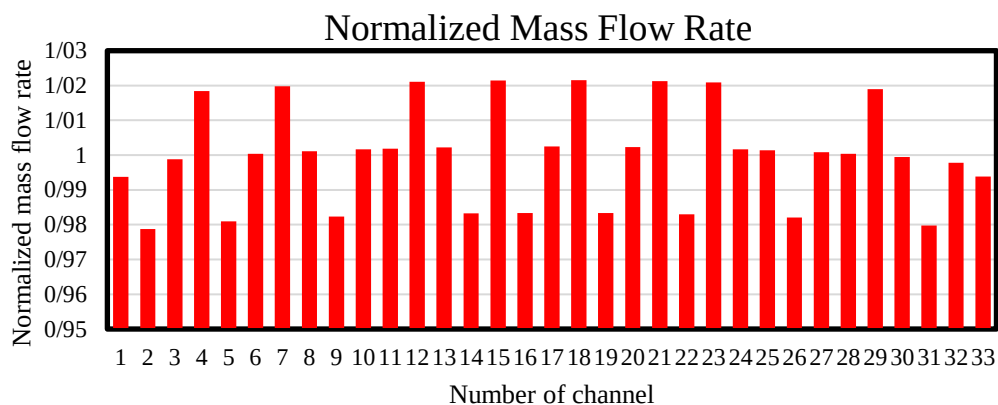
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (NMR_i - \alpha)^2} \quad , \quad \alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{m}_i \quad (3-2)$$

که $\dot{m}_i$ دبی جریان در کانال شماره i ، N تعداد کل کانال‌های هر طرح است. این پارامتر بازه‌ی نوسان دبی‌ها در کانال‌ها را می‌توان بررسی کرد. انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه‌ی آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ درحالی‌که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است که برای هر طرح می‌توان انحراف معیار دبی جریان نرمال شده در کانال‌ها را به دست آورد.

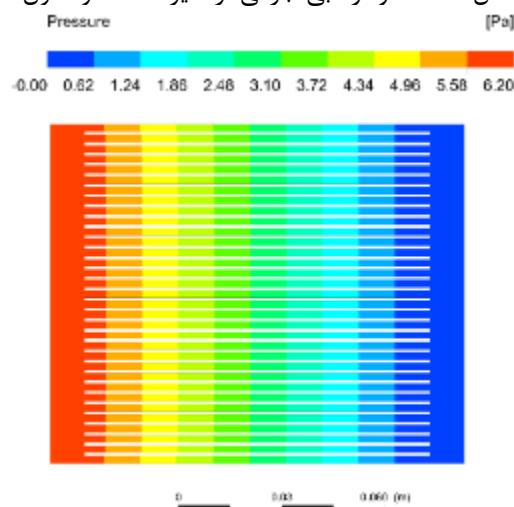
هرچقدر این عدد به صفر نزدیک باشد جریان در کانال‌ها یکنواخت‌تر است. همچنین پارامتر دیگری که در یک استک با تعداد طبقات بالا مهم است میزان افت فشار در هر میدان جریان است. لذا در ادامه این دو پارامتر یعنی دبی جریان نرمالیز شده در کانال‌های هر طرح و افت فشار در هر طرح مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۳-۱- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه اول

به‌منظور دستیابی به میدان جریان یکنواخت، از شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. بدین منظور میدان جریان سمت کاتد بهینه‌سازی گردیده است. پارامتر مورد بررسی برای بررسی یکنواخت جریان در کانال‌ها، دبی جریان نرمال شده در هر کانال با دبی جریان متوسط کانال‌ها است که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است؛ اما پارامتر دیگر مورد بررسی افت فشار می‌باشد که کانتور فشار در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دبی جریان نرمالیز شده نزدیک به یک می‌باشد که نشان از یکنواختی توزیع واکنش‌دهنده‌ها در کانال‌ها می‌باشد. همچنین افت فشار در کل میدان جریان مقدار کمی دارد. علاوه بر آن افت فشار در کانال‌ها یکسان می‌باشد.



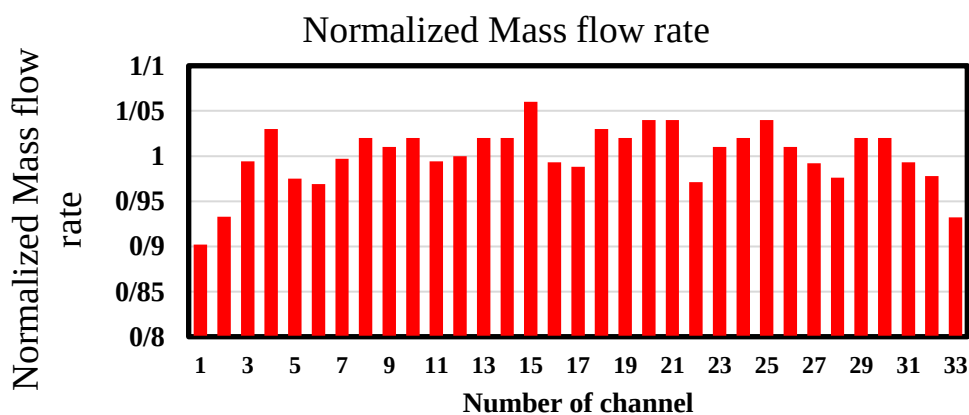
شکل ۳-۱: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه اول



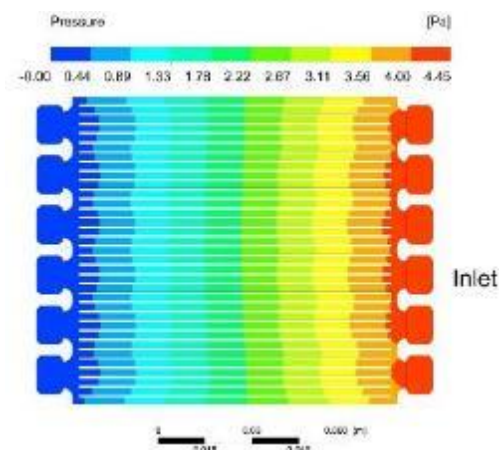
شکل ۳-۲: توزیع فشار در میدان جریان

۳-۲- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه دوم

دبی جریان نرمالیز شده و افت فشار در میدان جریان به ترتیب در شکل ۳-۳ و شکل ۳-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دبی جریان نرمالیز شده در اکثر کانال‌ها در حدود ۱ می‌باشد و همچنین افت فشار در میدان جریان مقدار کمی دارد؛ و افت فشار در هر کانال دارای توزیعی یکنواخت در تمام میدان جریان می‌باشد.



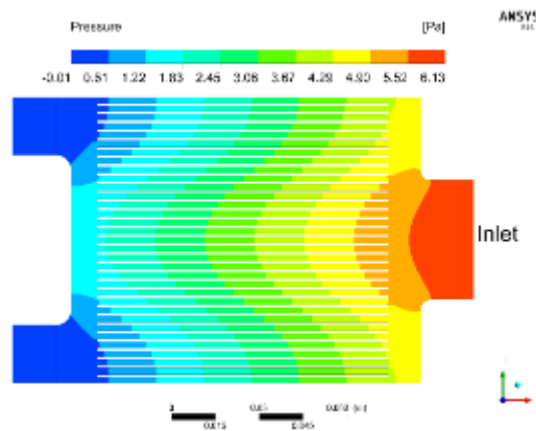
شکل ۳-۳: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه دوم



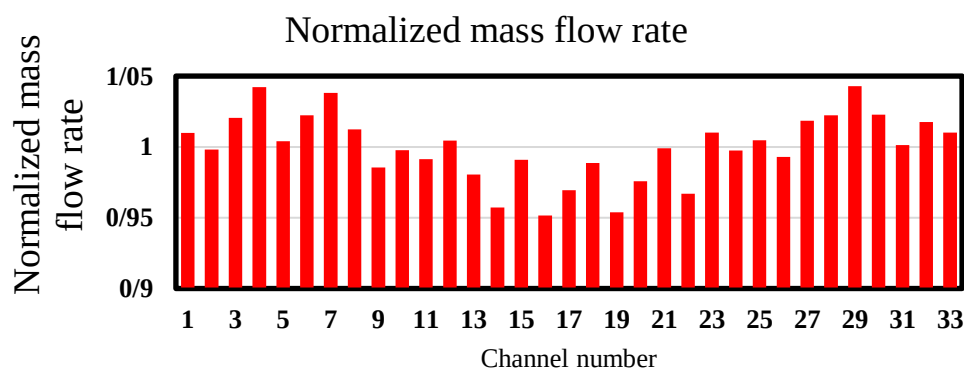
شکل ۳-۴: توزیع فشار در میدان جریان نمونه دوم

۳-۳- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه سوم

دبی جریان نرمالیز شده و افت فشار در میدان جریان نمونه سوم به ترتیب در شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود دبی جریان نرمالیز شده در اکثر کانال ها در حدود ۱ می باشد و همچنین افت فشار در میدان جریان مقدار کمی دارد؛ و افت فشار در هر کانال دارای توزیعی یکنواخت در تمام میدان جریان می باشد اگرچه به ظاهر در کانتور فشار این مورد در نگاه اول استنباط نمی شود ولی با به دست آوردن اختلاف فشار ورودی و خروجی هر کانال به این مهم می توان دست یافت.



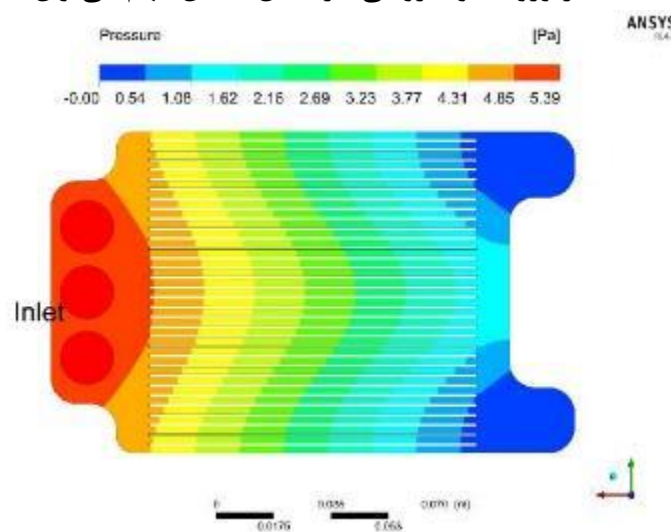
شکل ۳-۵: توزیع فشار در میدان جریان نمونه سوم



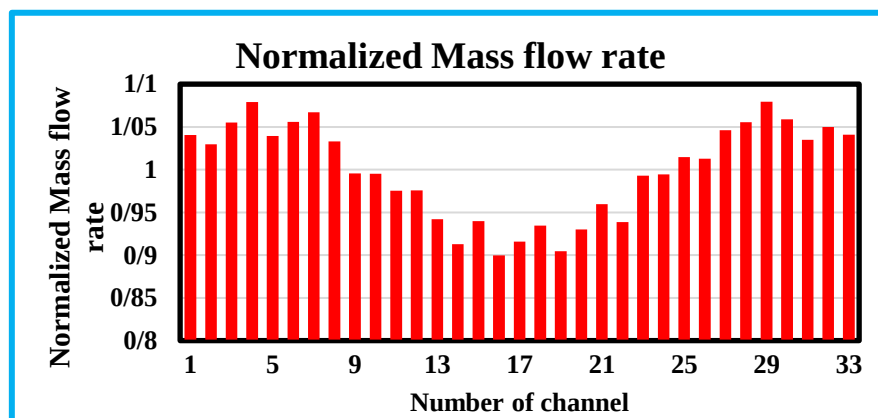
شکل ۳-۶: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه سوم

۳-۴- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه چهارم

دبی جریان نرمالیز شده و افت فشار در میدان جریان نمونه چهارم به ترتیب در شکل ۳-۷ و شکل ۳-۸ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود دبی جریان نرمالیز شده در اکثر کانال ها در حدود ۱ می باشد و همچنین افت فشار در میدان جریان مقدار کمی دارد؛ و افت فشار در هر کانال دارای توزیعی یکنواخت در تمام میدان جریان می باشد اگرچه به ظاهر در کانتور فشار این مورد در نگاه اول استنباط نمی شود ولی با به دست آورد اختلاف فشار ورودی و خروجی هر کانال به این مهم می توان دست یافت.



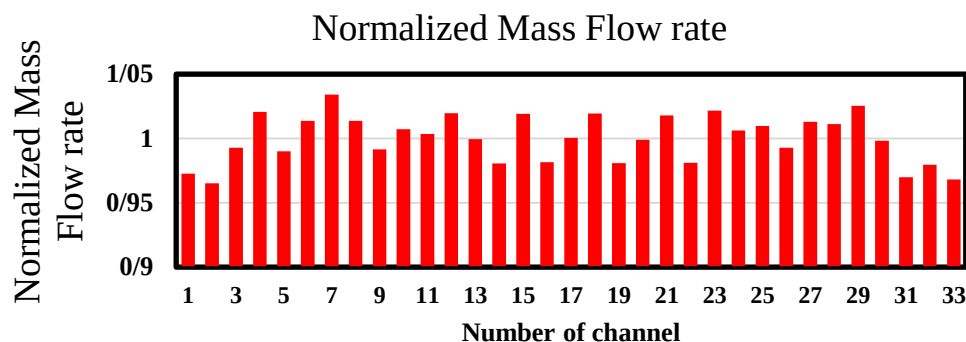
شکل ۳-۷: توزیع فشار در میدان جریان نمونه چهارم



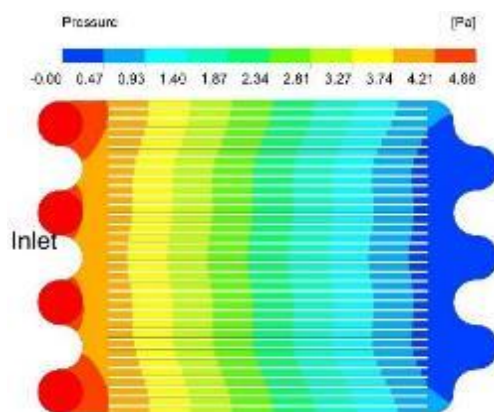
شکل ۳-۸: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه چهارم

۳-۵- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه پنجم

دبی جریان نرمالیز شده و افت فشار در میدان جریان نمونه پنجم به ترتیب در شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود دبی جریان نرمالیز شده در اکثر کانال ها در حدود ۱ می باشد و همچنین افت فشار در میدان جریان مقدار کمی دارد؛ و افت فشار در هر کانال دارای توزیعی یکنواخت در تمام میدان جریان می باشد اگرچه به ظاهر در کانتور فشار این مورد در نگاه اول استنباط نمی شود ولی با به دست آورد اختلاف فشار ورودی و خروجی هر کانال به این مهم می توان دست یافت.



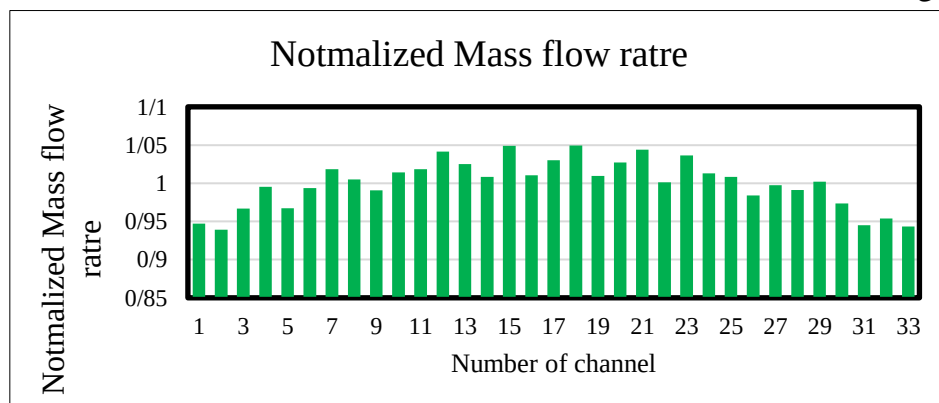
شکل ۳-۹: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه پنجم



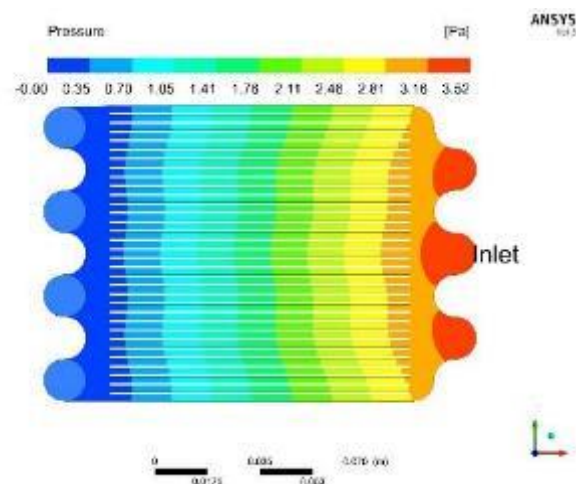
شکل ۳-۱۰: توزیع فشار در میدان جریان

۳-۶- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه ششم

نمونه‌ی ششم مشابه نمونه پنجم می‌باشد تنها محل ورودی و خروجی جریان عوض شده‌اند. دبی جریان نرمالیز شده و افت فشار در میدان جریان نمونه ششم به ترتیب در شکل ۳-۱۱ و شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دبی جریان نرمالیز شده در اکثر کانال‌ها در حدود ۱ می‌باشد و همچنین افت فشار در میدان جریان مقدار کمی دارد؛ و افت فشار در هر کانال دارای توزیعی یکنواخت در تمام میدان جریان می‌باشد اگرچه به‌ظاهر در کانتور فشار این مورد در نگاه اول استنباط نمی‌شود ولی با به دست آورد اختلاف فشار ورودی و خروجی هر کانال به این مهم می‌توان دست یافت.



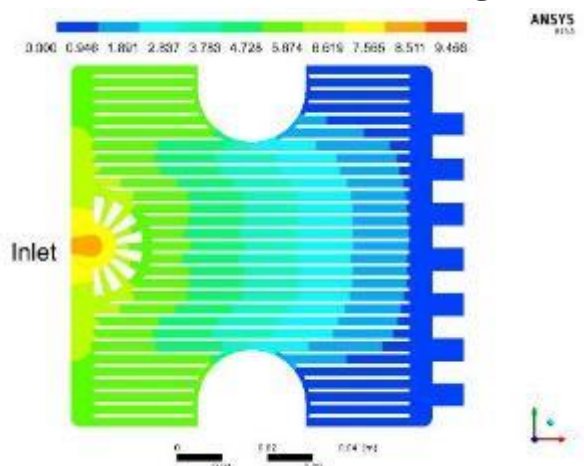
شکل ۳-۱۱: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه ششم



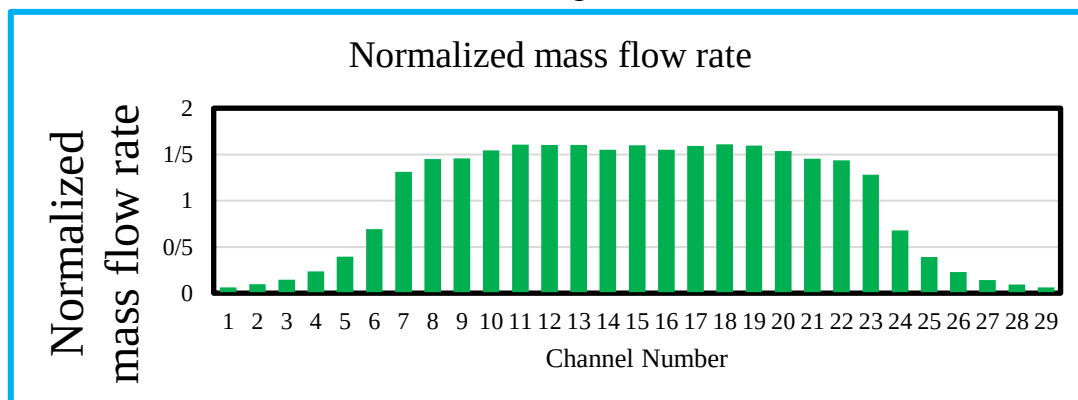
شکل ۳-۱۲: توزیع فشار در میدان جریان نمونه ششم

۳-۷- یکنواختی جریان و افت فشار در نمونه هفتم

دبی جریان نرمالیز شده و افت فشار در میدان جریان نمونه هفتم در شکل ۳-۱۳ و شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود دبی جریان نرمالیز شده در اکثر کانال ها از ۱ بیشتر یا کمتر است که نشان از توزیع غیریکنواخت دبی در کانال ها می باشد. افت فشار در میدان جریان مقدار بیشتری نسبت به طرح های قبلی دارد.



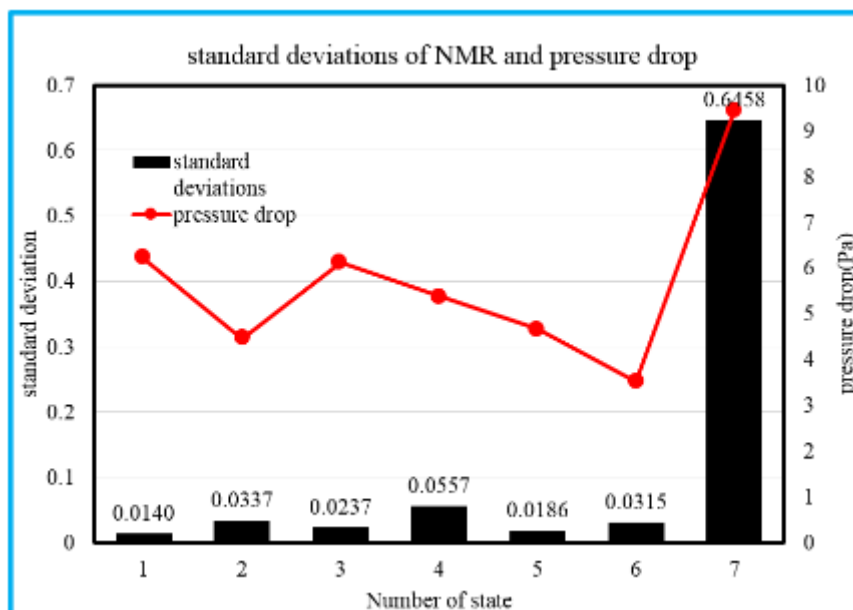
شکل ۳-۱۳: توزیع فشار در میدان جریان



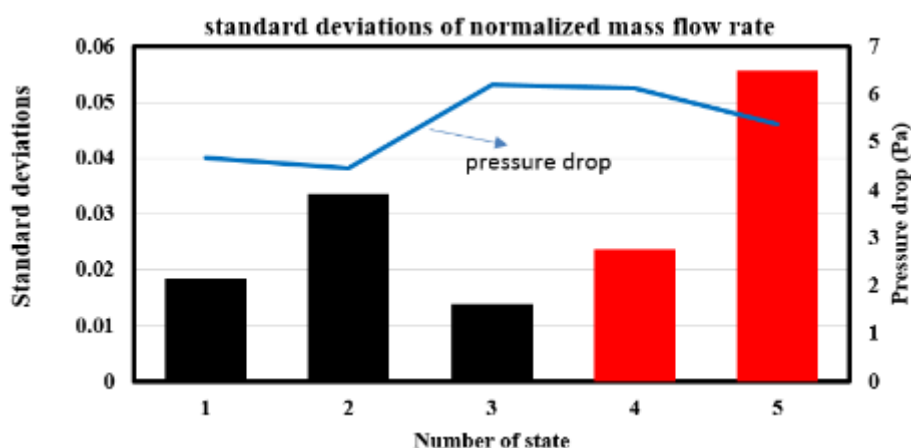
شکل ۳-۱۴: نمودار دبی جرمی نرمالیز شده نمونه هفتم

۳-۸- مقایسه یکنواختی دبی کانال‌های نمونه‌های شبیه‌سازی شده و افت فشار

در شکل ۳-۱۵ دبی‌های جریان نرمالیز شده به همراه افت فشار نمونه‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود طرح ۷ از لحاظ توزیع سیال و افت فشار نمونه‌ی مناسبی نمی‌باشد. باقی طرح‌ها از توزیع تقریباً یکنواختی برخوردار هستند اما در بین‌ها در آرایش جریان متقاطع طرح ۱ و در آرایش جریان متقابل طرح ۳ بهترین طرح‌ها می‌باشند، در این پژوهش آرایش جریان متقابل انتخاب شده است. لذا طرح ۳ برای اینترکانکت یک طبقه استفاده خواهد شد و به کمک آن توزیع دبی‌ها را در استک‌های ۲۰ و ۵۰ طبقه‌ای مورد بررسی قرار خواهیم داد.



شکل ۳-۱۵: مقایسه یکنواختی جریان در نمونه‌ها و افت فشار آن‌ها



شکل ۳-۱۶: مقایسه یکنواختی جریان در نمونه‌ها و افت فشار آن‌ها در آرایش‌های جریان متقابل و متقاطع

۴- بررسی توزیع جریان در استک های ۵۰ طبقه‌ای

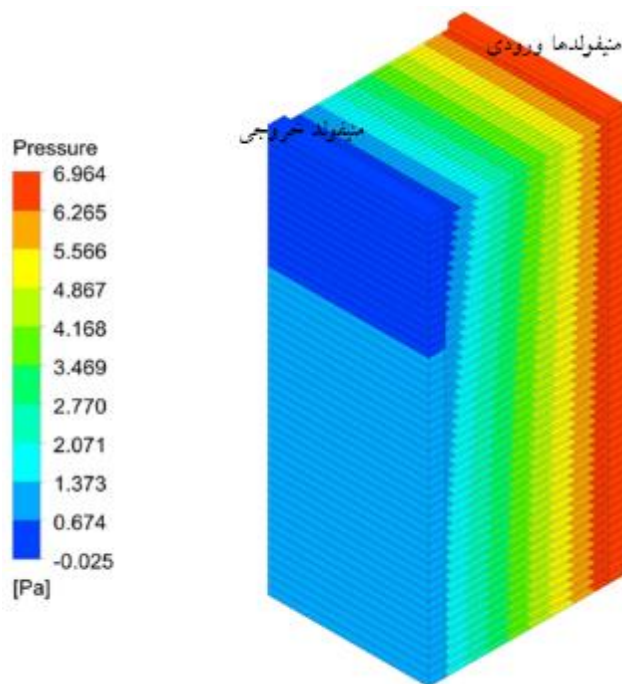
هدف این بخش بررسی تأثیر افزایش تعداد طبقات در توزیع دبی در طبقات می‌باشد. چراکه ممکن است توزیع جریان غیریکنواخت باشد و توزیع غیریکنواخت مستقیماً بر تولید توان و توزیع دما و تنش‌های حرارتی اثرگذار است. لذا در ادامه طرح‌های بررسی شده در بخش‌های قبل به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی خواهد گردید. دو آرایش جریان U شکل (ورودی و خروجی در یک سمت) و Z شکل (ورودی در پایین و خروجی در بالا و یا برعکس) را می‌توان اعمال نمود. در قدم اول سعی بر این است که منیفولدهای استک در یک سمت باشد لذا هدف اول استفاده از آرایش U شکل می‌باشد؛ اما در صورتی که توزیع سیال با این آرایش مناسب نبود، آرایش جریان Z شکل ممکن است راهکاری برای ایجاد جریان یکنواخت باشد.

همان‌طور که در یک اینترکانکت ملاحظه نمودید تعداد راهگاه‌های ورودی و خروجی جریان به هر طبقه را افزایش دادیم تا بتوانیم توزیع جریان در طبقات را یکنواخت کنیم. این امر در استک‌های با طبقات بالا موجب کاهش افت فشار می‌شود چراکه تعدادی راهگاه به‌صورت موازی باهم وظیفه وارد نمودن یا تخلیه سیال را بر عهده دارند.

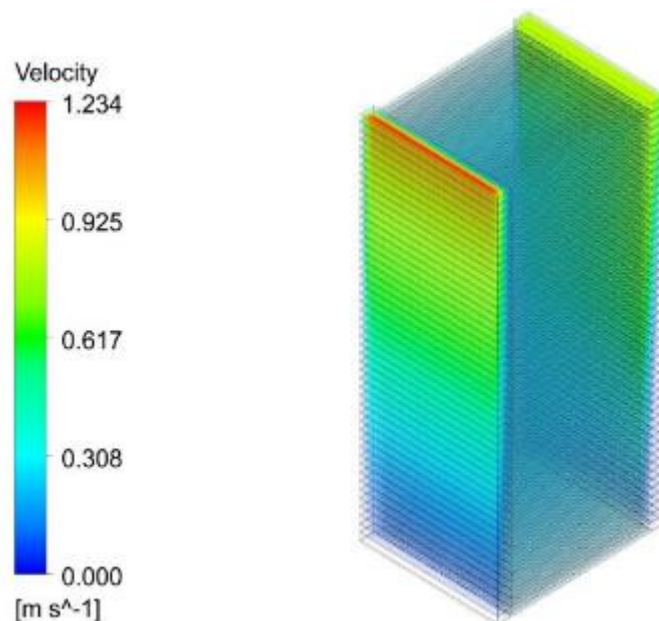
۴-۱- طرح‌های جریان متقاطع

۴-۱-۱- طراحی اول

در شکل ۴-۱ کانتور افت فشار برای استک ۵۰ طبقه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، افت فشار در کانال‌ها به‌صورت یکنواخت است که برای عملکرد یکنواخت پیل سوختی روی تمامی سطح فعال مفید است. در شکل ۴-۲ کانتور سرعت نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در هر طبقه دبی به‌صورت یکنواخت توزیع شده است.

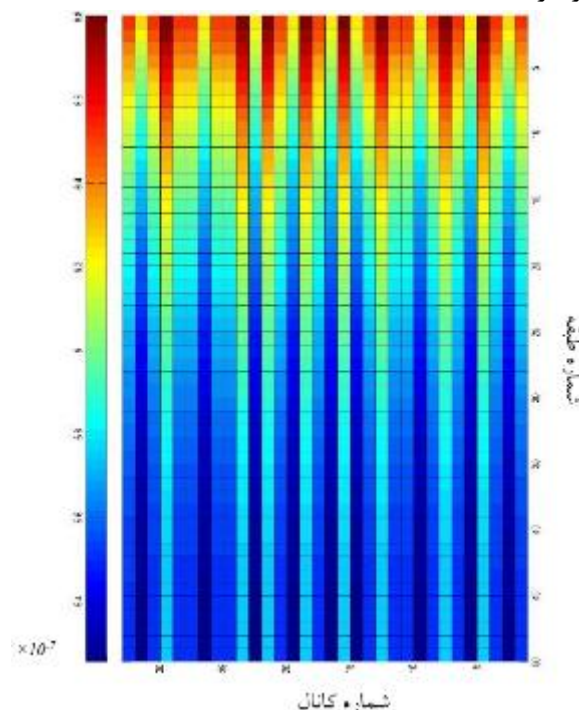


شکل ۴-۱ کانتور فشار طراحی اول



شکل ۴-۲ کانتور سرعت در استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی اول

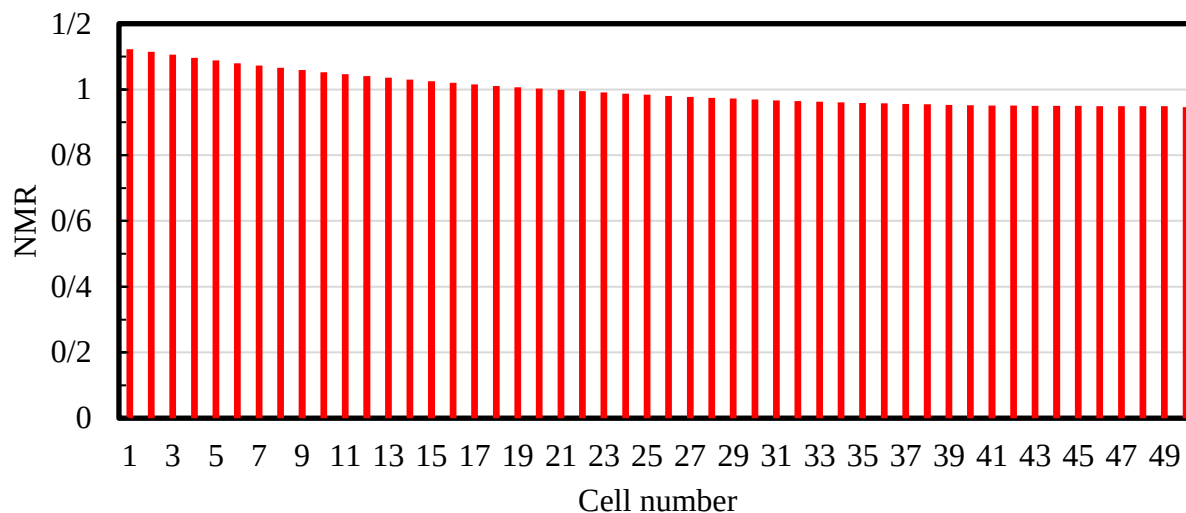
در شکل ۴-۳ دبی در تک تک کانال‌ها در هر طبقه‌ای استک نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، دبی در هر طبقه تقریباً یکنواخت است و از طبقه اول تا طبقه پنجاهم نسبت دبی در کانالی با کمترین دبی و کانالی با بیشترین دبی بیش از ۱/۲۵ برابر گردیده است.



شکل ۴-۳ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی اول

اما به‌منظور بررسی توزیع یکنواخت واکنش‌دهنده‌ها در هر طبقه دبی ورودی به هر طبقه اندازه‌گیری شده است و با دبی جریان متوسط در طبقات نرمال شده است که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه

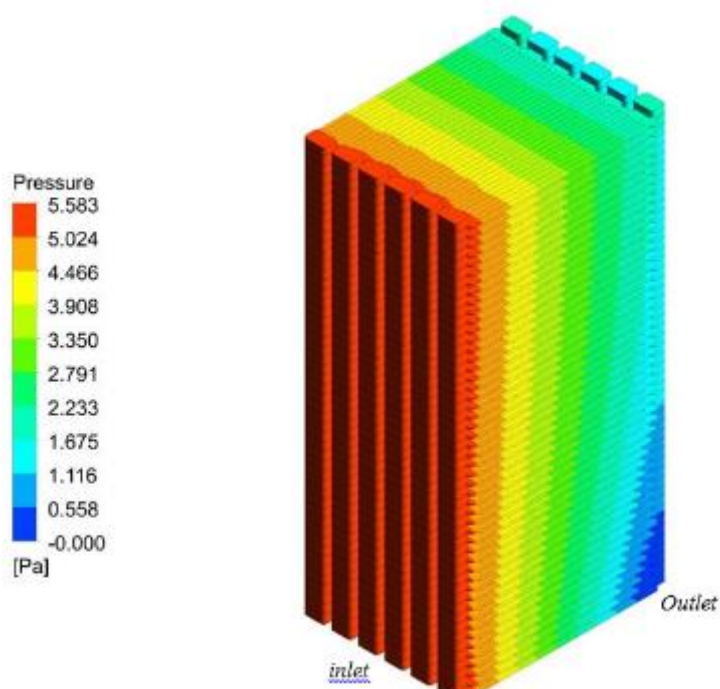
می‌شود، در نصف کانال‌ها دبی جریان تا ۵٪ از مقدار متوسط کم‌تر است و در نصف دیگر کانال‌ها دبی جریان تا مقدار ۱۲٪ از مقدار متوسط بیش‌تر است.



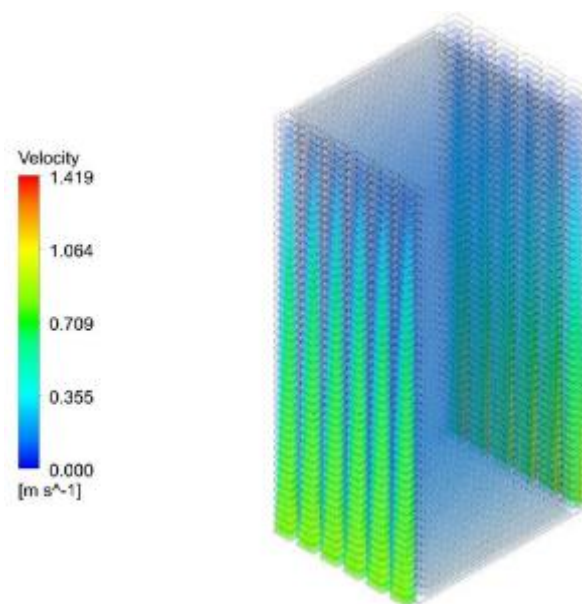
شکل ۴-۴ نمودار دبی جریان نرمالیز شده که به هر طبقه وارد می‌شود

۲-۱-۴- طراحی دوم

در شکل ۴-۵ کانتور فشار طراحی دوم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افت فشار در تمامی کانال‌های هر طبقه یکنواخت است. همچنین در شکل ۴-۶ کانتور سرعت در استک نشان داده شده است.

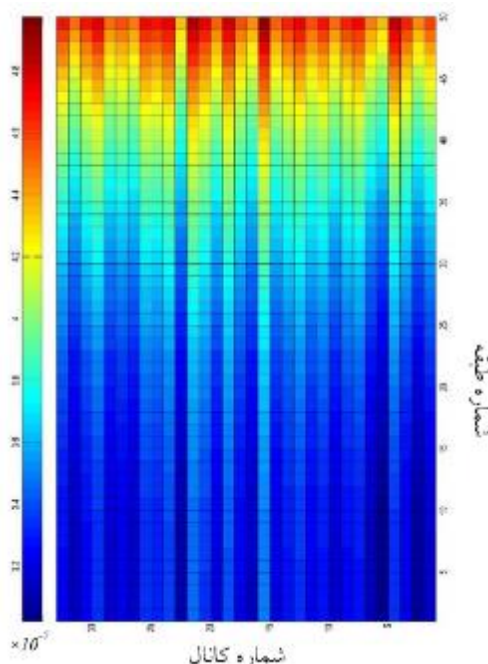


شکل ۴-۵ کانتور فشار در استک طراحی دوم

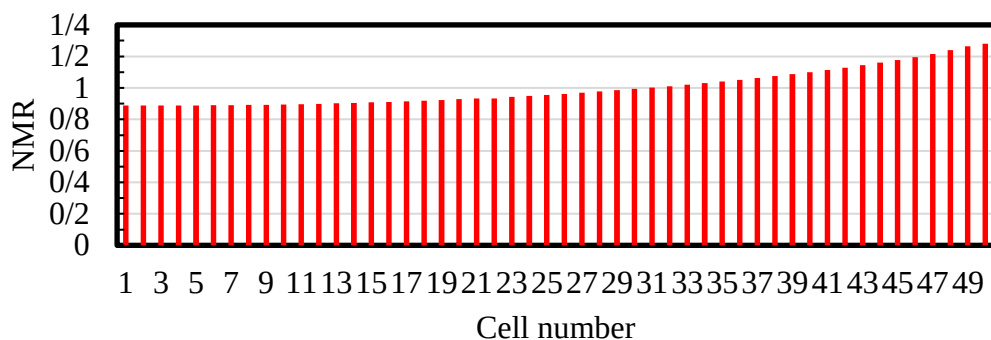


شکل ۴-۶ کانتور سرعت در استک طراحی دوم

در شکل ۴-۷ دبی در تک تک کانال‌ها در هر طبقه‌ی استک نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، دبی در هر طبقه یکنواخت است و از طبقه اول تا طبقه پنجاهم نسبت دبی در کانالی با کمترین دبی و کانالی با بیشترین دبی بیش از ۱/۵ برابر گردیده است. برای بررسی دبی جریانی که به هر طبقه می‌رسد، دبی رسیده به هر طبقه با متوسط دبی تمامی طبقات نرمالیزه شده است که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اختلاف بیشترین و کمترین NMR در حدود ۴۰٪ است؛ اما با بررسی بیشتر ملاحظه می‌شود که دبی جریان بعد از ۲۵ طبقه (از شماره ۵۰ تا ۲۵) تقریباً یکنواخت می‌شود و از کانال شماره ۲۵ به بعد دبی در طبقات یکنواخت می‌شود.



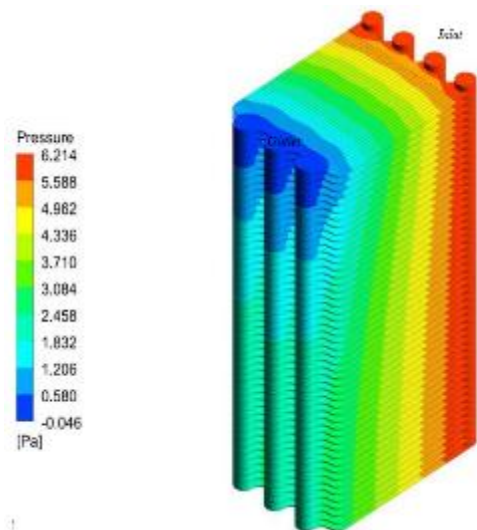
شکل ۴-۷ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی دوم



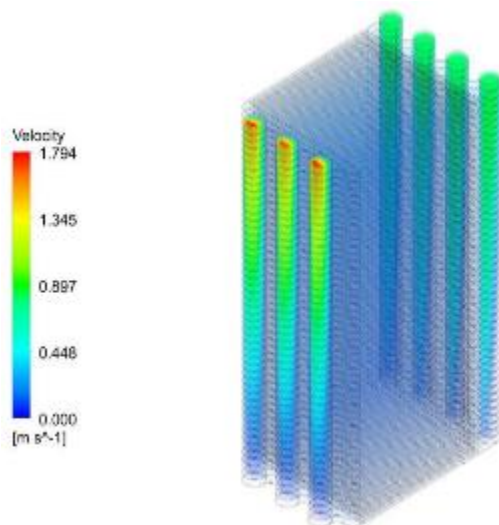
شکل ۴-۸ نمودار دبی جریان نرمالیزه شده که به هر طبقه طراحی دوم وارد می شود.

۳-۱-۴- طراحی سوم

در این طراحی از منیفولدهایی با سطح مقطع دایره ای استفاده شده است. در ادامه کانتور فشار و سرعت در شکل ۴-۹ و شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.

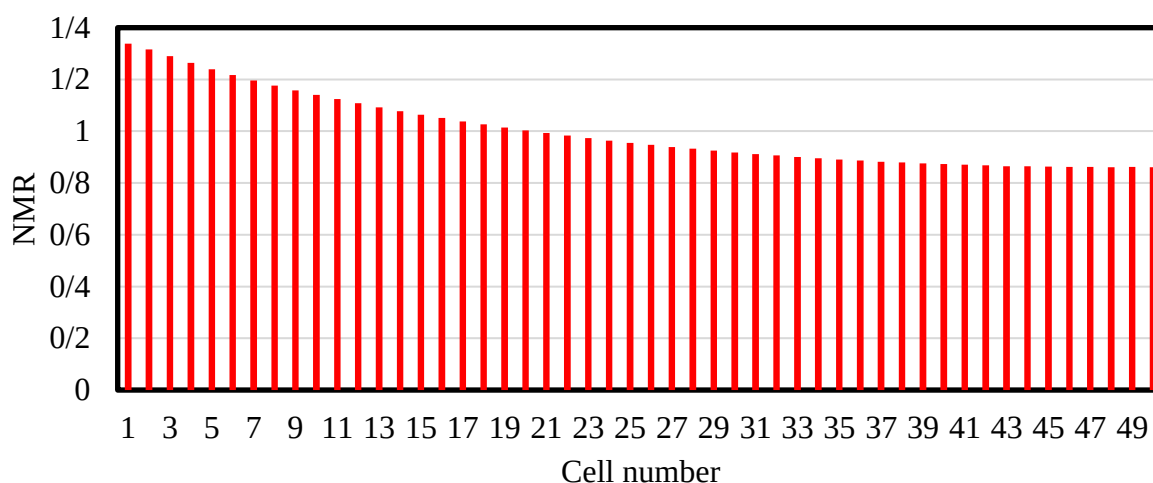


شکل ۴-۹ کانتور فشار در استک طراحی سوم

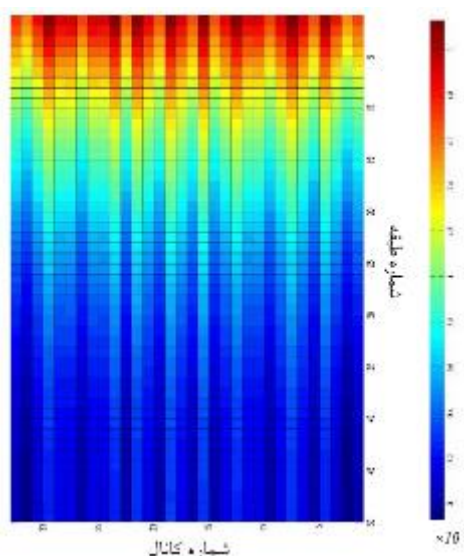


شکل ۴-۱۰ کانتور سرعت در استک طراحی سوم

در شکل ۴-۱۲ دبی در تک تک کانال‌ها در هر طبقه‌ی استک نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، دبی در هر طبقه یکنواخت است و از طبقه اول تا طبقه پنجاهم نسبت دبی در کانالی با کمترین دبی و کانالی با بیشترین دبی بیش از ۱/۶۵ برابر گردیده است. برای بررسی دبی جریانی که به هر طبقه می‌رسد، دبی رسیده به هر طبقه با متوسط دبی تمامی طبقات نرمالیز شده است؛ که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اختلاف بیشترین و کمترین NMR در حدود ۴۰٪ است؛ اما با بررسی بیشتر ملاحظه می‌شود که دبی جریان بعد از ۲۵ طبقه (از شماره ۵۰ تا ۲۵) تقریباً یکنواخت می‌شود و از کانال شماره ۲۵ به بعد دبی در طبقات یکنواخت می‌شود.



شکل ۴-۱۱ نمودار دبی جریان نرمالیز شده که به هر طبقه طراحی دوم وارد می‌شود.



شکل ۴-۱۲ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی سوم

۴-۱-۴- مقایسه‌ی طراحی‌های با جریان متقاطع

انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین

هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ درحالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است. در جدول ۴-۱ انحراف معیار دبی وارد شده در هر طبقه برای استک طرح‌های جریان متقاطع آورده شده است. هرچقدر این عدد بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی انحراف بیشتر دبی هر طبقه‌ی آن استک از دبی متوسط طبقات آن استک است.

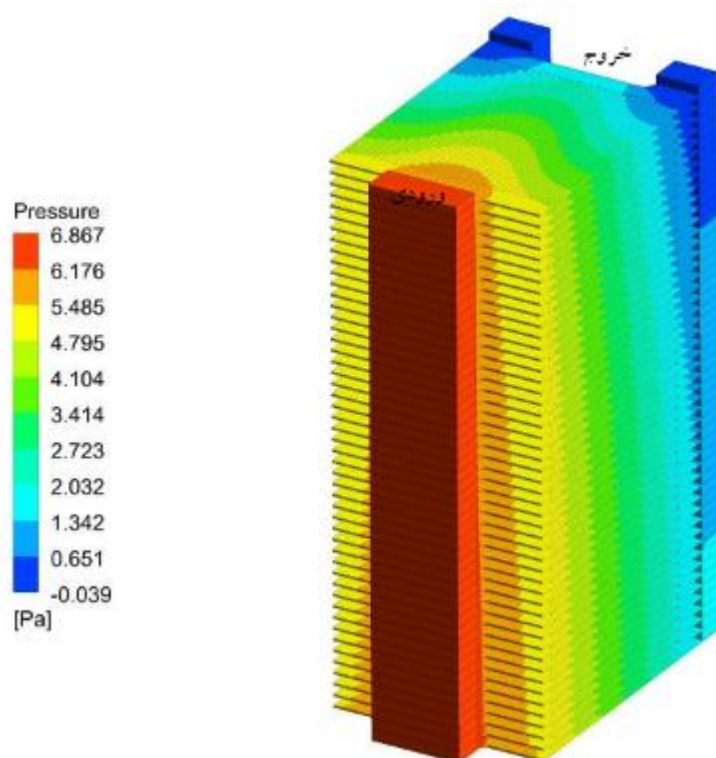
جدول ۴-۱ انحراف معیار دبی جریان نرمالیزه شده طرح‌های جریان متقاطع

طراحی	اول	دوم	سوم
انحراف معیار <i>NMR</i>	5%	11.5%	14.5%

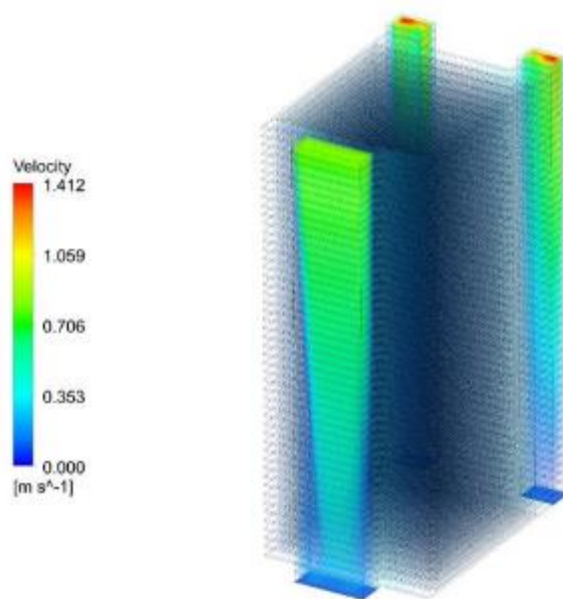
۴-۲- طراحی‌های جریان متقابل

۴-۲-۱- طراحی چهارم

تاکنون دو طرح با جریان متقاطع موردبررسی قرار گرفتند. در ادامه طرح‌های جریان می‌شوند. در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ کانتور سرعت و فشار طراحی چهارم نشان داده شده است.

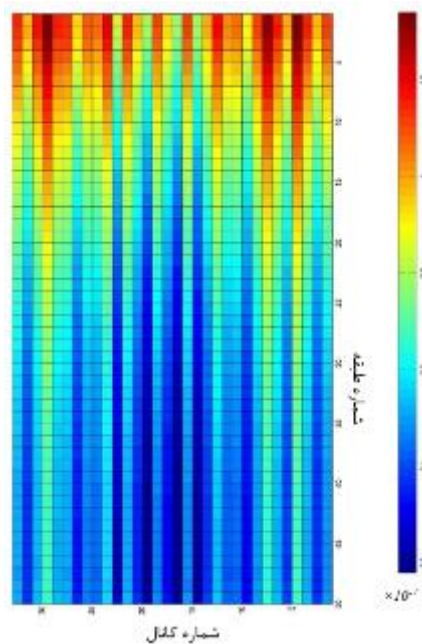


شکل ۴-۱۳ کانتور فشار در استک طراحی چهارم

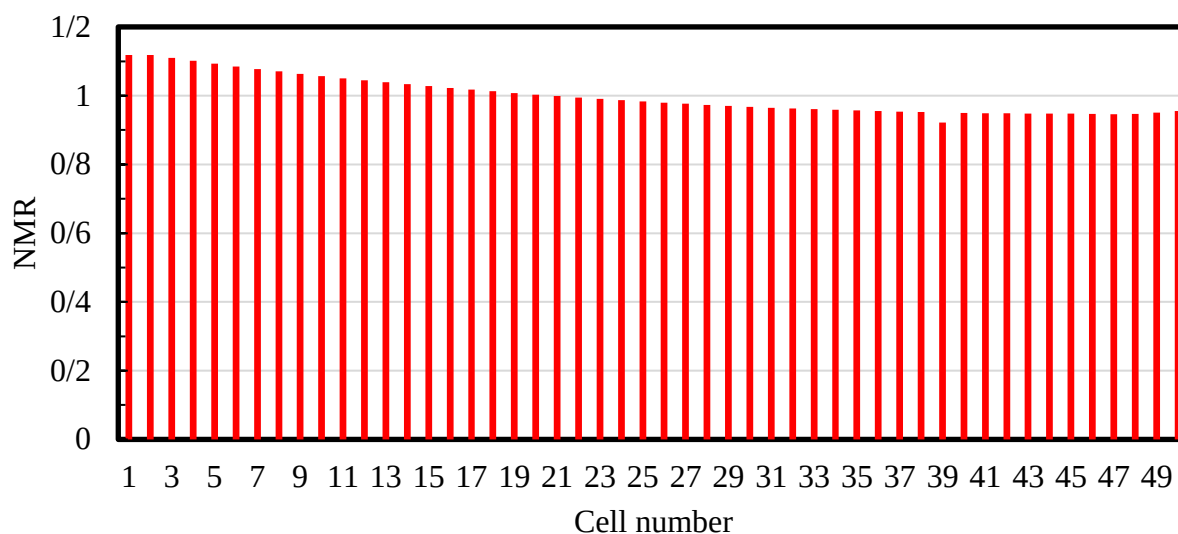


شکل ۴-۱۴ کانتور سرعت در استک طراحی چهارم

در شکل ۴-۱۵ دبی در تک تک کانال‌ها در هر طبقه‌ی استک نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، دبی در هر طبقه یکنواخت است و از طبقه اول تا طبقه پنجاهم نسبت دبی در کانالی با کمترین دبی و کانالی با بیشترین دبی بیش از $\frac{1}{3}$ برابر گردیده است. برای بررسی دبی جریانی که به هر طبقه می‌رسد، دبی رسیده به هر طبقه با متوسط دبی تمامی طبقات نرمالیزه شده است که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اختلاف بیشترین و کمترین NMR در حدود ۴۰٪ است؛ اما با بررسی بیشتر ملاحظه می‌شود که دبی جریان بعد از ۲۵ طبقه (از شماره ۲۵ تا ۵۰) تقریباً یکنواخت می‌شود.



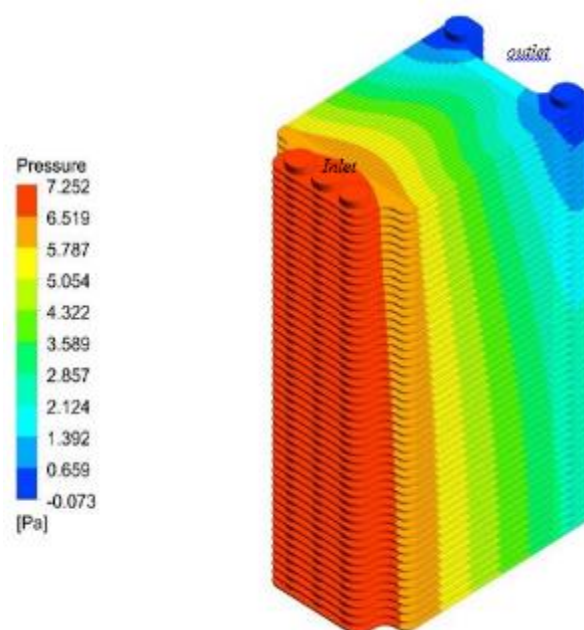
شکل ۴-۱۵ نقشه دویعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی چهارم



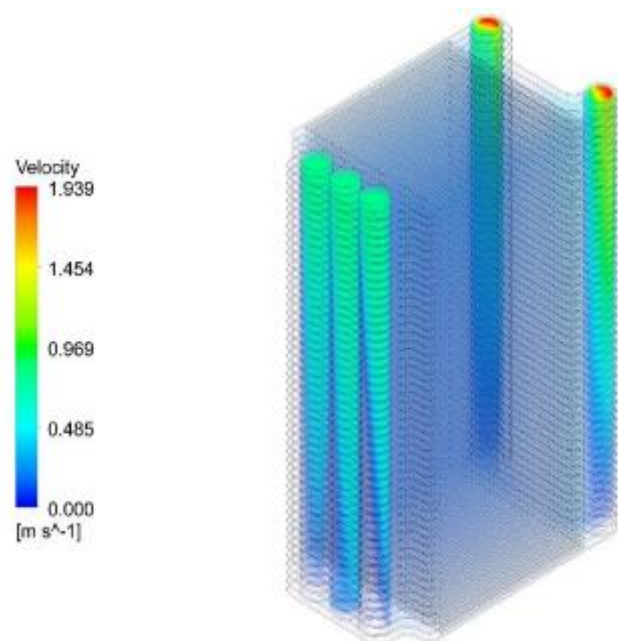
شکل ۴-۱۶ نمودار دبی جریان نرمالیزه شده که به هر طبقه طراحی چهارم وارد می‌شود

۴-۲-۲- طراحی پنجم

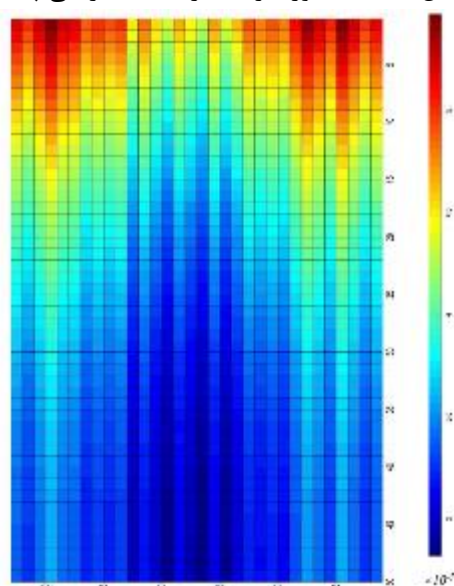
در شکل ۴-۱۷ و شکل ۴-۱۸ کانتور فشار و سرعت استک طراحی چهارم نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۹ دبی در تک‌تک کانال‌ها در هر طبقه‌ی استک نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، دبی در هر طبقه یکنواخت است و از طبقه اول تا طبقه پنجاهم نسبت دبی در کانالی با کمترین دبی و کانالی با بیشترین دبی بیش از ۱/۶۵ برابر گردیده است. برای بررسی دبی جریانی که به هر طبقه می‌رسد، دبی رسیده به هر طبقه با متوسط دبی تمامی طبقات نرمالیزه شده است که در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است. اختلاف کانال‌هایی با بیشترین و کمترین دبی برابر ۴۶٪ است. دبی در نیمه دوم طبقات از یکنواختی بالاتری برخوردار است.



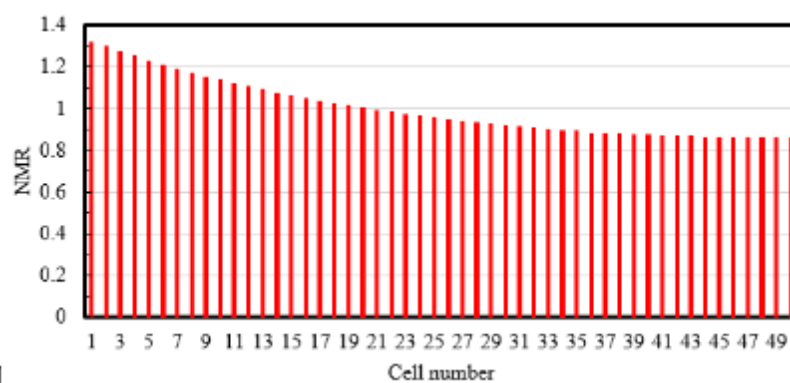
شکل ۴-۱۷ کانتور فشار در استک طراحی پنجم



شکل ۴-۱۸ کانتور سرعت در استک طراحی پنجم



شکل ۴-۱۹ نقشه دوبعدی دبی در تمامی طبقات و کانال‌های استک ۵۰ طبقه‌ای طراحی پنجم



شکل ۴-۲۰ نمودار دبی جریان نرمالیز شده که به هر طبقه طراحی چهارم وارد می‌شود

۳-۲-۴- مقایسه طرح‌های جریان متقابل

مانند حالت جریان متقاطع از برابر انحراف معیار برای یکنواختی دبی جریان در طبقات استفاده شده است. در جدول ۴-۱ انحراف معیار دبی وارد شده در هر طبقه برای استک طرح‌های جریان متقاطع آورده شده است. هرچقدر این عدد بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی انحراف بیشتر دبی هر طبقه‌ی آن استک از دبی متوسط طبقات آن استک است.

جدول ۴-۲ انحراف معیار دبی جریان نرمالیز شده طرح‌های جریان متقاطع

طراحی	چهارم	پنجم
انحراف معیار <i>NMR</i>	5.5%	13.6%

از نتایج می‌توان دریافت که استک طراحی اول و طراحی چهارم به ترتیب بهترین عملکرد را از نظر توزیع دبی در تک‌تک طبقات استک‌های جریان متقاطع و متقابل دارد.

۳-۴- جمع‌بندی

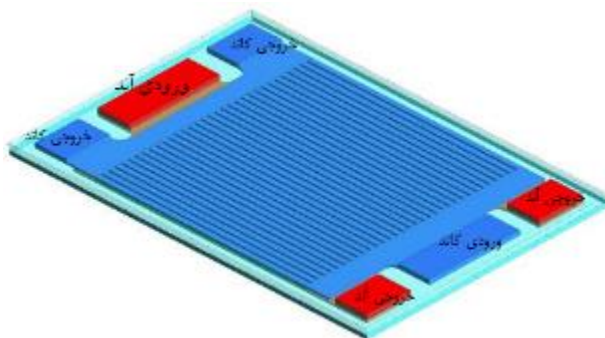
یکی از راهکارهای داشتن میدان جریان یکنواخت هم‌زمان با افت فشار قابل قبول در استک پیل سوختی اکسید جامد، افزایش راهگاه‌های ورودی سیال می‌باشد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در دو آرایش جریان متقابل و جریان متقاطع پنج طرح با در نظر گرفتن قابلیت ساخت برای پیل‌های سوختی با توان بالا ارائه گردیده‌اند. به کمک پارامتر دبی جریان نرمال شده در هر کانال، میزان یکنواختی توزیع واکنش‌دهنده‌ها در کانال‌های یک طرح خاص محاسبه شد که طرح ۱ و ۳ دارای کمترین انحراف معیار دبی جریان نرمال شده بودند. در مرحله‌ی بعد میزان دبی در طبقات استک‌های ۵۰ طبقه‌ای هرکدام از طرح‌ها مقایسه گردید که طرح‌های ۱ و ۳ به ترتیب برای آرایش جریان متقاطع و متقابل بیشترین یکنواختی را داشتند. در نهایت طرح ۳ برای شبیه‌سازی و ساخت استک ۵۰ طبقه‌ای در پژوهشگاه نیرو استفاده خواهد گردید.

۵- شبیه‌سازی الکتروشیمیایی پیل‌های بهبود یافته

در این بخش به شبیه‌سازی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای با آرایش جریان متقابل و میدان جریان بهبود یافته که در بخش‌های قبلی فرآیند بهینه‌سازی آن صورت گرفت پرداخته می‌شود. میدان جریان مورد نظر طرح ۳ از مجموعه طرح‌های پیشنهادی می‌باشد. این شبیه‌سازی شامل تمام پدیده‌های انتقال سیال، حرارت، الکتروشیمیایی می‌شود. در ابتدای این بخش نتایج شبیه‌سازی برای سوخت هیدروژن و اکسنده‌ی هوا آورده شده است. در بخش بعدی نتایج برای سوخت هیدروژن و اکسنده‌ی اکسیژن خالص استفاده شده است.

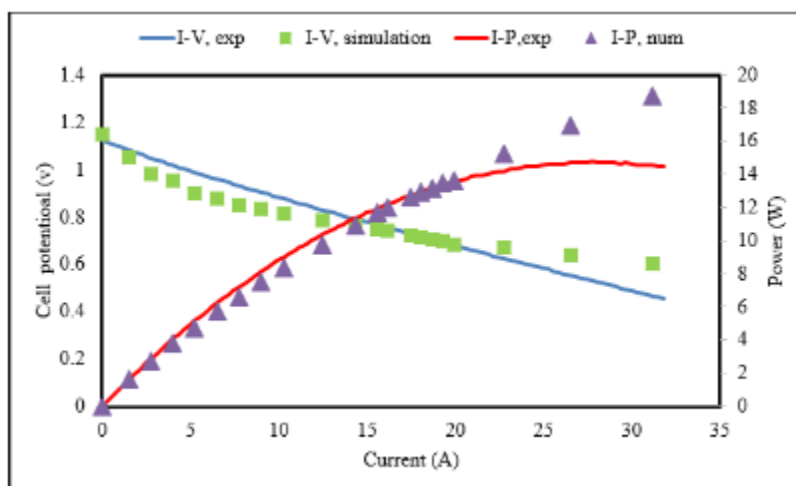
۵-۱- پیل سوختی موازی جریان متقابل: تک طبقه و اکسنده هوا

در این بخش پیل سوختی با میدان جریان متقابل (شکل ۵-۱) که جریان در کانال‌ها و استک آن بهینه‌سازی شده است (طرح ۳) شبیه‌سازی انتقال حرارت، سیالاتی، معادلات الکتروشیمیایی شده است. شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است که تئوری شبیه‌سازی آن در فصل قبل توضیح داده شده است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده می‌شود.



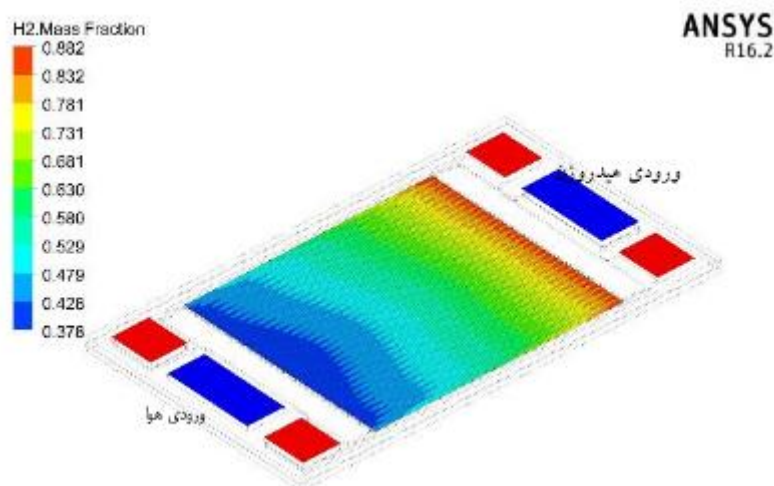
شکل ۵-۱ هندسه پیل سوختی موازی با میدان جریان متقابل

در ادامه ابتدا صحت نتایج با داده‌های آزمایشگاهی بررسی شده است (شکل ۵-۲) همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج عددی و آزمایشگاهی از دقت خوبی برخوردارند و اختلاف موجود به دلیل هندسه‌ی متفاوت پیل‌های مورد بررسی در عددی و آزمایشگاهی است.



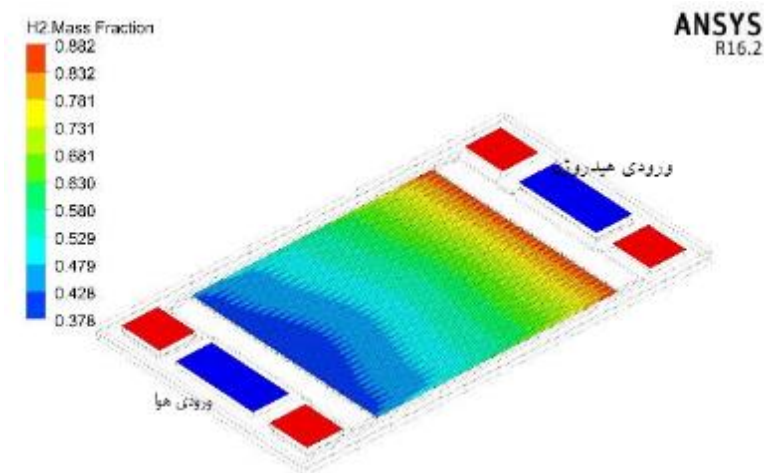
شکل ۵-۲ منحنی پلاریزاسیون و صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی و عددی

در شکل ۳-۵ توزیع هیدروژن روی الکترولیت نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود از ورودی به سمت خروجی به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد؛ که دلیل آن مصرف هیدروژن در طی مسیر می‌باشد. همچنین همان‌طور که دیده می‌شود واکنش هیدروژن به خوبی به سطح زیر ریب‌ها نفوذ کرده است



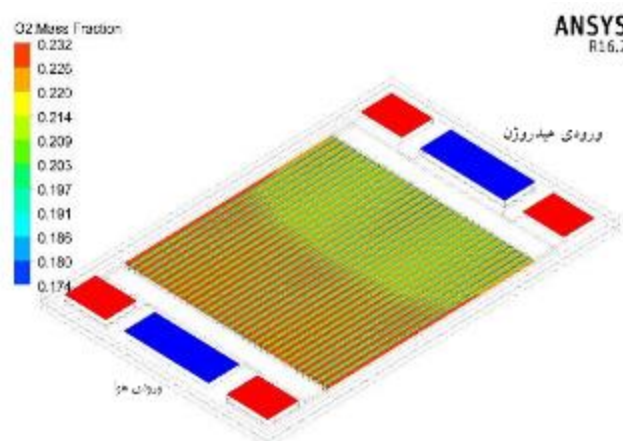
شکل ۳-۵ توزیع هیدروژن روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل

در شکل ۴-۵ توزیع آب روی سطح الکترولیت نشان داده شده است، همان‌طور که دیده می‌شود. میزان آب موجود در سمت خروجی بیشتر می‌باشد. چراکه در این سمت میزان هیدروژن کمتر می‌باشد و مولکول‌های آب به دلیل داشتن جرم بیشتر این فضا را اشغال کرده‌اند. همچنین میزان اکسیژن در این ناحیه بیشتر می‌باشد که منجر به تولید بیشتر آب می‌شود.



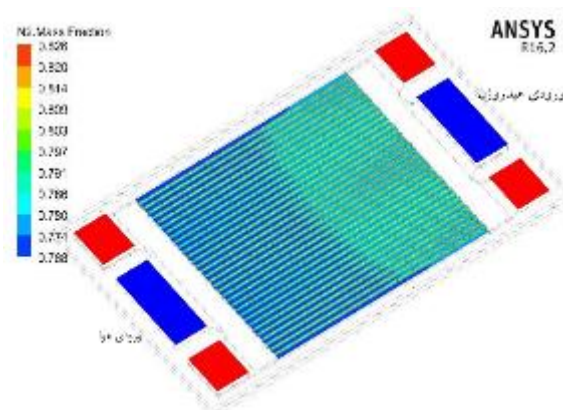
شکل ۴-۵ توزیع آب روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل

در شکل ۵-۵ توزیع اکسیژن روی الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود از سمت ورودی هوا تا سمت خروجی میزان کسر جرمی اکسیژن کاهش می‌یابد که دلیل آن مصرف اکسیژن طی مسیر می‌باشد. همچنین نسبت به سمت آند، در سمت کاتد اکسیژن به مقدار کمتر به سطح زیر ریب‌ها رسیده است. همچنین توزیع اکسیژن در تمامی کانال‌ها یکنواخت می‌باشد.



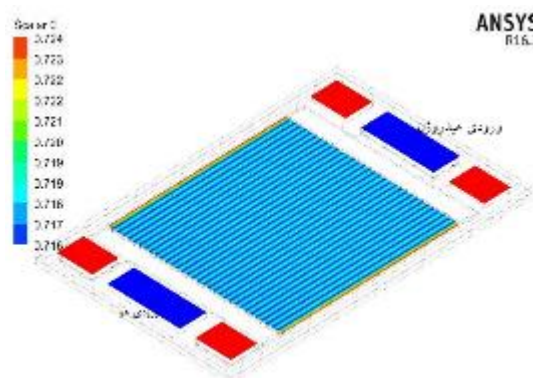
شکل ۵-۵ توزیع اکسیژن روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل

همان‌طور که در شکل ۵-۶ نشان داده شده است میزان نیتروژن به دلیل مصرف اکسیژن در سمت خروجی بیشتر می‌باشد همچنین کسر جرمی نیتروژن زیر ریب‌ها بیشتر از اکسیژن می‌باشد.



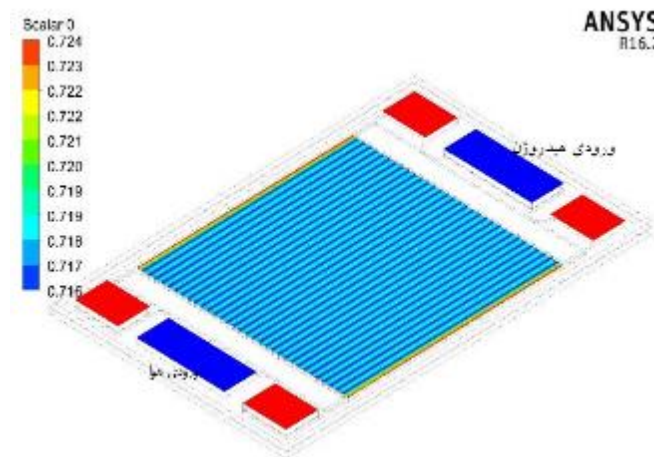
شکل ۵-۶ توزیع نیتروژن روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل

در شکل ۵-۷ توزیع پتانسیل الکتریکی روی سطح الکترولیت نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود توزیع پتانسیل الکتریکی روی سطح الکترولیت کاملاً یکنواخت می‌باشد.



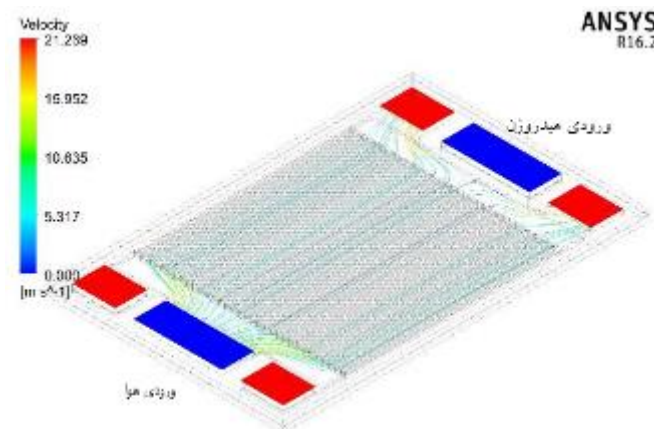
شکل ۵-۷ توزیع پتانسیل الکتریکی روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل

در شکل ۵-۸ توزیع دما روی سل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دما در مرکز سل بیشترین مقدار را دارد چراکه در این ناحیه بیشترین میزان واکنش صورت می‌گیرد. همچنین میزان افزایش دما روی سل ۲ درجه می‌باشد که در مجموع دما روی سطح سل یکنواخت می‌باشد و میزان تغییر دما به قدری کم می‌باشد که باعث توزیع یکنواخت تنش روی سطح سل شود.



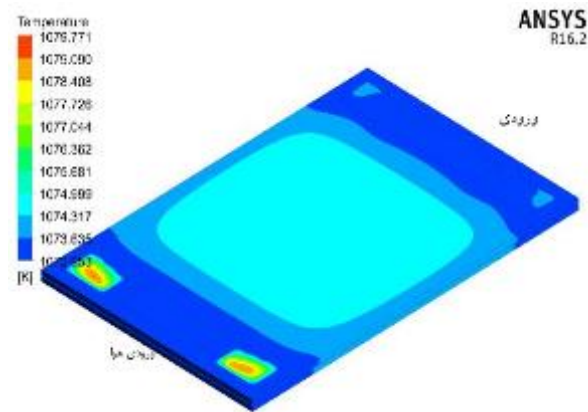
شکل ۵-۸ توزیع دما روی سطح الکترولیت پیل سوختی با میدان جریان متقابل

همان‌طور که در شکل ۵-۹ دیده می‌شود خطوط جریان کاملاً یکنواخت روی کانال‌های سمت کاتد قرار گرفته‌اند که این یکنواختی منجر به یکنواخت توزیع شدن واکنش‌دهنده‌ها و همچنین دما روی سطح سل شده است.

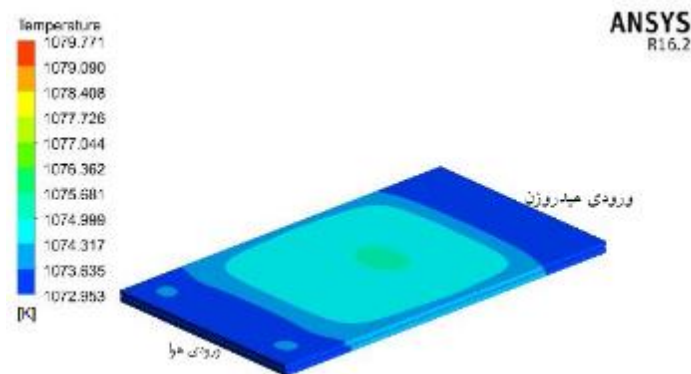


شکل ۵-۹ خطوط جریان هوا در سمت کاتد میدان جریان

توزیع دما روی سطح اینترکانکت‌ها در شکل ۵-۱۰ و شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دما روی در قسمتی از اینترکانکت که با سل در تماس می‌باشد کاملاً یکنواخت می‌باشد که برای کنترل تنش‌ها بسیار مناسب می‌باشد. همچنین همان‌طور که ملاحظه می‌شود دمای گازهای خروجی هیدروژن بیشترین دمای موجود در سل می‌باشد.

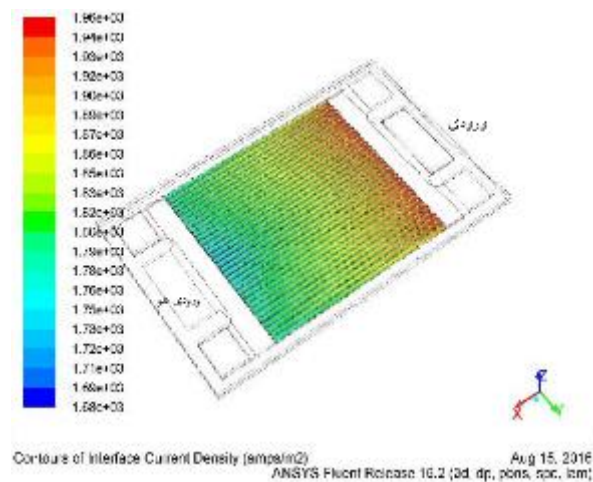


شکل ۵-۱۰ توزیع دما روی سطح اینترکانکت سمت کاتد میدان جریان متقابل



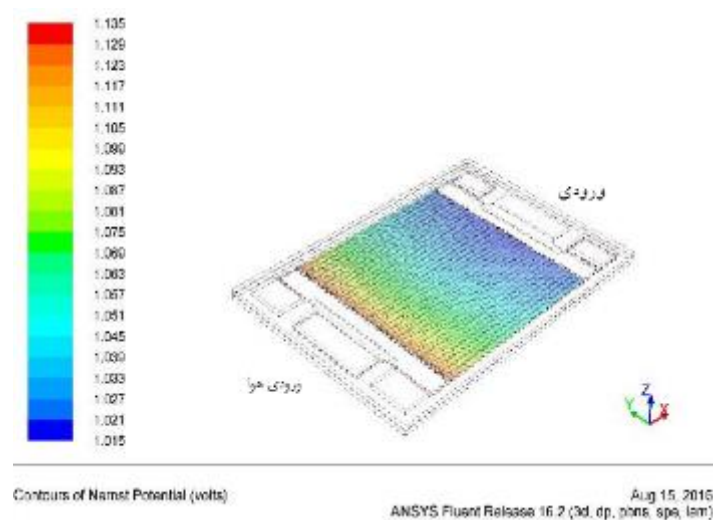
شکل ۵-۱۱ توزیع دما روی سطح اینترکانکت سمت آند میدان جریان متقابل

همان طور که در شکل شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. چگالی جریان روی سطح الکترولیت یکنواخت می باشد و در سمت هیدروژن بیشتر می باشد.



شکل ۵-۱۲ توزیع چگالی جریان روی سطح الکترولیت

در شکل ۵-۱۳ ولتاژ نرنست روی سطح الکترولیت نشان داده شده است که بیشترین مقدار آن ۱/۱۳۵ می باشد.

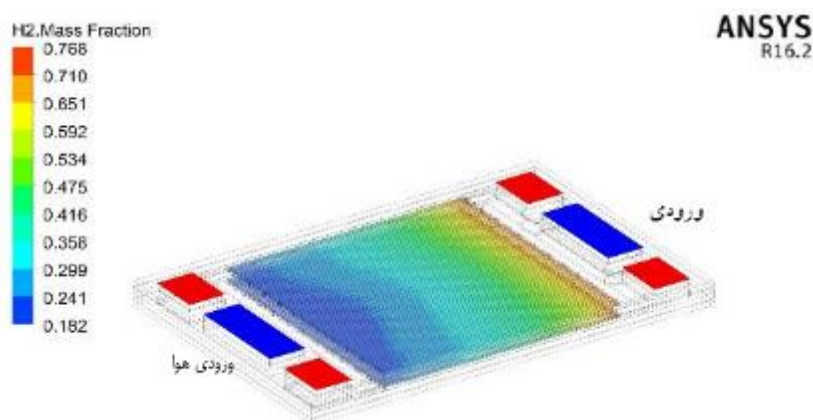


شکل ۱۳-۵ توزیع ولتاژ نرنست روی سطح الکترولیت

۵-۱-۱- استک دوطبقه‌ای

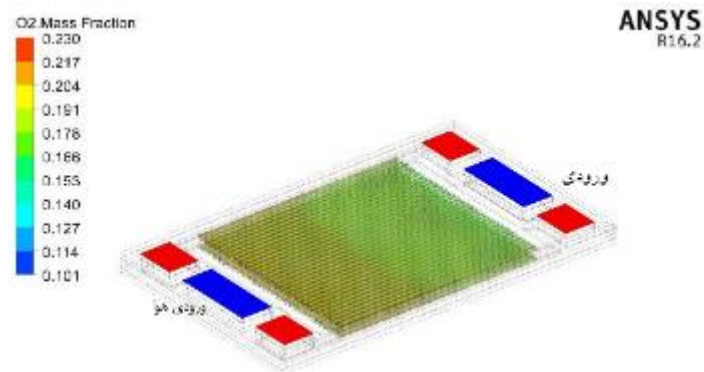
بعد از شبیه‌سازی پیل سوختی تک‌واحدی، در این مرحله استک دوطبقه‌ای با اینترکانکت های مرحله‌ی قبل شبیه‌سازی می‌شود. هدف از این شبیه‌سازی دستیابی به عملکرد استک دوطبقه‌ای و بررسی انتقال گونه‌ها و جریان در هر طبقه می‌باشد.

در شکل ۱۴-۵ توزیع کسر جرمی هیدروژن روی سطح الکترولیت هر طبقه نشان داده شده است. و همان‌طور که ملاحظه می‌شود توزیع گاز هیدروژن در هر طبقه و دوطبقه در مقایسه باهم، یکنواخت می‌باشد. که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت در طبقات می‌باشد.



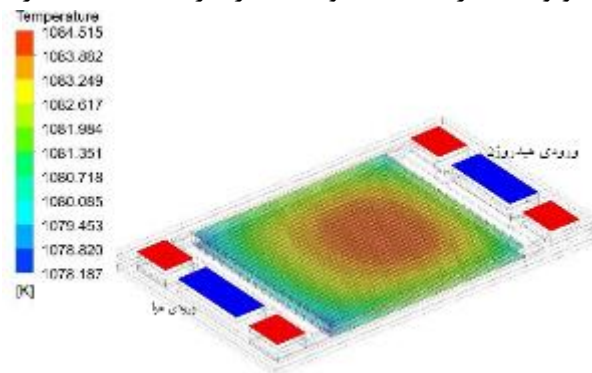
شکل ۱۴-۵ توزیع کسر جرمی هیدروژن روی سطح الکترولیت هر طبقه از استک دو واحدی

در شکل ۱۵-۵ توزیع گاز اکسیژن روی سطح الکترولیت هر دوطبقه نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت توزیع گاز هیدروژن در هر طبقه یکنواخت می‌باشد و در مقایسه طبقات نسبت به هم ملاحظه می‌شود که توزیع در دوطبقه مشابه یکدیگر می‌باشد که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت هوا در سمت کاتد می‌باشد. نتیجه این توزیع یکنواخت هوا توزیع یکنواخت واکنش‌های الکتروشیمیایی خواهد بود.



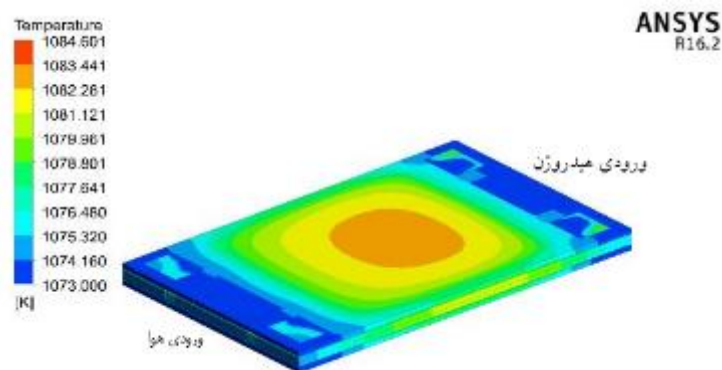
شکل ۵-۱۵ توزیع کسر جرمی اکسیژن روی سطح الکترولیت هر طبقه از استک دو واحدی

در شکل ۵-۱۶ توزیع دما روی هر سل‌های هر طبقه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دما روی سطح سل در مرکز بیشتر می‌باشد. با مقایسه دمای سل با حالت استک تک‌واحدی ملاحظه می‌کنیم که دمای سل افزایش یافته استک می‌تواند منجر به افزایش نرخ واکنش‌های شیمیایی و در نتیجه افزایش توان سل گردد. لذا انتظار می‌رود توان هر طبقه از استک دو واحدی از استک تک‌واحدی در شرایط مشابه بیشتر باشد.



شکل ۵-۱۶ توزیع دما روی سطح الکترولیت هر طبقه از استک دو واحدی

در شکل ۵-۱۷ توزیع دما روی سطح اینترکانکت‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود توزیع دمای سل به اینترکانکت انتقال پیدا کرده است و در مرکز اینترکانکت بیشتر از نقاط دیگر می‌باشد که نسبت به استک تک طبقه‌ای در حدود ۱۰ درجه افزایش داشته است.



شکل ۵-۱۷ توزیع دما روی اینترکانکت‌های استک دو طبقه‌ای

در بخش بعدی نتایج برای اکسنده‌ی اکسیژن خالص ارائه خواهد شد.

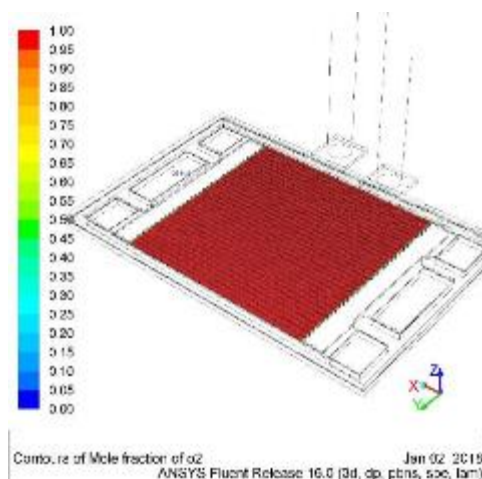
۵-۲- پیل سوختی جریان متقابل بهبود یافته: اکسنده اکسیژن

در این شبیه‌سازی سوخت اکسیژن به صورت خالص وارد شده است. دبی‌های اکسیژن و هیدروژن متناسب با ضریب بهره‌ی ۵۰٪ می‌باشد، یعنی در هر جریان و ولتاژ مشخص دبی به گونه‌ای تغییر خواهد که این میزان از ضریب بهره برقرار باشد.

در ادامه نمودارهای توزیع گونه‌ها، چگالی جریان و دما را در توان ماکزیمم بررسی خواهیم نمود.

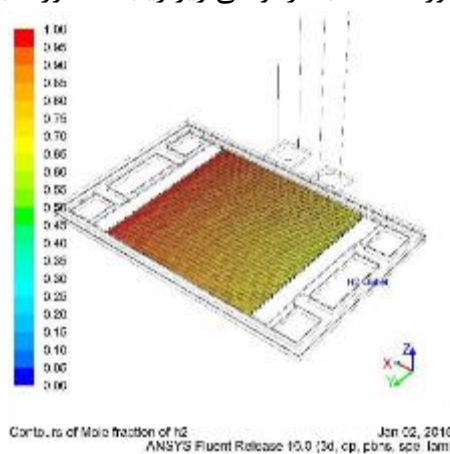
۵-۲-۱- استک تک طبقه‌ای

در شکل ۵-۱۸ توزیع اکسیژن روی سل نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود تنها گونه‌ی موجود در سمت کاتد اکسیژن می‌باشد، لذا انتظار می‌رود که توزیع اکسیژن در سمت کاتد یکنواخت و برابر یک باشد که نتایج شبیه‌سازی هم همین موضوع را نشان می‌دهد.



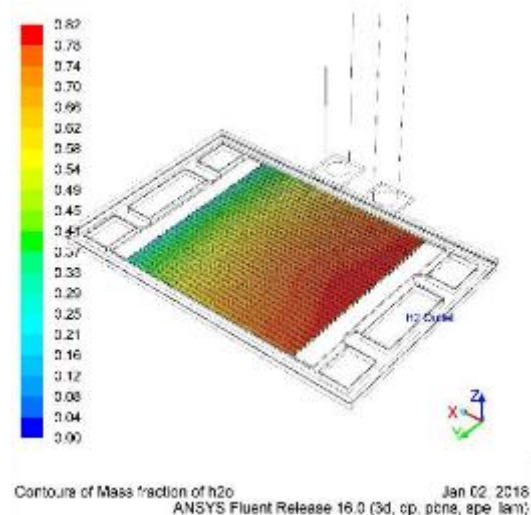
شکل ۵-۱۸ توزیع کسر جرمی اکسیژن روی الکترولیت

در شکل ۵-۱۹ توزیع هیدروژن روی سل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سمت ورودی آند هیدروژن بیشتر از سمت خروجی می‌باشد. دلیل آن مصرف سوخت از ورودی به سمت خروجی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هیدروژن به دلیل داشتن جرم مولکولی کمتر زیر ریب‌ها را هم پر می‌کند. طراحی بهینه‌ی ریب‌ها باعث شده است که سوخت‌رسانی به صورت مناسب در نواحی زیر ریب‌ها صورت بگیرد.



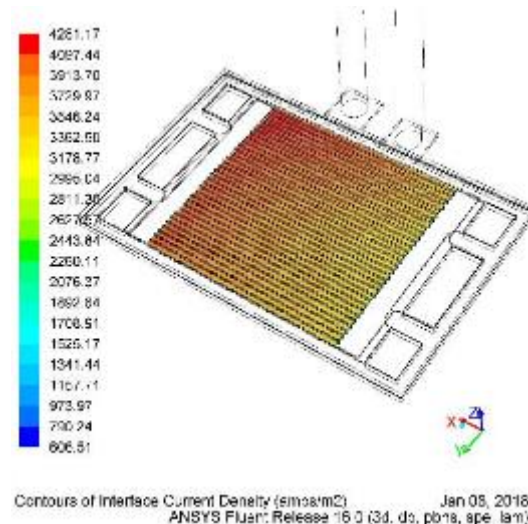
شکل ۵-۱۹ توزیع هیدروژن روی الکترولیت

در شکل ۵-۲۰ توزیع آب روی الکترولیت نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر جا که میزان هیدروژن کمتر می‌باشد آب بیشتری نفوذ کرده است که دلیل آن جرم مولکولی بیشتر آب می‌باشد. نکته‌ی مهم در توزیع تمام گونه‌ها، توزیع کاملاً یکنواخت واکنش‌دهنده‌ها روی الکترولیت می‌باشد که این در نتیجه‌ی طراحی مناسب میدان جریان و همچنین استفاده از آرایش جریان متقابل می‌باشد.



شکل ۵-۲۰ توزیع هیدروژن روی الکترولیت

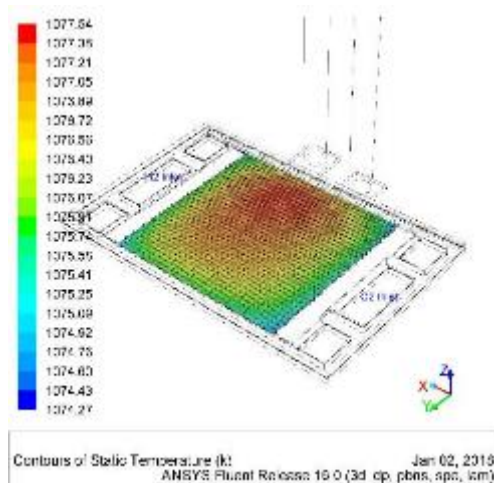
در شکل ۵-۲۱ توزیع چگالی جریان روی سل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود چگالی جریان استخراج‌شده از سل تقریباً در تمام سل یکسان می‌باشد که این ناشی از طراحی بهبود یافته می‌باشد. از نتایج این توزیع یکنواخت چگالی جریان می‌توان انتظار داشت که توزیع دما روی سل هم یکنواخت باشد که در ادامه بررسی می‌شود.



شکل ۵-۲۱ توزیع هیدروژن روی الکترولیت

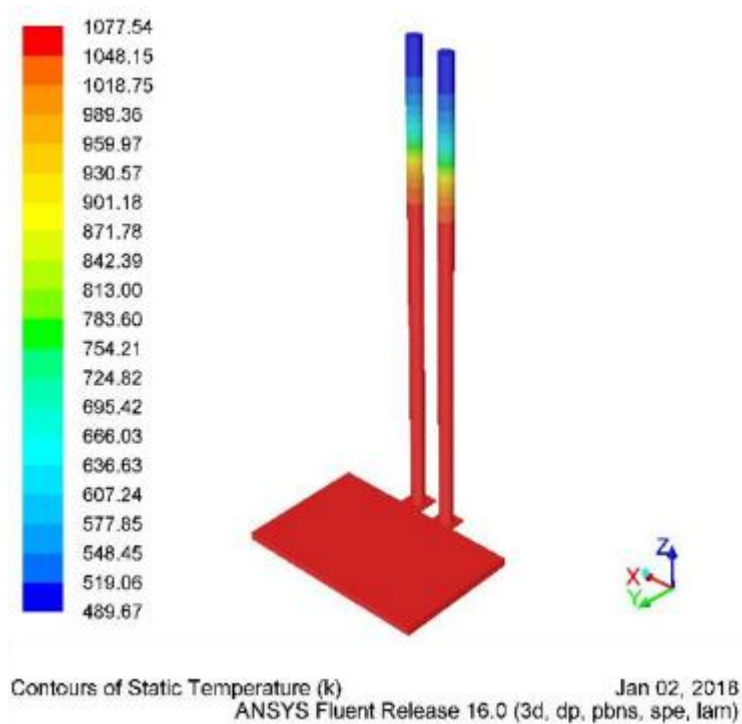
در شکل ۵-۲۲ توزیع دما روی سل نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ماکزیمم دما روی سل در مرکز آن قرار دارد که دلیل آن دور بودن مرکز سل از لبه‌های اینترکانکت می‌باشد (جایی که به واسطه‌ی انتقال حرارت

جابجایی و تشعشعی خنک کاری انجام می‌شود؛ اما انحراف معیار دمای روی سل در حدود ۲.۷ درجه می‌باشد که با توجه به استانداردهای سل این میزان از یکنواختی دما آن‌هم در توان حداکثری بسیار مناسب می‌باشد.



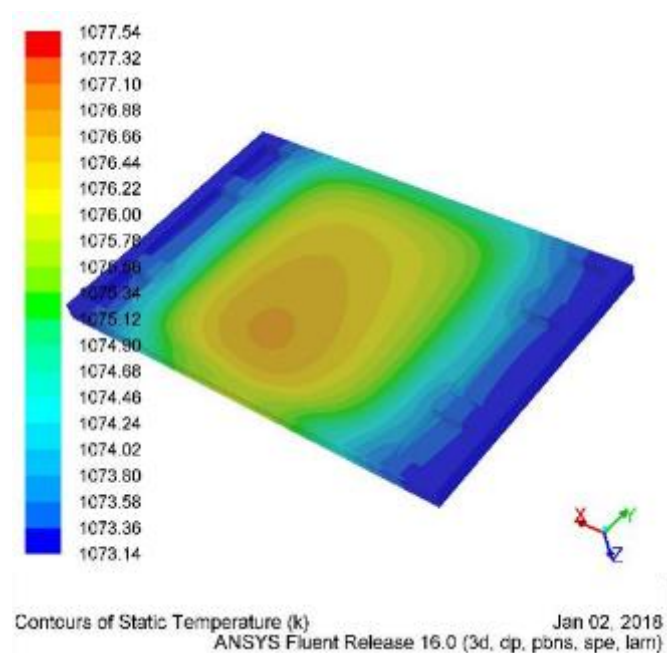
شکل ۵-۲۲ توزیع دما روی الکترولیت

توزیع دما روی استک در شکل ۵-۲۳ نشان داده شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود دما در قسمتی از میله‌ها که بیرون از کوره قرار دارد کم‌ترین مقدار را دارد.



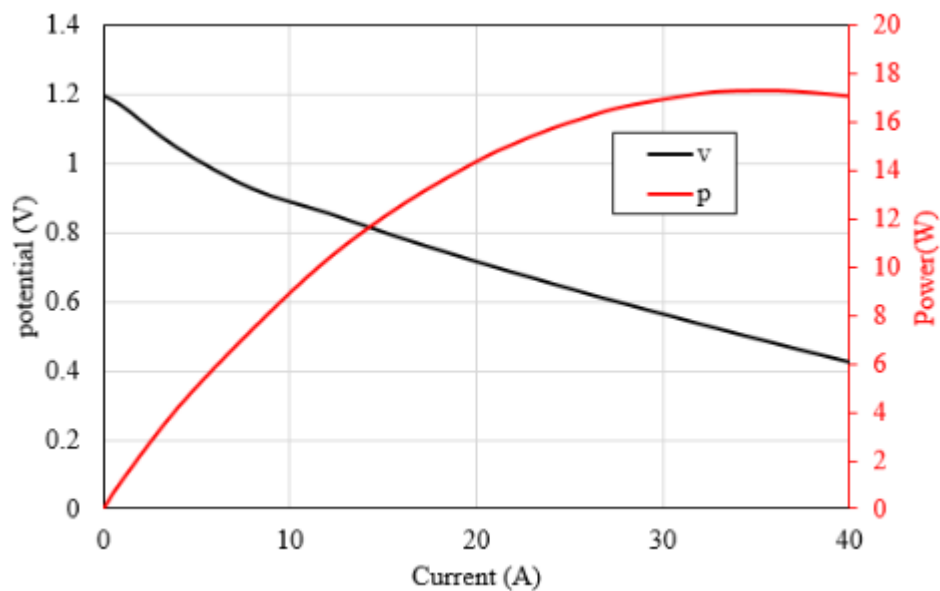
شکل ۵-۲۳ توزیع دما در مجموعه استک

در شکل ۵-۲۴ توزیع دما روی اینترکانکت‌ها نشان داده می‌شود، همان‌طور که ملاحظه می‌شود مشابه سل‌ها بیشترین دما روی قسمت مرکزی اینترکانکت‌ها قرار دارد. نکته‌ی دیگری که می‌توان دریافت این است که ماکزیمم دما در استک روی سل قرار دارد و دما روی اینترکانکت‌ها کمتر از الکترولیت می‌باشد.



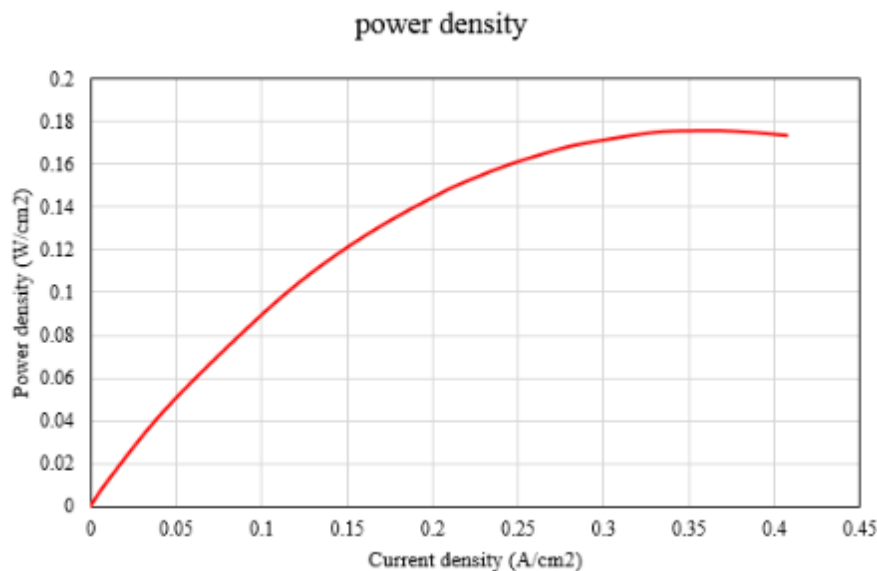
شکل ۲۴-۵ توزیع دما روی اینترکانکت ها

در شکل ۲۵-۵ منحنی عملکرد پیل سوختی نشان داده شده است، همان طور که ملاحظه می شود بیشتر توان پیل سوختی در جریان ۳۸ آمپر و با مقدار ۱۷.۳ وات می باشد.



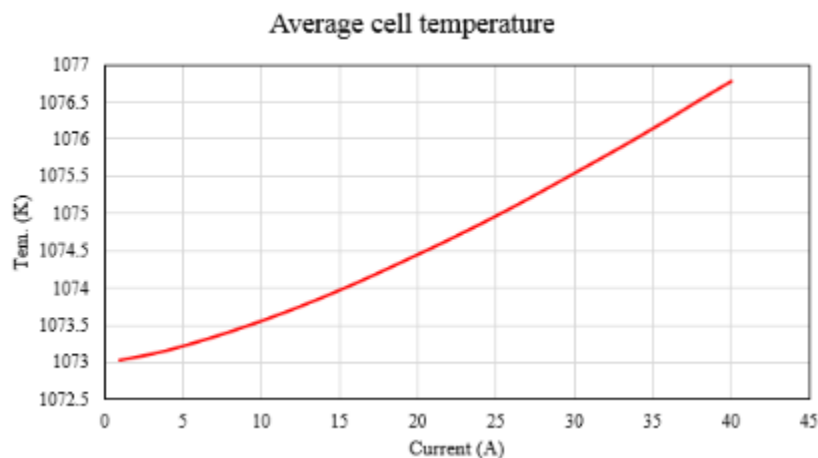
شکل ۲۵-۵ منحنی توان و ولتاژ پیل سوختی

در شکل ۲۶-۵ نمودار چگالی توان برحسب چگالی جریان نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود بیشترین چگالی توان پیل سوختی ۰.۱۷ می باشد که انتظار می رود این میزان چگالی توان با افزایش تعداد طبقات استک افزایش بیابد. همچنین چگالی جریان متناسب با چگالی توان ماکزیمم برابر با ۰.۳۵ می باشد.



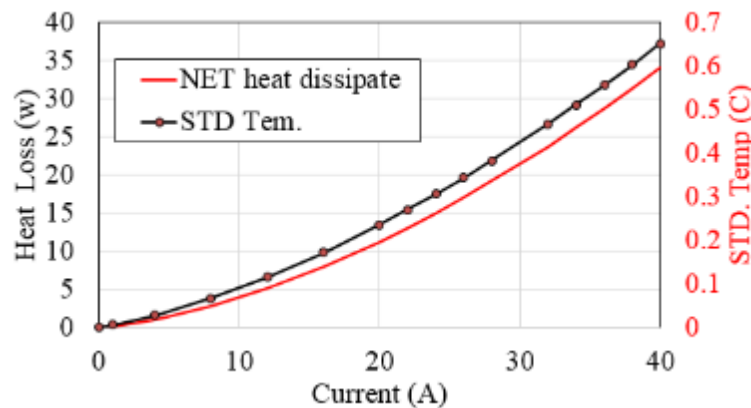
شکل ۵-۲۶ منحنی چگالی توان پیل سوختی

در شکل ۵-۲۷، تغییرات دما برحسب جریان در داخل سل نشان داده شده است. همان طور که انتظار می رود با افزایش جریان و افزایش توان پیل سوختی حرارت تولیدشده از پیل افزایش می یابد و بعد از توان ماکزیمم به دلیل افزایش مقاومت اهمی و در نتیجه توان اتلافی حرارتی این روند همچنان ادامه دارد.



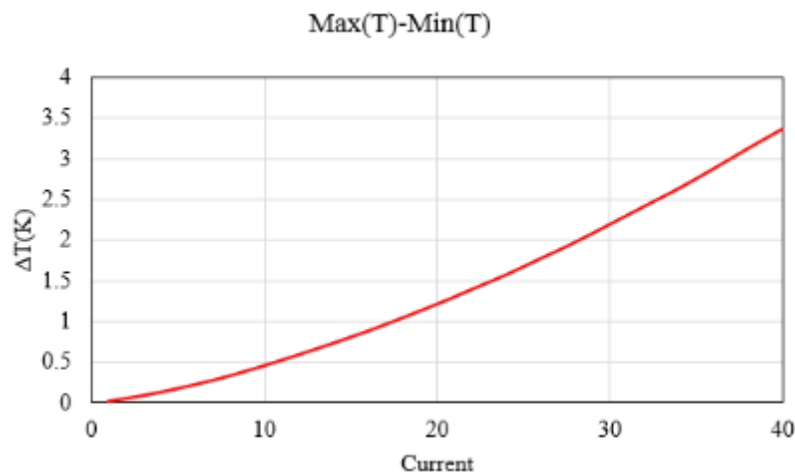
شکل ۵-۲۷ نمودار متوسط دمای سل برحسب جریان

در شکل ۵-۲۸ نمودار توان اتلافی از استک برحسب جریان نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، با افزایش جریان به طور پیوسته توان حرارتی اتلافی از پیل سوختی دائماً در حال افزایش می باشد، دلیل آن افزایش نرخ حرارت تولیدی از واکنش های الکتروشیمیایی می باشد. همچنین انحراف معیار دما روی الکترولیت برحسب جریان نشان داده شده است. هرچقدر این عدد کوچک تر باشد یکنواختی توزیع دما روی سل بیش تر می شود؛ اما با افزایش دما این مقدار افزایش می یابد. با این حال در محدوده ی عملکردی پیل سوختی ماکزیمم انحراف معیار 0.6 درجه می باشد که این مقدار بسیار پایینی در مقایسه با استانداردهای پیل سوختی اکسید جامد می باشد و نشان از توزیع یکنواخت دما روی سل می باشد؛ اما دلیل افزایش انحراف معیار با افزایش جریان این است که با افزایش جریان توان اتلافی حرارتی پیل سوختی افزایش می یابد اما شرایط محیط اطراف پیل سوختی مقدار ثابت می باشد و لذا از مرزها اتلاف حرارت داریم که باعث غیریکنواختی دما روی سل می شود.



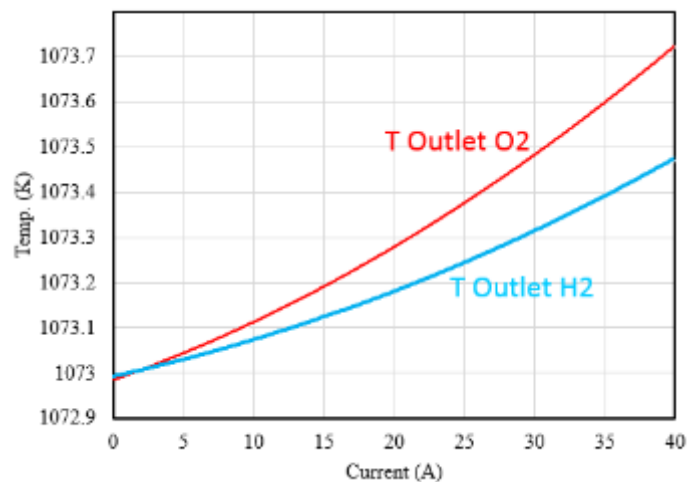
شکل ۲۸-۵ نمودار حرارت اتلافی و انحراف معیار دما روی سل

در شکل ۲۹-۵ اختلاف دمای ماکزیمم و مینیم سل برحسب جریان نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش جریان اختلاف دمای حداکثری و حداقلی در سل افزایش می یابد. دلیل آن را می توان با افزایش انحراف معیار دما توجیه نمود. همان طور که در آنجا گفته شد با افزایش دمای مرکز سل در جریان های بالا دمای دیواره های سل به دلیل انتقال حرارت جابجایی مدام خنک می شود که این امر باعث خنک کاری سل در دیواره های اینترکانکت ها می شود که همین امر باعث افزایش اختلاف دمای حداقلی و حداکثری در پیل می شود. با این شرایط انتظار می رود در صورتی که اطراف پیل سوختی عایق باشد دما روی سل یکنواخت تر بشود چراکه اعمال اختلاف دما خنک کاری از دیواره های استک می باشد.



شکل ۲۹-۵ اختلاف دمای ماکزیمم و مینیم در سل برحسب جریان

در شکل ۳۰-۵، دمای گازهای خروجی از استک نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش جریان این دما افزایش می یابد و همچنین دمای گازهای خروجی سمت کاند بیشتر می باشد. چراکه در خروجی آن علاوه بر هیدروژن آب نیز وجود دارد و از آنجایی که ظرفیت گرمایی آب زیاد می باشد گرمای زیادی را از استک گرفته و دمایش کمتر افزایش می یابد.

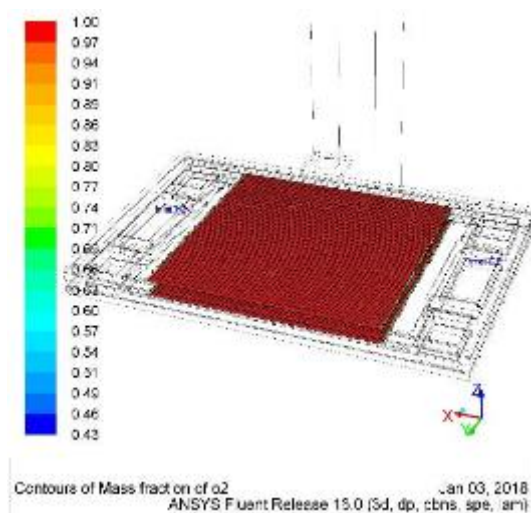


شکل ۳۰-۵ دمای سوخت و اکسندۀ خروجی از استک برحسب جریان

۲-۲-۵- استک دوطبقه‌ای

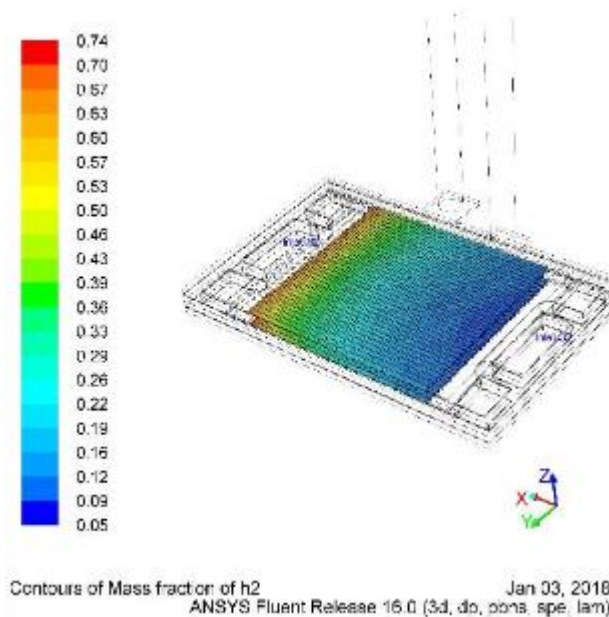
در ادامه توزیع واکنش‌دهنده‌ها و فرآورده‌های واکنش‌های الکتروشیمیایی را برای توان ماکزیمم که در جریان ۵۶ آمپر اتفاق می‌افتد رسم می‌نماییم.

در شکل ۳۱-۵، توزیع کسر جرمی اکسیژن روی الکترولیت در طبقات ۱ و ۲ نشان داده شده است. از آنجایی که تنها سیال موجود در سمت کاتد همان اکسیژن می‌باشد و همان‌طور که انتظار می‌رود کسر جرمی اکسیژن در تمام نقاط هر دوطبقه یکسان می‌باشد.



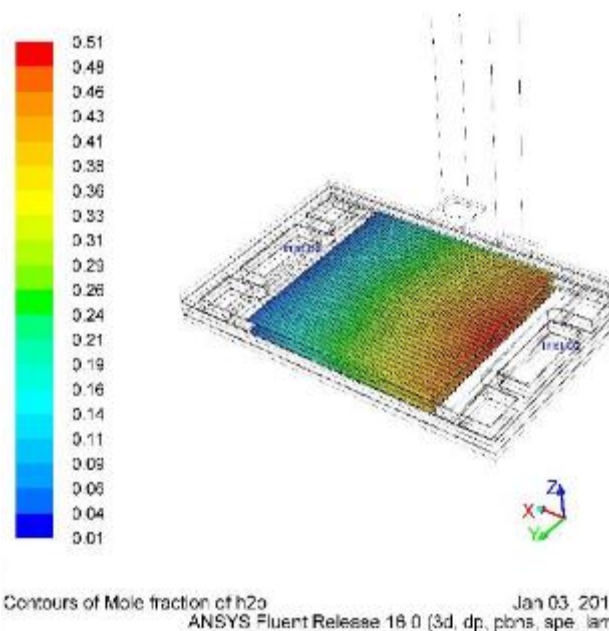
شکل ۳۱-۵ توزیع کسر جرمی اکسیژن روی الکترولیت در طبقات

در شکل ۳۲-۵، توزیع کسر جرمی هیدروژن نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هیدروژن از سمت ورودی به خروجی کاهش می‌یابد که دلیل آن مصرف آن‌ها در طول حرکت به سمت خروجی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به دلیل طراحی مناسب *flow-field* توزیع هیدروژن به صورت یکنواخت در کانال‌ها انجام شده است.



شکل ۳۲-۵ توزیع کسر جرمی هیدروژن روی الکترولیت در طبقات

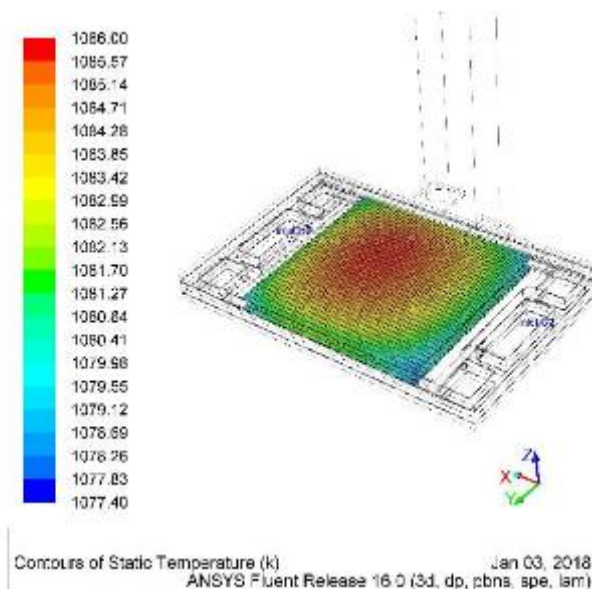
در شکل ۳۳-۵، توزیع کسر جرمی آب را ملاحظه می‌نمایید. میزان آب در سمت خروجی هیدروژن بیشتر می‌باشد چراکه هیدروژن کمتری در آن فضا وجود دارد و به‌ناچار آب به آن سمت حرکت می‌کند.



شکل ۳۳-۵ توزیع کسر جرمی هیدروژن روی الکترولیت در طبقات

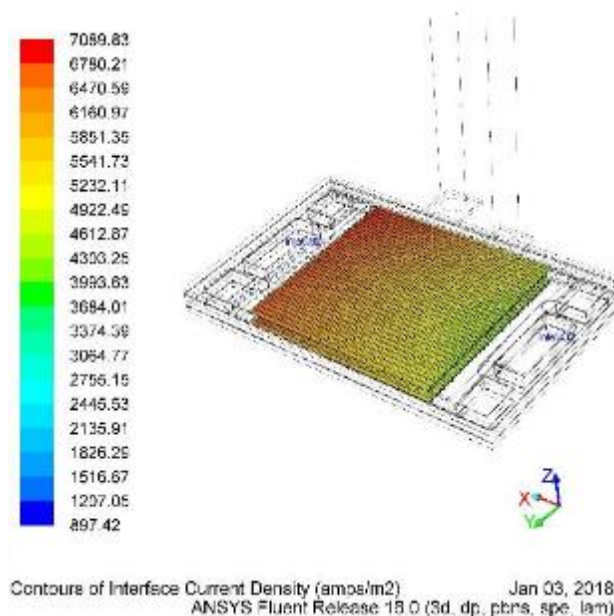
توزیع دما روی الکترولیت‌ها در شکل ۳۴-۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مرکز الکترولیت بیشترین دما را دارد. ملاحظه می‌شود که دمای سل نسبت به حالت تک طبقه‌ای به میزان بیشتری افزایش یافته است. دلیل آن تولید انرژی بیشتر و اتلاف کمتر نسبت به تک طبقه می‌باشد.

در گوشه‌های الکترولیت که به مرزهای دیواره استک نزدیک می‌باشد و به واسطه‌ی انتقال حرارت جابجایی خنک کاری می‌شود افت دما حادث می‌شود.



شکل ۵-۳۴ توزیع دما روی سل در طبقات

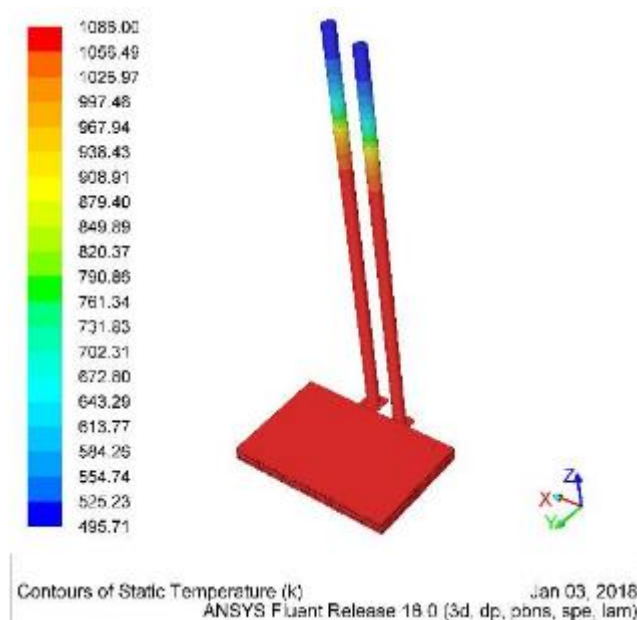
در شکل ۵-۳۵، توزیع چگالی جریان در طبقات نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود توزیع چگالی جریان در دوطبقه کاملاً یکسان می‌باشد. دلیل این امر طراحی مناسب و بهینه‌ی *flow-field* ها می‌باشد باعث توزیع یکنواخت واکنش دهنده‌ها و در نتیجه واکنش‌ها گردیده است.



شکل ۵-۳۵ توزیع چگالی جریان در طبقات

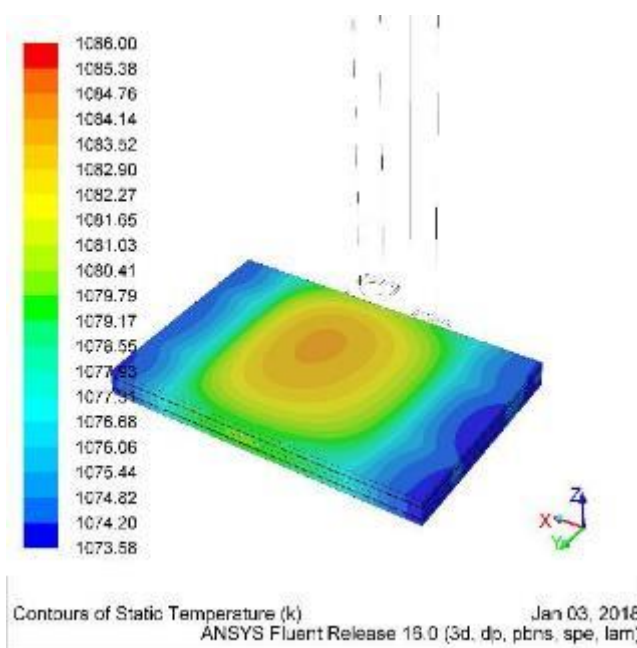
همان‌طور که در شکل ۵-۳۶، نشان داده شده است، دما روی میله‌ها به واسطه‌ی انتقال حرارت با محیط آزمایشگاه خنک‌تر از دمای اینترکانکت‌ها می‌باشد. در مقایسه با حالت تک طبقه‌ای ماکزیمم و مینیمم دما به ترتیب ۹ و ۶ درجه

افزایش یافته است. چراکه میزان انرژی تولیدی ناشی از واکنش‌های شیمیایی افزایش یافته و متعاقباً هر دو دمای اشاره‌شده افزایش یافته است.



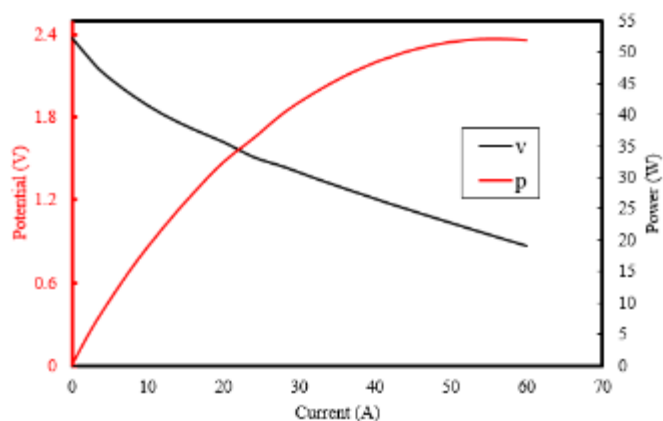
شکل ۳۶-۵ توزیع دما روی مجموعه استک

اما در شکل ۳۷-۵، دما روی اینترکانکت‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ماکزیمم دما استک روی اینترکانکت‌ها نمی‌باشد. ماکزیمم دما روی اینترکانکت در مرکز آن‌ها قرار دارد چراکه دورترین فاصله را از سطوح انتقال حرارتی جابجایی از سطوح جانبی را دارد.

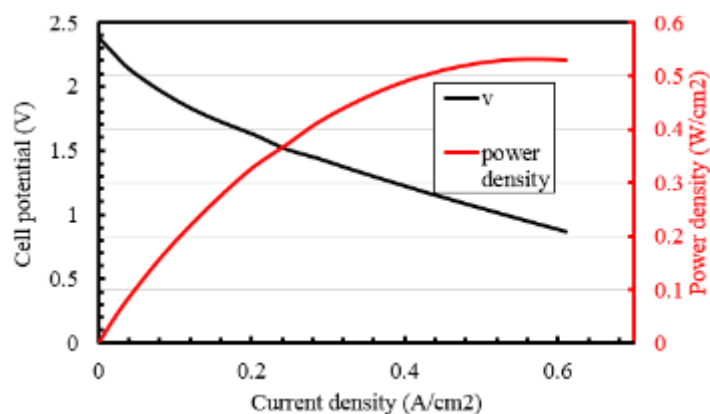


شکل ۳۷-۵ توزیع دما روی اینترکانکت‌ها

در شکل ۵-۳۸ منحنی عملکرد استک دوطبقه‌ای و در شکل ۵-۳۹ منحنی چگالی توان استک دوطبقه‌ای، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نسبت به استک تک طبقه ای توان پیل سوختی افزایش قابل توجهی داشته است.

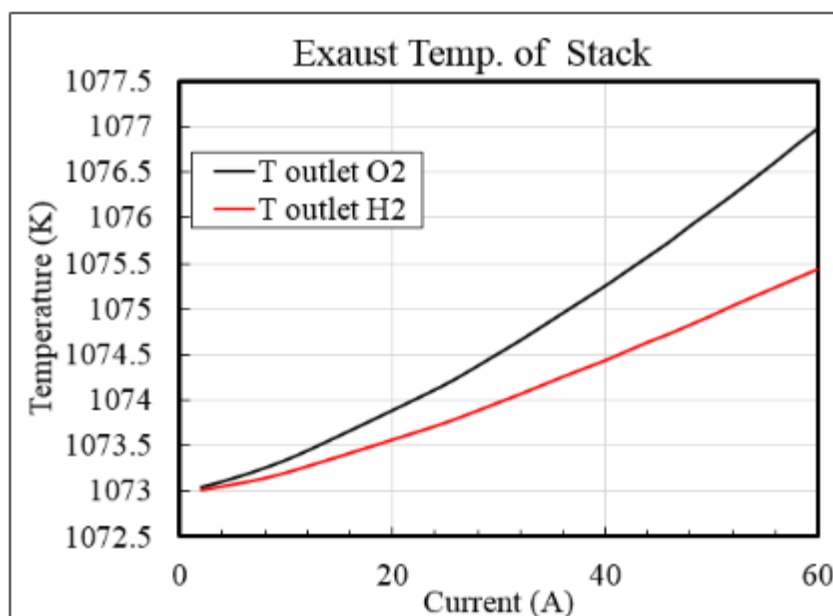


شکل ۵-۳۸ منحنی عملکرد استک دوطبقه‌ای



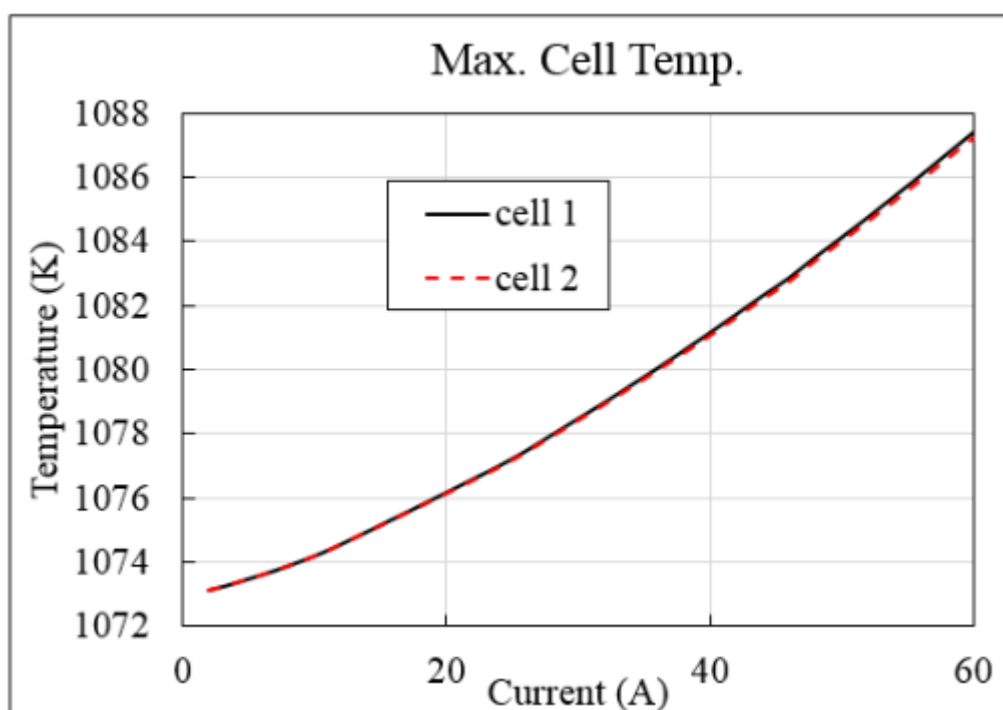
شکل ۵-۳۹ منحنی چگالی توان استک دوطبقه‌ای

در شکل ۵-۴۰ دمای گازهای خروجی از استک نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مشابه استک تک طبقه‌ای دمای گازهای خروجی سمت کاتد از سمت آند بیشتر می‌باشد. دلیل آن تولید آب در سمت آند می‌باشد. ظرفیت گرمایی آب بسیار بالاتر از این دو گاز هیدروژن و اکسیژن بوده و نقش اصلی را در این اختلاف دما ایفا می‌کند. وجود آب در آند باعث شده است که حرارت زیادی در مسیر دریافت شود اما دمای ترکیب آب و هیدروژن به دلیل وجود آب به نسبت به اکسیژن کمتر شود.



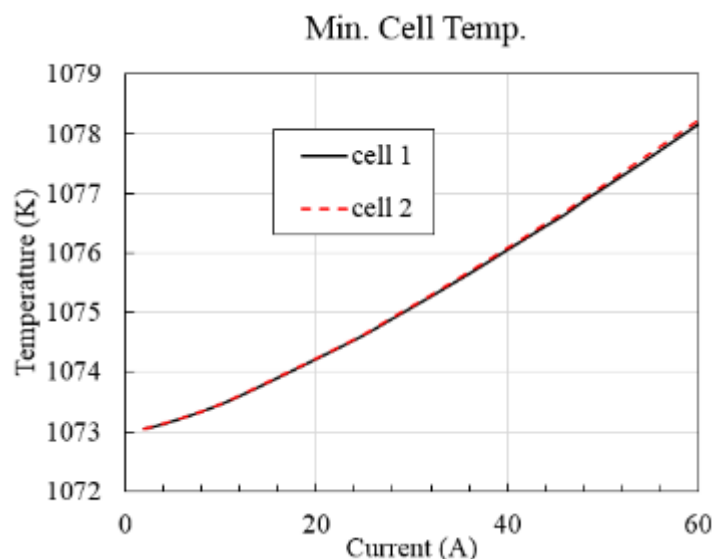
شکل ۴۰-۵ دمای گازهای خروجی از استک برحسب جریان

در شکل ۴۱-۵، ماکزیمم دمای سل که روی الکترولیت به وجود می‌آید، برای هر طبقه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دمای حداکثری در هر دو طبقه تقریباً یکسان می‌باشد که نشان از تقارن شرایط مرزی و هندسی دارد. در بازه‌ی عملکردی پیل سوختی ماکزیمم دما ۱۴ درجه افزایش یافته است.



شکل ۴۱-۵ ماکزیمم دمای سل در طبقات

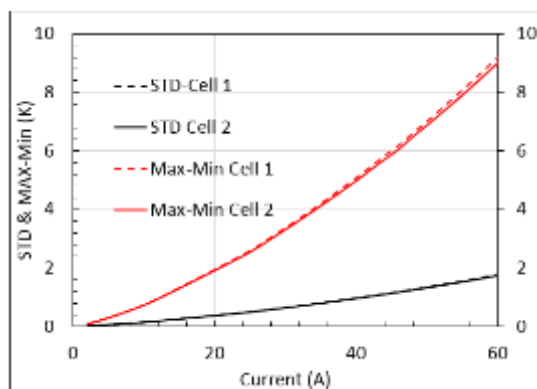
در شکل ۴۲-۵، مینیمم دما در طبقات سل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مینیمم دمای طبقات اول و دوم تقریباً برابر می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود مینیمم دما با افزایش بار الکتریکی وارده بر پیل سوختی افزایش می‌یابد. در بازه‌ی عملکردی پیل سوختی مینیمم دما در حدود ۵ درجه افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۴۲ مینیمم دمای سل در طبقات

در شکل ۵-۴۳، اختلاف دمای ماکزیمم و مینیمم سل نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود حداکثر اختلاف دمای در هر طبقه در جریان های بالا حادث می شود. رفتار این پارامتر در هر دوطبقه یکسان است که نشان دهنده ی تغییرات یکسان در هر طبقه می باشد.

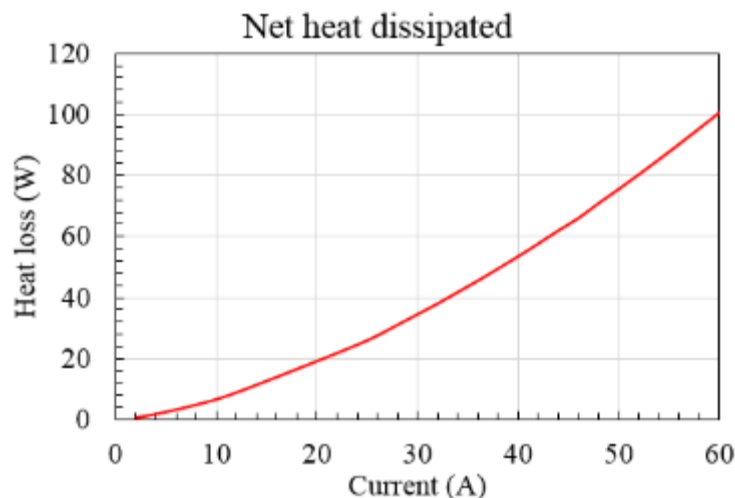
همچنین انحراف معیار دمای سل در هر طبقه نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود مقدار انحراف معیار کم تر از دو درجه در هر سل می باشد و رفتار انحراف معیار در هر دوطبقه یکسان است که نشان از یکسان بودن شرایط کارکرد در هر دوطبقه دارد.



شکل ۵-۴۳ اختلاف دمای ماکزیمم و مینیمم هر طبقه؛ انحراف معیار دمای در هر طبقه

در شکل ۵-۴۴، نرخ اتلاف حرارت برحسب جریان الکتریکی کارکردی پیل سوختی نشان داده شده است. همان طور ملاحظه می شود با افزایش جریان میزان اتلاف افزایش می یابد و حداکثر به میزان W_{100} یعنی در حدود دو برابر توان الکتریکی تولیدشده توسط استک می شود.

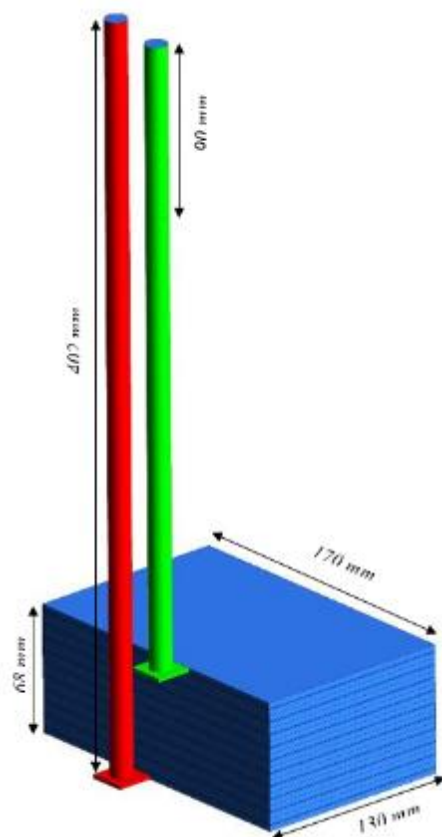
ملاحظه می شود که میزان توان اتلافی بسیار بالاست و می توان به کمک سیستم های *CHP* از آن استفاده نمود.



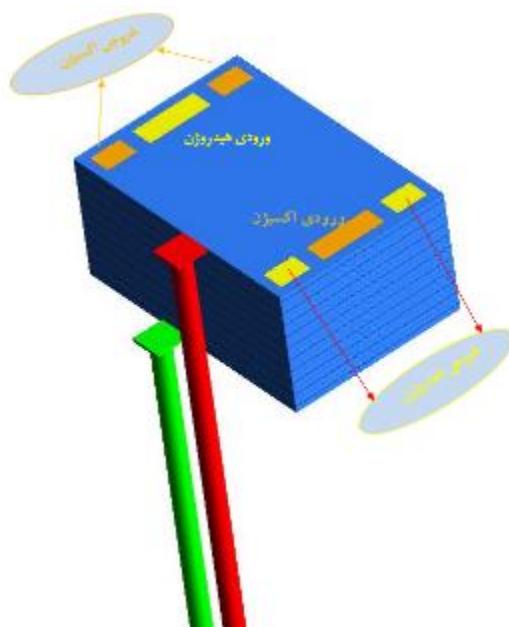
شکل ۴۵-۵ اختلاف دمای ماکزیمم و مینیمم هر طبقه؛ انحراف معیار دمای در هر طبقه

۳-۲-۵- استک ۱۰ طبقه ای

هندسه‌ی استک ۱۰ طبقه‌ای به همراه ابعاد آن در شکل ۴۵-۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ۹ سانتی‌متر از میله‌ها از کوره بیرون می‌زنند. همچنین ابعاد استک $17 \times 13 \times 6/8$ سانتی‌متر می‌باشد. آرایش جریان در منیفولدهای تقسیم‌کننده‌ی جریان میان طبقات استک موردنظر به صورت U -شکل می‌باشد (شکل ۴۶-۵)؛ بدین صورت که ورودی و خروجی استک در روی یک *Endplate* قرار دارند. دمای محیط اطراف قسمتی از میله که بیرون می‌باشد ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و دمای محیط اطراف مابقی استک که داخل کوره قرار دارد ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد لحاظ شده است. شرط مرزی در اطراف دیواره‌های استک انتقال حرارت جابجایی با ضریب انتقال حرارتی جابجایی $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ می‌باشد. علاوه بر آن از دیواره‌ها انتقال حرارت تشعشعی با ضریب انتقال حرارت تشعشعی $0/9$ صورت می‌پذیرد. دمای گازهای ورودی به استک ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب بهره‌وری برای هر کدام از سوخت‌ها در تمامی شرایط کارکردی برابر ۵۰٪ قرار داده شده است. از سوخت خالص هیدروژن و اکسندهی اکسیژن استفاده شده است. خواص مواد به کاررفته مانند مواد به کاررفته برای استک یک طبقه‌ای و دوطبقه‌ای می‌باشد.

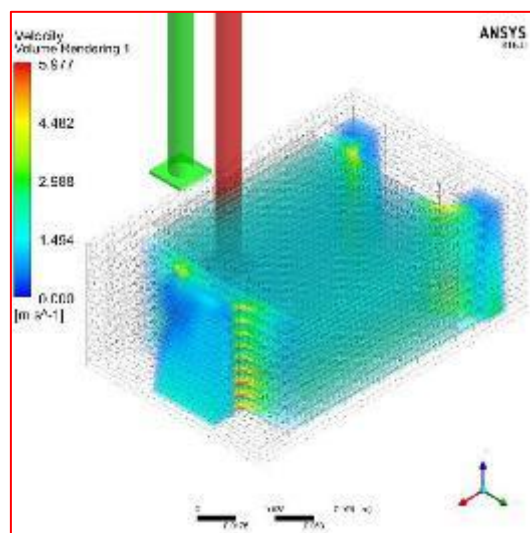


شکل ۵-۴۵ هندسه‌ی استک ۱۰ طبقه‌ای به همراه ابعاد آن.

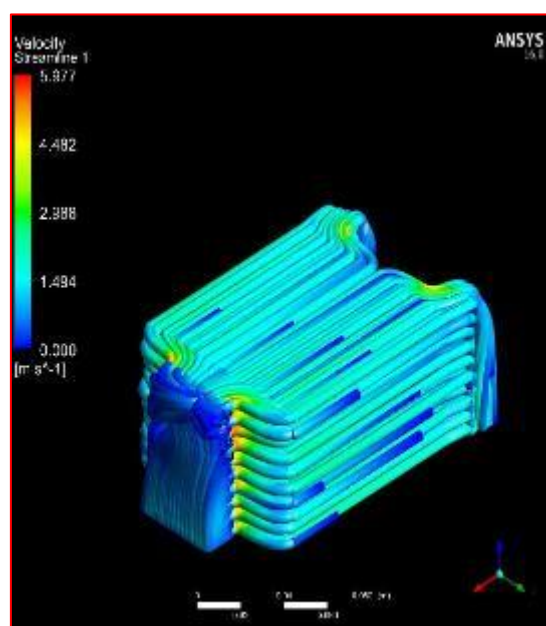


شکل ۵-۴۶ محل ورودی و خروجی سمت آند و کاتد (آرایش U-شکل)

همان‌طور که در شکل ۵-۴۷ نشان داده شده است. سرعت در کانال‌ها در تمامی طبقات از یک‌نواخت می‌باشد. در شکل ۵-۴۸ خطوط جریان سیال در سمت آند نشان داده شده است.

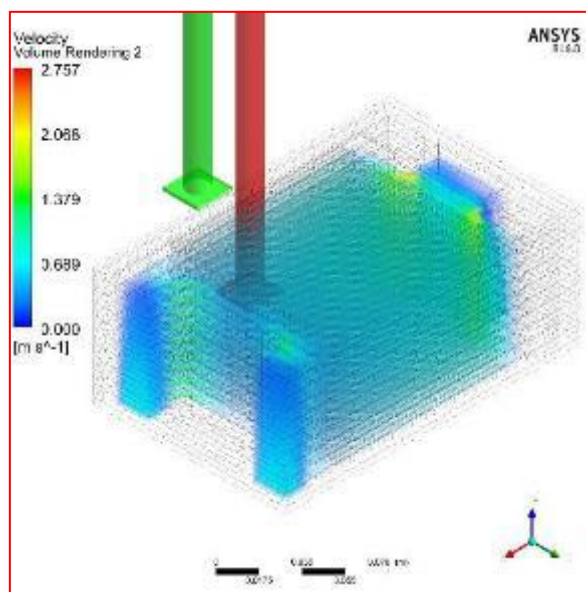


شکل ۴۷-۵ کانتور سرعت در سمت آند



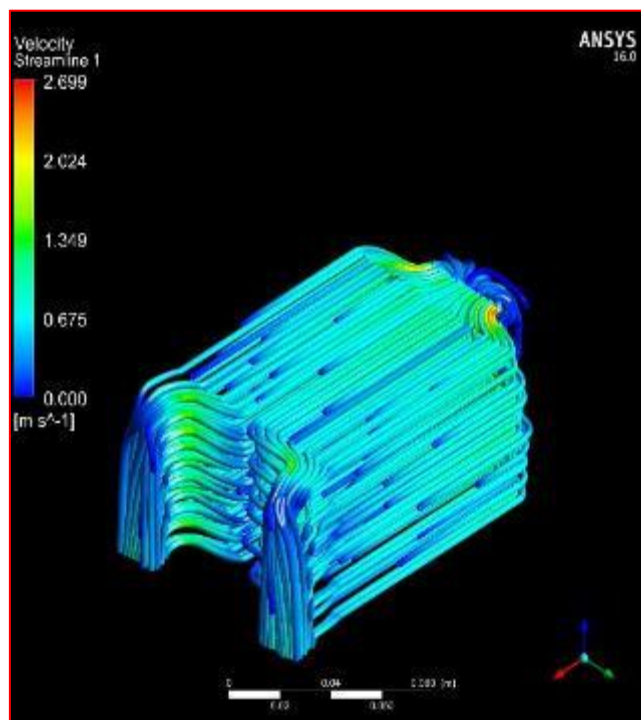
شکل ۴۸-۵ خطوط جریان در سمت آند

در شکل ۴۹-۵ توزیع سرعت در منیفولدهای آند و کاتد نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود سرعت در کانال ها یکنواخت می باشد. همچنین سرعت در داخل کانال های کاتد نسبت به آند کمتر می باشد. دبی جرمی اکسیژن بیشتر از اکسیژن می باشد اما به دلیل اینکه چگالی هیدروژن بسیار کمتر از اکسیژن می باشد. سرعت سیال در سمت آند بیشتر از سمت کاتد می شود.



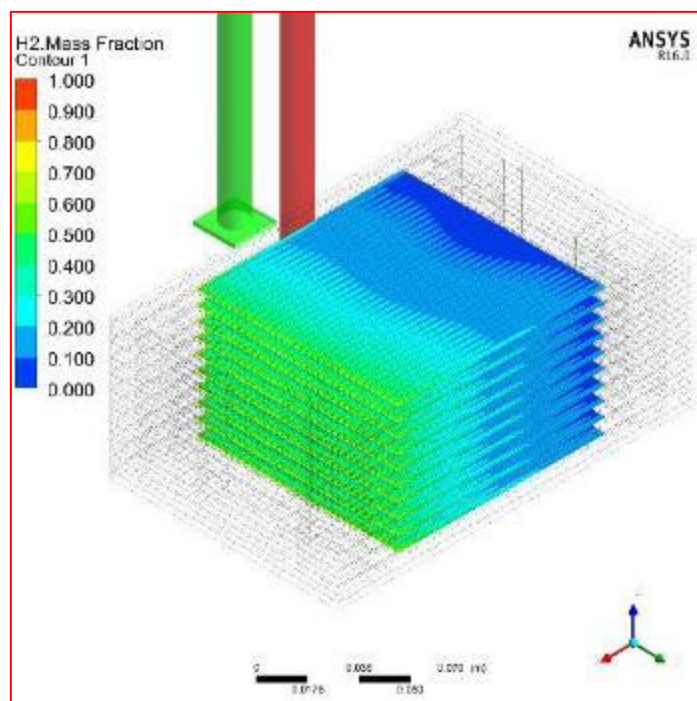
شکل ۴۹-۵ توزیع سرعت در منیفولدها و کانال‌های کاتد.

در شکل ۵۰-۵ خطوط جریان در سمت کاتد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جریان به‌صورت یکنواخت در کانال‌ها توزیع شده است.



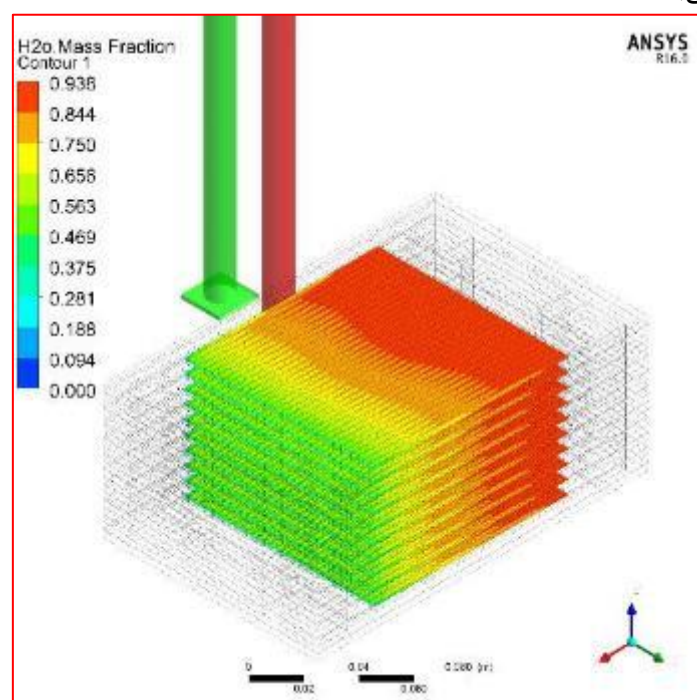
شکل ۵۰-۵ خطوط جریان در منیفولدها و کانال‌های سمت کاتد.

در شکل ۵۱-۵ توزیع کسر جرمی هیدروژن در طبقات استک نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هیدروژن کاملاً یکنواخت بر روی الکترولیت پخش شده است. به دلیل مصرف هیدروژن از ورودی تا خروجی هر طبقه میزان کسر جرمی هیدروژن کاهش می‌یابد.



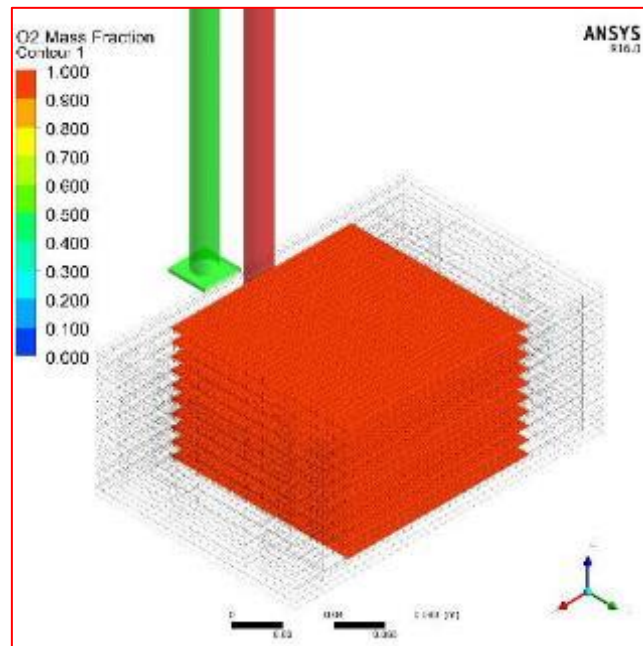
شکل ۵-۵۱ توزیع کسر جرمی هیدروژن در طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای

در شکل ۵-۵۲ توزیع کسر جرمی آب تولیدشده بر روی الکترولیت نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، توزیع آب کاملاً یکنواخت می‌باشد و همچنین در خروجی بیشتر از ورودی می‌باشد. دلیل آن وجود هیدروژن کم‌تر در سمت خروجی می‌باشد.



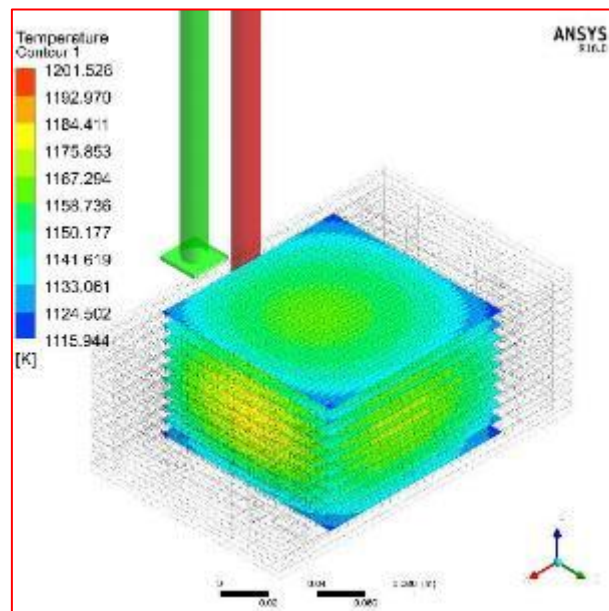
شکل ۵-۵۲ توزیع کسر جرمی آب تولیدشده در طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای

در شکل ۵-۵۳ توزیع کسر جرمی اکسیژن نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اکسیژن به‌صورت کاملاً یکنواخت توزیع شده است. دلیل آن وجود تنها یک اکسنده می‌باشد که تمامی فضا را اشغال می‌کند.



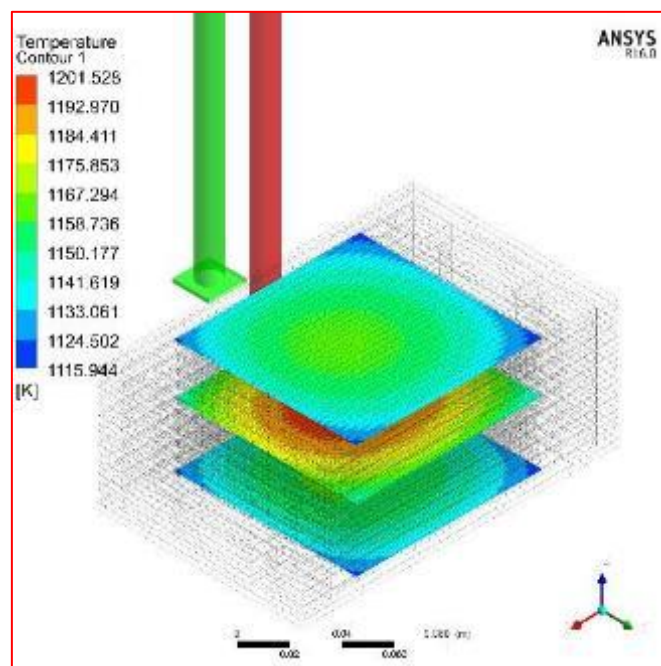
شکل ۵-۵۳ توزیع کسر جرمی اکسیژن در طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای

در شکل ۵-۵۴ و شکل ۵-۵۵ توزیع دما روی الکترولیت‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین دمای استک طبقات میانی به وجود می‌آید که دلیل آن دور بودن مرکز پیل سوختی از دیواره‌های بالایی و پایینی است. یکی از اصلی‌ترین سطوح خنک کاری استک با توجه به شرایط مرزی کنونی انتقال حرارت از صفحه‌های بالایی و پایینی بالاترین و پایین‌ترین اینترکانکت می‌باشد. اما مرکز پیل سوختی از این سطوح دور می‌باشد و لذا خنک کاری صورت نمی‌گیرد.

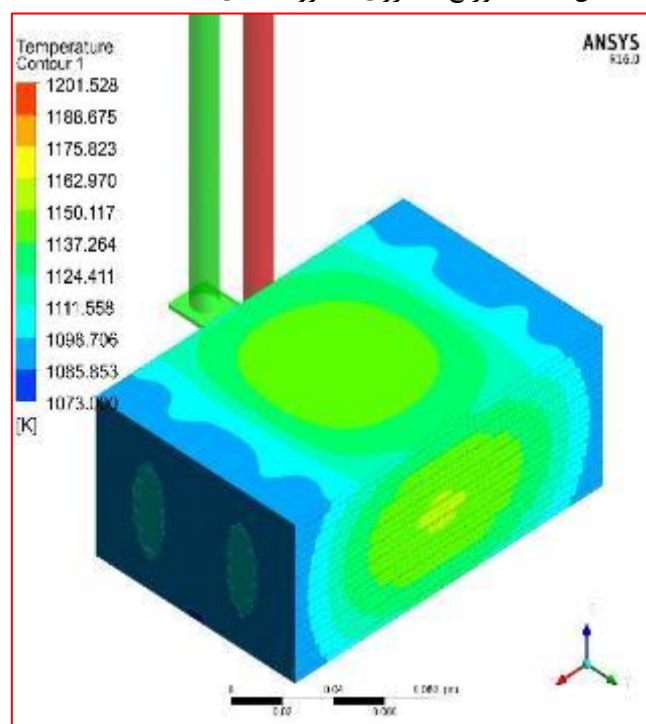


شکل ۵-۵۴ توزیع دما روی تمامی الکترولیت‌های استک ۱۰ طبقه‌ای

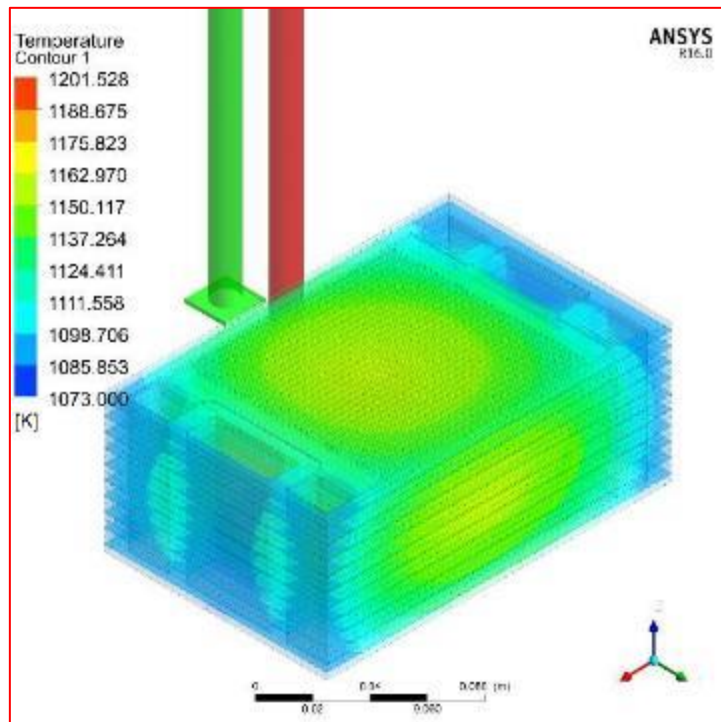
در یک طبقه مشخص نیز گوشه‌های الکترولیت خنک‌تر می‌باشد؛ دلیل آن نزدیکی گوشه‌ها به دو سطح خنک کاری می‌باشد درحالی‌که سایر نواحی مرزی تنها به یک سطح در تماس هستند. ملاحظه می‌شود که دما در مرکز سل به بیش از ۹۲۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.



شکل ۵-۵۵ توزیع دما روی الکترولیت‌های طبقات ۱-۵-۱۰

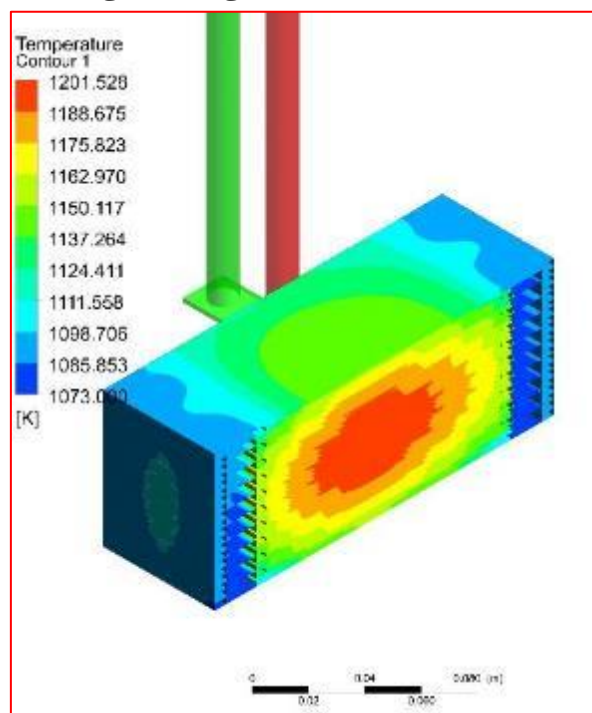


شکل ۵-۵۶ توزیع دما روی اینترکانکت‌ها



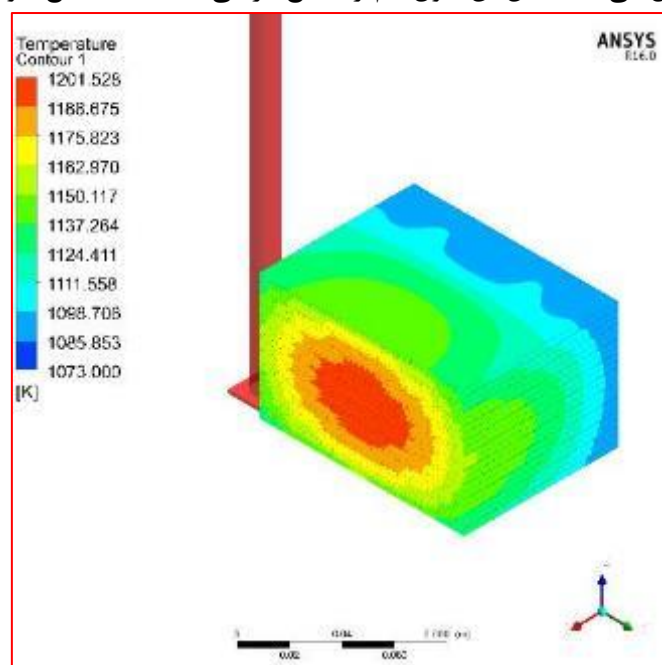
شکل ۵۷-۵ توزیع دما روی اینترکانکت ها

در شکل ۵۸-۵ برش طولی از پیل سوختی انجام شده است. توزیع دما روی سطوح جامد در این شکل نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود دما در مرکز استک دارای بیشتر مقدار می باشد و با نزدیک تر شدن به ابتدا و انتهای استک به دلیل خنک کاری به کمک انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی دما کاهش یافت است.



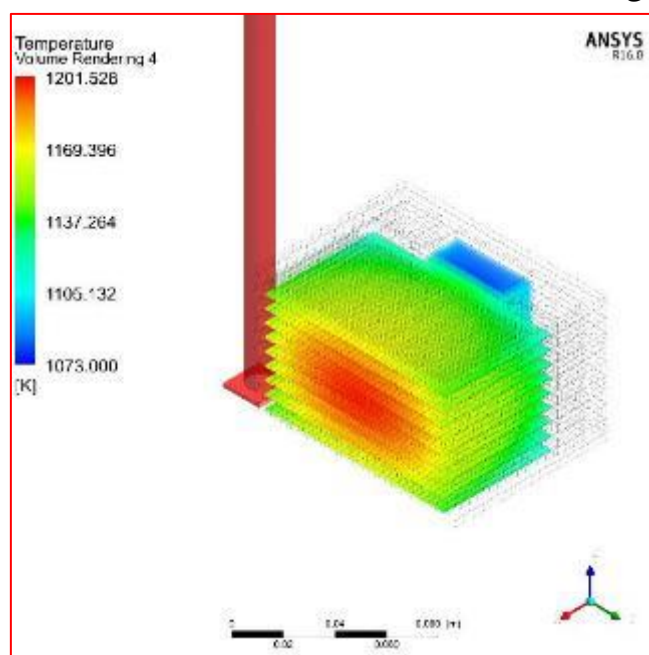
شکل ۵۸-۵ برش طولی از استک، توزیع دما روی سطوح جامد

در شکل ۵-۵۹ توزیع دما در برش عرضی از مرکز استک روی سطوح جامد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مقطع عرضی نسبت به مقطع طولی در راستای دور شدن از مرکز استک دما به میزان کم‌تری نسبت به مقطع طولی کاهش می‌یابد. دلیل آن طول کم‌تر مقطع عرضی نسبت به مقطع طولی می‌باشد.



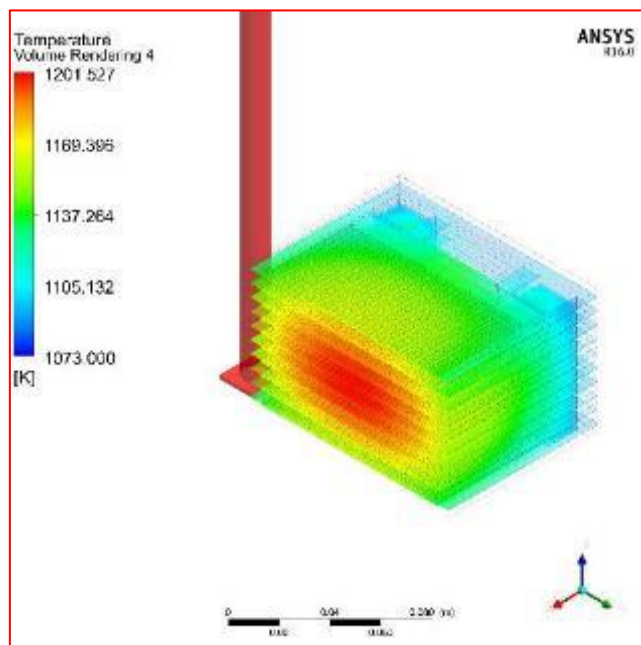
شکل ۵-۵۹ برش عرضی از استک، توزیع دما روی سطوح جامد

در شکل ۵-۶۰ در برشی عرضی دمای سیال موجود در کانال‌های سمت کاتد استک نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دمای سیال با دمای سل تقریباً برابر می‌باشد و به عبارتی دمای سیال وابسته به دمای محیط جامد می‌باشد و برعکس صادق نیست.



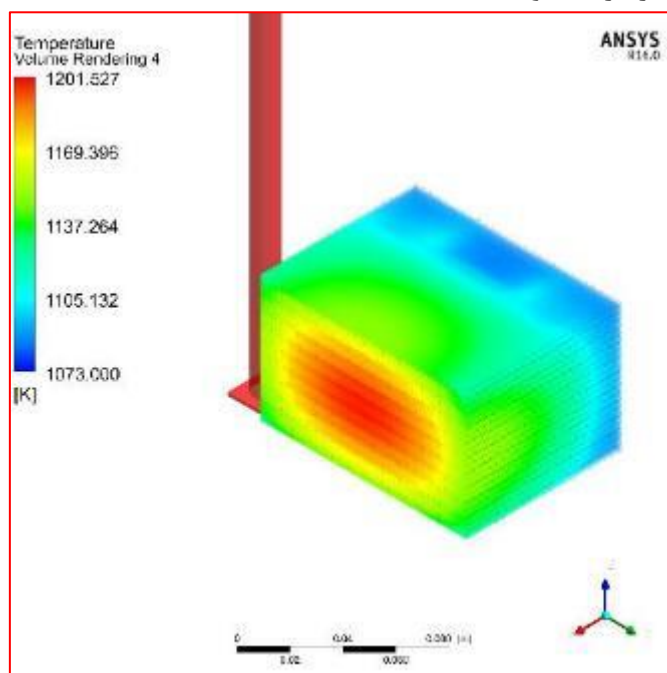
شکل ۵-۶۰ برش عرضی از استک، توزیع دما در سیال داخل کانال‌های کاتد

در شکل ۵-۶۱ دمای سیال در کانال‌های سمت آند نشان داده شده است. دمای سیال در آند مشابه کاتد می‌باشد. البته در ارتباط با دمای خروجی سمت اند و کاتد نی‌توان به کمک این نمودار اظهار نظر نمود، اما انتظار می‌رود دمای سمت آند به دلیل وجود آب در ترکیب کم‌تر باشد. از کم کردن دمای سیال نمی‌توان انتظار خنک کاری برای استک داشت چراکه دبی سیال‌های داخل استک و ظرفیت حرارتی آن‌ها پایین می‌باشد.

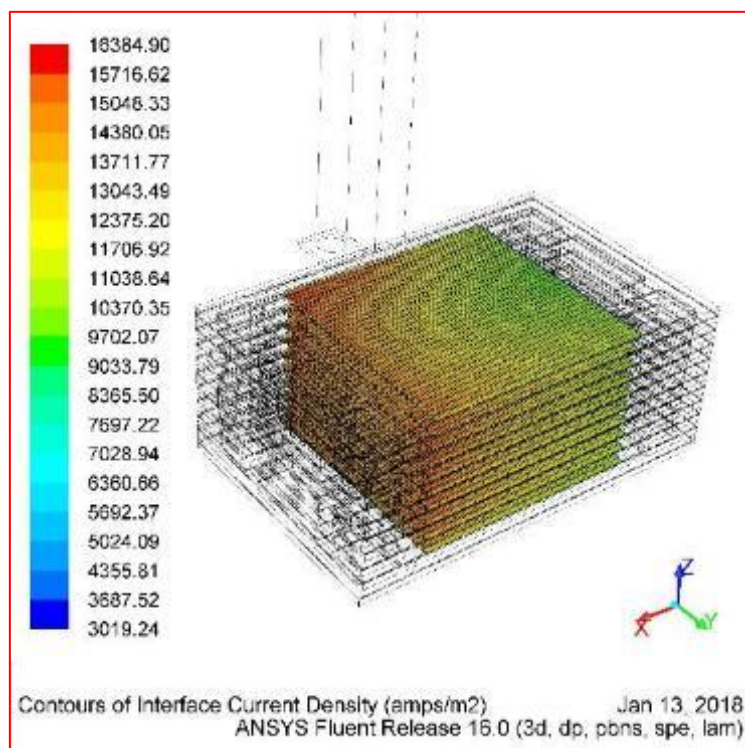


شکل ۵-۶۱ برش عرضی از استک، توزیع دما در کانال‌های حاوی سیال آند

در شکل ۵-۶۲ در یک برشی عرضی توزیع دما در محیط سال و جامد استک نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود داخل استک مانند هسته‌ای گرم می‌باشد. ماکزیمم دما در داخل این هسته می‌باشد که برای خنک کاری آن باید راهکاری در نظر گرفته شود.

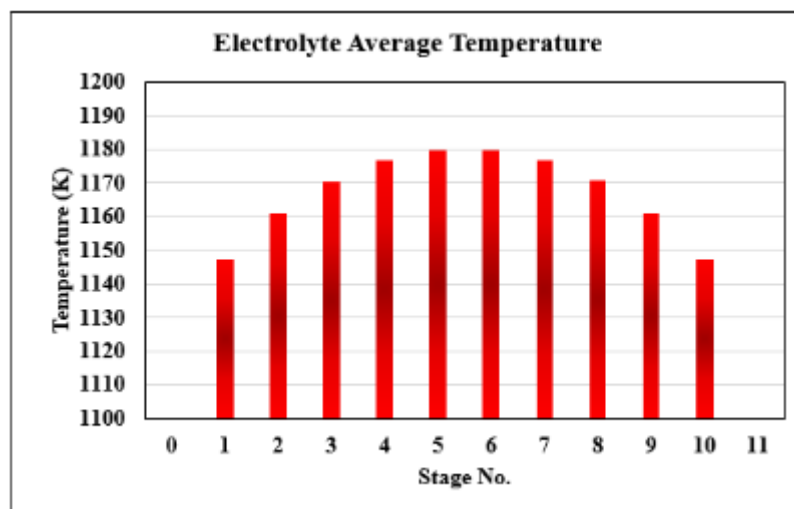


شکل ۵-۶۲ برش عرضی از استک، شامل محیط سیال و جامد



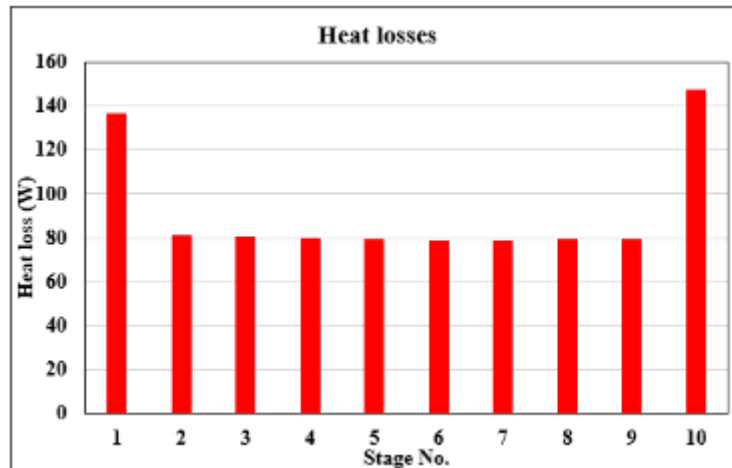
شکل ۵-۶۳ توزیع چگالی جریان روی الکترولیت تمامی طبقات استک ۱۰ طبقه‌ای

در شکل ۵-۶۴ توزیع دمای متوسط الکترولیت در طبقات استک نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین دما در طبقات میانی و کمترین دما در طبقات ابتدایی و انتهایی وجود دارد. نکته مهمی که از این نمودار می‌توان دریافت تقارن دما می‌باشد. البته شرایط تقارن تنها برای این شرط مرزی برقرار می‌باشد و ممکن است با انتخاب شرایط مرزی متفاوت این تقارن دمایی از بین برود. مثلاً اگر ضریب انتقال حرارت جابجایی روی طبقات اول و انتهایی متفاوت بوده و یا حتی یکی از سطوح انتقال حرارت جابجایی و دیگری انتقال حرارت هدایتی داشته باشد، این تقارن برقرار نخواهد بود. اما برای وضعیت موجود تقارن برقرار است و می‌توان تمامی تحلیل‌های انتقال حرارتی را برای نصف استک یعنی ۵ طبقه انجام داد. همچنین با توجه به تقارن موجود در صورت تکرار دسته‌های ده طبقه‌ای روی هم مجدداً تقارن خواهد بود و می‌توان از نتایج ده طبقه برای مضارب ده طبقه استفاده نمود.



شکل ۵-۶۴ توزیع دمای متوسط هر روی الکترولیت در طبقات

در شکل ۵-۶۵ توزیع تلفات در طبقات مختلف استک نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود بیشترین تلفات از طبقات اول و دوم می باشد. چراکه این طبقات بیشترین سطح اتلاف حرارت را دارند. نکته مهم این است که تلفات طبقه دهم اندکی از طبقه ی اول بیشتر می باشد. دلیل آن تأثیر میله ها می باشد. از آنجاکه میله ها به طبقه دهم متصل می باشند. میله ها به عنوان فین عمل کرده و سطح خنک کاری را برای آن طبقه افزایش می دهند.



شکل ۵-۶۵ توزیع تلفات در طبقات استک

ز آنجایی که با توجه به دانش کنونی، سل ها توانایی تحمل دمای حداکثر ۸۵۰ درجه سانتی گراد می باشند، لذا باید به دنبال راهکاری برای مدیریت حرارت تولیدی بود. در عمل برای این امر از حرارت تولید شده برای *CHP* استفاده می شود و راندمان حرارتی سیستم افزایش می یابد. اما در اینجا باید برای مدیریت این حرارت راهکارهایی را در نظر گرفت. از این راهکارها می توان به تغییر دمای گازهای ورودی، استفاده از صفحات خنک کننده در بین اجزای استک و تغییر دبی گازهای واکنشگر اشاره کرد.

۶- مدل سازی انتقال حرارت سیستم پیل سوختی

۶-۱- مقدمه

بحث راه اندازی و اورهال یا فرآیند خاموش کردن پیل سوختی ممکن است امری تناوبی باشد از طرفی برای کنترل تنش های حرارتی نیاز به مدیریت حرارت در پیل سوختی می باشد.

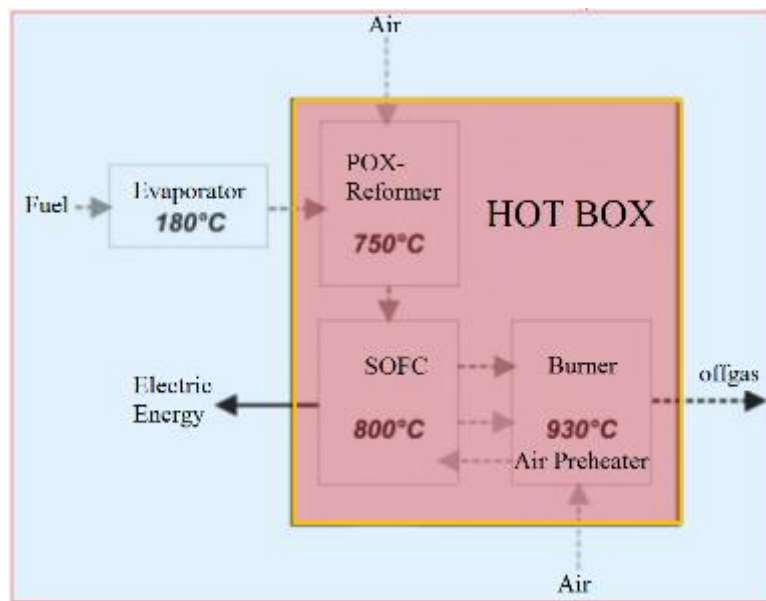
در ادامه مدیریت حرارت در زمان راه اندازی، فعالیت و خاموش کردن پیل سوختی مورد بررسی قرار می گیرد تا دانش لازم برای کار با پیل سوختی به دست آید. متدهای مختلف فعالیت پیل سوختی از جمله ثابت نگه داشتن دمای کاری مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه مراحل مدل سازی به کمک در نظر گرفتن یک مدل انجام می شود.

پیل مورد بررسی از نوع اکسید جامد صفحه ای می باشد که مشخصات آن در جدول ۶-۱ داده شده است. سطح فعال پیل فرض می شود که 10 cm در 10 cm باشد. فرض می کنیم لبه بیرونی آب بند ضخامتی برابر با 0.5 سانتی متر داشته باشد. لذا سطح فعال پیل 80 cm^2 می شود. برای فهمیدن این که چند طبقه نیاز داریم تا به توان 5 کیلوواتی برسیم باید بدانیم هر طبقه چه چگالی توانی می دهد. جنرال الکتریک با گاز سنتزی شامل H_2 ، CO و CO_2 و H_2O و گازهای بی اثر به چگالی توان 285 mW/cm^2 رسیده است. دلفی در یک استک 30 طبقه ای به چگالی توان 370 mW/cm^2 با گازوییل به همراه ریفرمینینگ دست یافته است. هدف فنی که توسط دپارتمان انرژی آمریکا مشخص شده است رسیدن به چگالی توان 2000 mW/cm^2 می باشد. در این مطالعه مقدار چگالی توان استک 250 mW/cm^2 در نظر گرفته شده است. لذا برای رسیدن به 5 کیلووات مساحتی معادل 2000 cm^2 نیاز است و برای استک 50 کیلوواتی به 20000 cm^2 نیاز است. با توجه به سطح مورد نیاز به استکی با 250 طبقه نیاز می باشد. حجم استک و ارتفاع آن به کمک روابط زیر به دست می آید:

$$V_{Stack} = A_{cell} \cdot h_{Stack} \quad (6-1)$$

$$h_{stack} = (h_{interconnect} + h_{anode} + h_{electrolyte} + h_{cathode}) \cdot n_{cell} + 2h_{endplate} \quad (6-2)$$

که ضخامت اجزای استک با توجه به جدول ۱ به دست می آید. با توجه به ابعاد داده شده ارتفاع استک 5 کیلوواتی برابر 80 cm و حجم استک به دست آمده از آن برابر 8000 cm^3 می باشد. توجه داریم که در این روش بسیار کلی و ساده فرض می شود که طراحی منیفولدها تأثیر قابل توجهی بر حجم و جرم استک ندارد. البته می توان آن ها را اعمال نمود. اجزای مهم سیستم *SOFC* مورد نظر در شکل ۶-۱ ارائه شده است.



شکل ۶-۱ سیستم ساده‌شده‌ی یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد

از آنجاکه سیستم اکسایش جزئی ریفرمینگ *POX*، استک *SOFC* و کوره (شامل مبدل‌های حرارتی برای پیش‌گرمایش هوا) در دمایی تقریباً یکسان کار می‌کنند به همین دلیل می‌توان آن‌ها را در یک محفظه‌ی عایق که در اینجا *HOTBOX* نامیده می‌شود قرارداد. سوخت به سمت ریفرمر *POX* هدایت می‌شود. از آنجایی که *SOFC* می‌تواند با ترکیبی از هیدروژن و هیدروکربن‌ها کار کند، لذا فراوری سوخت می‌تواند ساده و ارزان باشد. در اینجا یک ریفرمر کاتالیز *POX* استفاده می‌شود که در دمایی بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد عمل می‌کند. در ریفرمر، بخار سوخت و هوا با نسبت استوکیومتری سوخت به هوا در حدود ۰.۴ ترکیب شده و به‌صورت جزئی اکسید به مخلوط گاز اکسید می‌شد و که شامل H_2 ، CO و N_2 است. واکنش‌دهنده‌ی دیگری از جمله آب نیاز نیست. واکنش *POX* بسیار سریع و گرمازا است. و از حرارت آن می‌توان برای راه‌اندازی سیستم استفاده نمود.

معمولاً *SOFC* در ضریب بهره‌ی ۸۰٪ کار می‌کند و لذا سوخت اضافی به‌عنوان *offgas* استک باقی می‌ماند. به‌منظور اکسید کردن کامل باقی‌مانده‌ها به CO_2 و H_2O خروجی آند و در یک کوره کاتالیک مخلوط می‌شود. در آنجا *offgas* باقی‌مانده استک با اکسیژن اضافی در دسترس از *offgas* کاتد ترکیب می‌شوند. همچنین از کوره نیز برای راه‌اندازی سیستم استفاده می‌شود. معمولاً کوره‌های کاتالیک در دماهایی در حدود ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کنند. این در حالی است که دمای گازهای خروجی از استک به دلیل افزایش دمای داخل استک به‌راحتی به ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. با در نظر گرفتن یک کوره‌ی کاتالیستی پس‌سوز برای احتراق نهایی، یک مبدل حرارتی نیز به سیستم اضافه می‌شود.

جدول ۱-۶ اجزای استک پیل سوختی فرضی

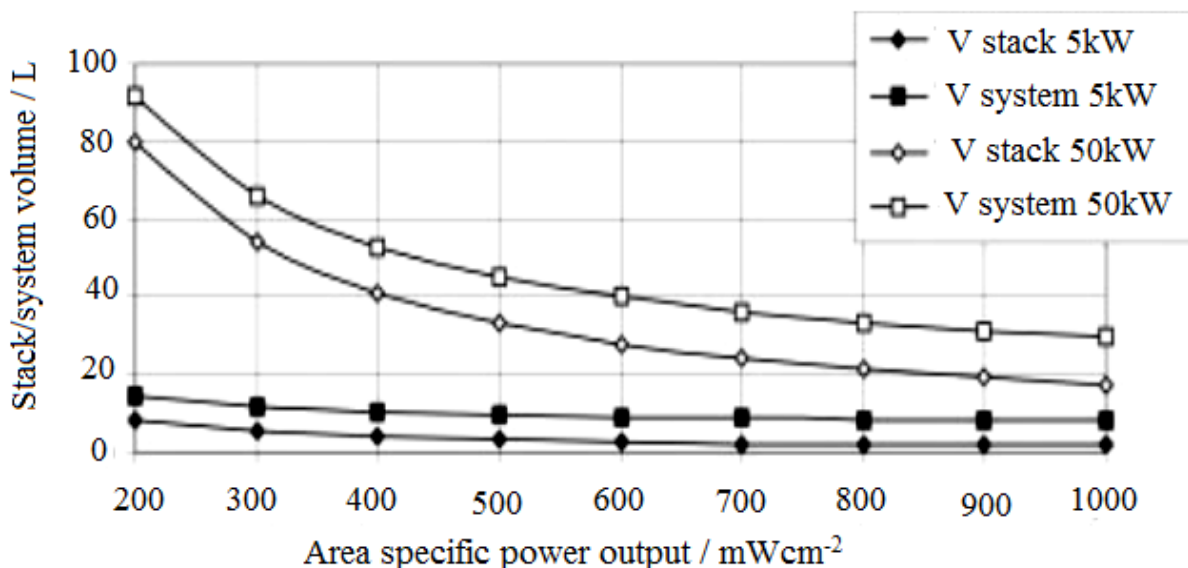
SOFC component	Material	Thickness(cm)	Density(g/ cm ⁻³)	Porosity(%)	Mass(g)
Anode	Ni0.35(ZrO2)0.65	0.1	6.8	40	40.8
Cathode	La0.84Sr0.16MnO3	0.01	5.4	40	3.22
Electrolyte	(ZrO2)0.90(Y2O3)0.10	0.002	5.6	0	1.11
Interconnect	Ferritic steel (Fe+Cr+Ni)	0.2	7.9	44a	88.5
End plate	Ferritic steel (Fe+Cr+Ni)	1	7.9	0	790

جدول ۲-۶ اجزای سیستم SOFC

		5 kWel system				50 kWel system		
System component		Material	Volume dm3	Mass Kg	Mass perc./%	Volume/dm3	Mass kg	Mass perc. %
SOFC stack	Catalyst	Precious metal	8	35	77.8	80	350	90.9
Burner			2	2	4.4	5	15	3.9
CPOX-reformer	Catalyst	Nickel	4	8	17.8	7	20	5.2
Total	Body	Ferritic steel	14	45	100	92	385	100

در مطالعه حاضر، تنها اجزای داخل *HOTBOX* (استک، ریفورمر و پس سوز شامل پیش گرم هوا) که اجزای کلی یک سیستم *SOFC* را تشکیل می دهند، به شمار آورده شده است. دیگر اجزا نظیر مبدل های حرارتی بیشتر، دمنده ها (برای تأمین هوای داخل استک و ریفورمر) و پمپ سوخت لحاظ نشده اند چرا که این اجزا خارج از استک قرار دارند و تأثیر کمتری بر مدیریت گرمای یک سیستم *SOFC* دارند. همان طور که اشاره گردید، در این گزارش دو استک با سایزهای متفاوت با توجه به استراتژی های کارکرد مورد بررسی قرار می گیرد (جدول ۳-۶). مورد اول استک ۵ کیلوواتی می باشد که برای کاربردهایی نظیر اتومبیل ها و دستگاه های تأمین توان خارج شبکه مورد استفاده قرار می گیرند. دستگاه های ۵۰ کیلوواتی برای خودروهای کشنده مناسب می باشد. حجم های سیستم (جدول ۲-۶) برای چگالی توان 250 با توجه به شکل ۲-۶ در نظر گرفته شده است. انتظار می رود که برای دستگاه های بزرگ تر، که اسمبلی مورد نظر

بیشتر بهینه شود و انتظار می‌رود حجم سیستم ۵ کیلوواتی بزرگ‌تر (۲۰ لیتر) و حجم سیستم ۵۰ کیلوواتی (۸۰ لیتر) کوچک‌تر از موارد داده شده در شکل ۶-۲ باشد. که با افزایش چگالی توان می‌توان حجم استک و سیستم را کاهش داد.



شکل ۶-۲ حجم سیستم و استک SOFC برحسب چگالی جریان

جدول ۶-۳ سیستم‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی

Power output (kW)	Volume (L)	Mass (kg)	Surface area (m ²)	Ratio surface to mass (m ² kg ⁻¹)
5	20	45	0.44	0.010
50	80	385	1.11	0.003

۶-۲-۱ مدل‌سازی ریاضی

۶-۲-۱-۱ فرضیات:

داخل *HotBox* دما ثابت فرض می‌شود. با این کار محاسبات یک‌بعدی ساده‌تر شده و این امکان را فراهم می‌کند تا از ظرفیت حرارتی کلی برای تمام سیستم داخل پیل سوختی استفاده نماییم. می‌توان انتظار داشت که اجزایی که نزدیک به گوشه‌های *HotBox* می‌باشد افت حرارتی بیشتری از عایق نسبت به مرکز خواهد داشت و لذا گرادیان دما در داخل *HotBox* وجود خواهد داشت. این حقیقت درست است اما می‌توان از آن به چند دلیل صرف‌نظر نمود. بین اجزا و دیوارهای عایق فضای پر شده از هوا وجود دارد که اجازه می‌دهد تا انتقال حرارت جابجایی آزاد و تشعشع گرادیان‌های دمای غیرقابل صرف‌نظر را جبران کند. در یک تقریب ساده یک‌بعدی، مقاومت حرارتی که به ضخامت و هدایت حرارتی اجزاء هوا و عایق بستگی دارد بستگی دارد به صورت زیر مقایسه می‌شوند:

مقاومت حرارتی برای انتقال حرارت عبوری از سطح A و ضریب هدایت حرارتی $\lambda(T)$ و ضخامت Δx به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{wall}^{th} = \frac{\Delta x}{\lambda(T) \cdot A} \quad (6-3)$$

مقاومت حرارتی دیوار فولادی به صورت مقدار متوسط در نظر گرفته می شود. ضریب هدایت حرارتی فولاد $(steel(T > 600 \text{ } ^\circ\text{C}) > 20 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$ که تشکیل دهنده عمده ترین ماده ی هدایت دهنده ی جریان *HOTBOX* است اعمال می شود.

مقاومت حرارتی هوا برای انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی برابر است با

$$R_{air}^{th} = (h_{conv} + h_{rad})^{-1} \cdot A^{-1} \quad (6-4)$$

که $h_{conv} = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ معمولاً برای انتقال حرارت جابجایی در نظر گرفته می شود. و $h_{rad} = 3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ به عنوان ضریب انتقال حرارت تشعشعی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد. مقاومت حرارتی عایقی که در این کار استفاده شده است برابر است با $\lambda(T < 1,000 \text{ } ^\circ\text{C}) < 0.03 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

در حالت پایا مقاومت حرارتی، برآوردی از میزان اختلاف دمای در عرض دیوار را نشان می دهد که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T_{air}}{R_{air}^{th}} = \frac{\Delta T_{insulation}}{R_{insulation}^{th}} \quad (6-5)$$

با مقایسه مقاومت های حرارتی برآورد می شود که اختلاف دمای بین سطح داخلی و خارجی عایق $\Delta T_{insulation}$ ، ۲۰ برابر بیشتر از اخلاف دمای داخل *HOTBOX* می باشد. لذا در نظر گرفتن داخل *HOTBOX* به صورت هم دما فرض قابل قبولی می باشد.

در تمام محاسبات دمای کارکرد پیل سوختی ۸۰۰ درجه سانتی گراد و دمای محیط ۱۵ درجه سانتی گراد اعمال خواهد شد. علاوه بر آن فرض شده است که هندسه *HOTBOX* مکعبی می باشد. همان طور که در جدول ۴-۶ دیده می شود عایق حجم زیادی از *HOTBOX* را تشکیل می دهد. حتی تقریباً در تمام حالت ها از حجم سیستم بیشتر می شود.

جدول ۴-۶ حجم عایق بر حسب ضخامت های مختلف

Insulation thickness	$\Delta x=5\text{cm}$	$\Delta x=10\text{cm}$	$\Delta x=13\text{cm}$	$\Delta x=5\text{cm}$	$\Delta x=10\text{cm}$	$\Delta x=15\text{cm}$
$V_{Sys} \text{ (L)}$	$V_{Ins} \text{ (L)}$	$V_{Ins} \text{ (L)}$	$V_{Ins} \text{ (L)}$	V_{Ins}/V_{Sys}	V_{Ins}/V_{Sys}	V_{Ins}/V_{Sys}
20	31.2	84.8	166.6	1.6	4.2	8.3
80	69.6	171.1	310.4	0.9	2.1	3.9
$A_{Sys} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{Ins} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{Ins} \text{ (m}^2\text{)}$	$A_{Ins} \text{ (m}^2\text{)}$	A_{Ins}/A_{Sys}	A_{Ins}/A_{Sys}	A_{Ins}/A_{Sys}
0.44	0.83	1.33	1.96	1.87	3.02	4.43
1.11	1.69	2.39	3.21	1.52	2.14	2.88

عایق استفاده شده در این مطالعه در دمای متوسط ۴۰۰ درجه سانتی گراد و چگالی 320 kg/m^3 دارای ظرفیت حرارتی $1000 \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ می باشد. برای *HotBox* ی مکعبی شکل با سیستم ۸۰ لیتری و ضخامت عایق $\Delta x = 5\text{cm}$ ، جرم حرارتی عایق ها در حدود ۱۰٪ مقدار سیستم در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد می باشد. برای یک سیستم ۲۰ لیتری با ضخامت عایق 15cm جرم حرارتی عایق ها تقریباً دو برابر سیستم می باشد. باین حال به خصوص برای دستگاه های کوچک، محدودیت های سطحی نیاز به یک مفهوم پیشرفته تری از ضخامت عایق دارد که به یک ضخامت

بالای ۵ cm منجر می‌شود و لذا ابعاد سیستم به ابعاد داخلی، حجم و وزن اجزای اصلی SOFC مربوط می‌شود درحالی‌که سهم عایق‌ها در این تحلیل نادیده گرفته شده است.

۶-۲-۲- ظرفیت حرارتی:

ظرفیت حرارتی وابسته به دما برای انجام محاسبات استفاده شده است. به دلیل این که دمای داخل HOTBOX هم‌دما در نظر گرفته شده است، محاسبات حرارتی را می‌توان با در نظر گرفتن یک ظرفیت حرارتی کلی انجام داد. در حقیقت ترکیبی از ظرفیت‌های حرارتی برای مواد مختلف داخل HOTBOX می‌باشد به‌طوری‌که درصد جرم هر ماده یک ضریب وزنی از سهمش در ظرفیت حرارتی کلی می‌باشد. ظرفیت حرارتی کلی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c_p(T) = \frac{1}{m_{sys}} \cdot (m_{ref} \cdot c_{p(ref)}(T) + m_{burn} \cdot c_{p(burn)}(T) + m_{SOFC} \cdot c_{p(SOFC)}(T)) \quad (۶-۶)$$

بر این اساس ظرفیت‌های حرارتی منحصربه‌فردی برای ریفرمر، مشعل کاتالیستی، و استک SOFC محاسبه می‌شود. مقادیر وابسته به دمای $C_p(T)$ برای مواد مختلف از مراجع گرفته شده است. اما بعضی از داده‌ها برای سرامیک‌های مورد استفاده در SOFC را نمی‌توان در منابع در دسترس پیدا کرد به همین دلیل باید با داده‌های در دسترس تقریب زده شود. برای این امر بر اساس خواص ترموفیزیکی $Ni, ZrO_2, Y_2O_3, La_2O_3, SrO, Mn_2O_3$ با اعمال درصد حجمی ترکیب‌ها و چگالی‌ها انجام می‌شود و در کنار آن به کمک حجم و ضریب تخلخل اجزا سهم وزنی آن‌ها در ظرفیت حرارتی کلی محاسبه می‌شود.

خواص اجزایی که ضروری هستند برای محاسبه ظرفیت حرارتی کلی SOFC در جدول ۱-۶ نشان داده شده‌اند. ترکیب مواد، ضخامت، و تخلخل مقادیر معمول برای پیل‌های سوختی از نوع آندپایه می‌باشند. اما جرم اجزا به کمک تقریبی که برحسب چگالی‌ها انجام شده است در نظر گرفته شده است که نتایج آن در جدول ۲-۶ نشان داده شده است.

با توجه به داده‌های اندک موجود درباره‌ی ریفرمرهای CPOX فرض‌های آتی به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که منجر به تخمینی واقعی از ظرفیت حرارتی شود. آزمایشگاه بین‌المللی آرگون ANL یک ریفرمر سیلندری اکسایش جزئی ساخته‌اند که قطر آن برابر با ۸.۶ سانتی‌متر است. بستر کاتالیستی آن حجم ۱.۷ لیتر را اشغال می‌کند. این ریفرمر برای استک ۳ کیلوواتی طراحی شده است. برای تغذیه استک ۵ کیلوواتی به بستر کاتالیستی بزرگ‌تری نیاز است. که به نسبت ۵/۳ بزرگ‌تر می‌باشد یعنی ۲.۸ لیتر می‌شود.

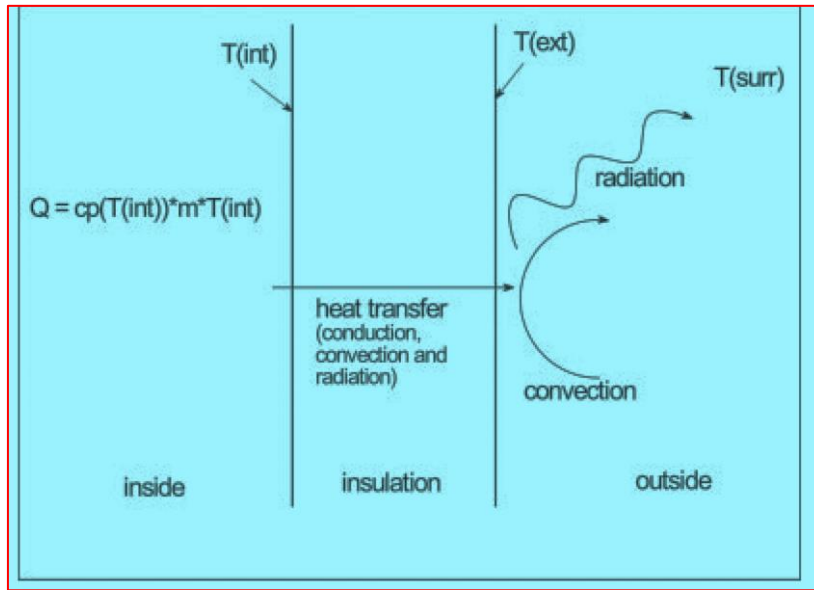
ANL همچنین میکرو ریفرمری با قطر ۱۲ میلی‌متر ساخته است که ۱ گرم کاتالیست دارد. با در نظر گرفتن سهم یکسان، حجم آن برابر ۴.۶ cm^3 می‌شود. (چگالی کاتالیست برابر است با 0.4 g/cm^3). لذا در یک ریفرمر ۸ کیلوپی بکار رفته در یک سیستم ۵ کیلوواتی، در حدود ۱۵٪ از جرم آن را کاتالیست شامل می‌شود.

اطلاعاتی درباره مواد مورد استفاده در مشعل‌های کاتالیستی در دسترس نمی‌باشد، لذا ظرفیت حرارتی هر یک از مواد اصلی نیکل، فولاد فریتی، و سرامیک‌ها یک‌سوم از ظرفیت حرارتی کل در نظر گرفته می‌شود.

حجم‌ها و جرم‌های اجزا اصلی داخل HOTBOX به همراه ضریب وزنی آن‌ها در جدول ۲-۶ نشان داده شده است.

۶-۲-۳- معادله انتقال حرارت:

تمام محاسبات در مطالعه حاضر برحسب تغییرات دمای ناشی از حرارت دفع یا جذب شده از HOTBOX می‌باشد. مکانیزم‌های انتقال حرارت، هدایت، جابجایی و تشعشع تماماً در معادله انتقال حرارت لحاظ شده‌اند (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶ مکانیزم های انتقال حرارت در استک

حرارت از *HOTBOX* به سمت محیط اطرافش از طریق مکانیزم های هدایت و جابجایی و تشعشع انتقال پیدا می کند. سطح بیرونی *HOTBOX* که دمای بیرونی آن T_{ext} می باشد به محیط اطراف از طریق جابجایی و تشعشع حرارت انتقال می دهد:

$$\dot{Q}_{loss} = -(\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}) \quad (6-7)$$

نرخ انتقال حرارت از طریق جابجایی با مقدار سطح خارجی *HOTBOX*، A_{ext} و اختلاف دمای محیط اطراف و دمای سطح خارجی $T_{ext} - T_{surr}$ متناسب می باشد و به صورت زیر قابل بیان است:

$$\dot{Q}_{conv} = -h \cdot A_{ext} \cdot (T_{ext} - T_{surr}) \quad (6-8)$$

که h ضریب انتقال حرارت جابجایی و برحسب $W m^{-2} K^{-1}$ می باشد. این پارامتر به متغیرهای مختلفی بستگی دارد و باید به صورت آزمایشگاهی محاسبه شود. مقدار متوسط برابر با $10 W m^{-2} K^{-1}$ برای آن در نظر گرفته شده است که تقریب خوبی برای جابجایی آزاد می باشد.

بر اساس معادله استفان بولتزمن، حداکثر نرخ انرژی که می تواند از یک سطح با مساحت A_{ext} و دمای T_{ext} ساطع شود، برابر است با

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma \cdot A_{ext} \cdot T_{surr}^4 \quad (6-9)$$

که $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ثابت استفان بولتزمن می باشد.

این رابطه برای جسم کاملاً سیاه صحیح می باشد درحالی که تمامی سطوح مقدار حرارت کمتری از آن ساطع می کنند. لذا تصحیحی با فاکتور بدون بعد ϵ (ضریب تشعشع) انجام می شود که مقدار آن $0 \leq \epsilon \leq 1$ است.

برای سیستم های واقعی باید تا حد امکان اتلاف حرارت ناشی از تشعشع را به حداقل رساند. لذا ضریب تشعشع با مقدار کم $\epsilon = 0.03$ در نظر گرفته می شود که متناسب با فویل آلومینیوم می باشد.

علاوه بر آن هر سطحی انرژی تشعشعی را از محیط اطراف دریافت می کند. انحراف از یک جاذب ایده آل مجدداً با یک ضریب تصحیح α که ضریب جذب خوانده می شود، لحاظ می شود.

در این مطالعه، وابستگی ε و α به دما و طول موج در نظر گرفته نشده است و ضریب جذب و ضریب صدور یکسان در نظر گرفته شده‌اند. با این کار، نرخ انرژی تشعشعی که از یک سطح با مساحت A_{ext} و دمای T_{ext} به محیط اطراف در دمای T_{surr} با سطح داده می‌شود به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{ext} \cdot (T_{ext}^4 - T_{surr}^4) \quad (6-10)$$

شار حرارتی اتلافی از سطح خارجی *HOTBOX* برابر است با :

$$\dot{Q}_{loss} = -(\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}) = -\left[h \cdot A_{ext} \cdot (T_{ext} - T_{surr}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{ext} \cdot (T_{ext}^4 - T_{surr}^4)\right] \quad (6-11)$$

با داشتن یک عایق خوب، منطقی است که فرض کنیم دمای سطح خارجی *HOTBOX* تفاوت چندانی با محیط پیرامونی خود ندارد. با این کار معادله بالا به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\dot{Q}_{loss} = -U \cdot A_{ext} \cdot (T_{ext} - T_{surr}) \quad (6-12)$$

که $U = h + \varepsilon \sigma 4 T_{surr}^3$ ضریب انتقال حرارت کلی تعریف می‌شود.

اغلب عایق‌های با بازدهی بالا، ساختار میکرومتخلخل دارند. شار حرارتی از عایق‌های متخلخل شامل جابجایی در محفظه‌های کوچک هدایت از میان ماده جامد می‌باشد. هدایت‌پذیری کلی معمولاً وابسته به دما می‌باشد و شامل تمام مکانیزم‌های انتقال حرارت است که باید به صورت آزمایشگاهی مشخص گردد.

در دماهای پایین انتقال حرارت از طریق هدایت، اصلی‌ترین حالت انتقال حرارت می‌باشد؛ این در حالی است که در دماهای بالا انتقال حرارت تشعشعی، انتقال حرارت غالب می‌باشد. یک‌راهکار خوب این است که با توجه به تعریف بالا از ضریب انتقال حرارت کلی، U ، یک‌ترم چندجمله‌ای را به داده‌های آزمایشگاهی فیت نماییم.

$$\lambda(T) = \lambda_{cond} + \lambda_{rad} \cdot T_{mean}^3 / \text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (6-13)$$

$$T_{mean} = \frac{T_{int} + T_{ext}}{2} \quad (6-14)$$

که T_{mean} متوسط دمای بین سطح داخلی و خارجی عایق می‌باشد. مقدار مرسوم برای میکرو متخلخل‌های دما بالا بر اساس داده‌های آزمایشگاهی $\text{Microtherm Super G Grade @ 320 kg m}^{-3}$ برابر $\lambda_{cond} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ و $\lambda_{rad} = 7 \cdot 10^{-12} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^4$ است.

شار حرارتی عبوری از یک دیوار صفحه‌ای به ضخامت Δx و مساحت سطح A توسط برابر است با

$$\dot{Q}_{loss,2} = -\lambda(T_{mean}) \cdot \frac{A}{\Delta x} (T_{int} - T_{ext}) \quad (6-15)$$

باین‌حال، هنگام محاسبه انتقال حرارت عبوری از دیوارهای یک مکعب دیواره‌های داخلی و خارجی ابعاد متفاوتی دارند. انتقال حرارت از گوشه‌ها و فلنج‌ها باید در نظر گرفته شود. در حالت کلی انتقال حرارت بین دو سطح با دماهای T_{ext} و T_{int} را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\dot{Q}_{loss,2} = -\lambda(T_{mean}) \cdot S \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (6-16)$$

که S ضریب شکل هدایت می‌باشد. که تنها به هندسه بستگی دارد. برای یک هندسه مکعبی با حجم V و ضخامت عایق Δx برای طراحی *HOTBOX* از ضریب شکل هدایت به صورت زیر استفاده می‌نماییم.

$$S = \frac{6 \cdot (\sqrt[3]{V})^2}{\Delta x} + 8 \cdot 0.15 \cdot \Delta x + 12 \cdot 0.54 \cdot \sqrt[3]{V} \quad (6-17)$$

نرخ حرارت ازدست داده شده یا وارد شده به داخل *HOTBOX* بر حسب معادله‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{gain} = \frac{d}{dt} (m \cdot c_p(T_{int}) \cdot T_{int}) \quad (6-18)$$

که m جرم سیستم و $c_p(T_{int})$ ظرفیت انتقال حرارت کلی وابسته به دمای سیستم می‌باشد. با فرض ثابت بودن $c_p(T_{int})$ در بازه‌ی کوتاهی از زمان، Δt معادله بالا فرم دیفرانسیلی به فرم اختلاف محدودی به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{gain} = m \cdot c_p(T_{int}(t)) \cdot \frac{T_{int}(t + \Delta t) - T_{int}(t)}{\Delta t} \quad (6-19)$$

با ترکیب معادله‌های ۶ و ۱۰ و ۱۳ خواهیم داشت:

$$T_{int}(t + \Delta t) = -\frac{1}{m \cdot c_p(T_{int}(t))} \cdot \left(\left(\frac{U \cdot A_{ext}}{1 + \frac{U \cdot A_{ext}}{\lambda(T_{mean}) \cdot S}} \cdot (T_{int}(t) - T_{surr}) - \dot{Q}_{gain} \right) \cdot \Delta t + T_{int}(t) \right) \quad (6-20)$$

که A_{ext} مساحت سطح بیرونی می‌باشد که می‌توان به کمک حجم داخلی V و ضخامت عایق Δx برای یک شکل مکعبی به صورت زیر محاسبه نمود.

$$A_{ext} = 6 \cdot \left(\sqrt[3]{V} + \Delta x \right)^2 \quad (6-21)$$

برای مرحله‌ی اول تکرار، شرط اولیه باید برای $T_{int}(t=0)$ and $T_{ext}(t=0)$ or $T_{mean}(t=0)$ داده شده باشد.

نرخ انتقال حرارت از سطح خارجی عایق *HOTBOX* به محیط اطرافش متناسب است با سطح تماس دو محیط یعنی A_{ext} و همچنین به عنوان تقریب متناسب است با دمای محیط T_{surr} و دمای سطح خارجی آن T_{ext} که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q}_{loss} = -U \cdot A_{ext} \cdot (T_{ext} - T_{surr}) \quad (6-22)$$

که U ضریب انتقال حرارت کلی متناظر با انتقال حرارت توأمان جابجایی و تشعشع می‌باشد.

نرخ حرارت خارج شده یا وارد شده به *HOTBOX* مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{gain} = \frac{d}{dt} (m \cdot c_p(T_{int}) \cdot T_{int}) \quad (6-23)$$

که m جرم سیستم و $C_p(T_{int})$ ظرفیت حرارتی کلی وابسته به دمای آن می‌باشد.

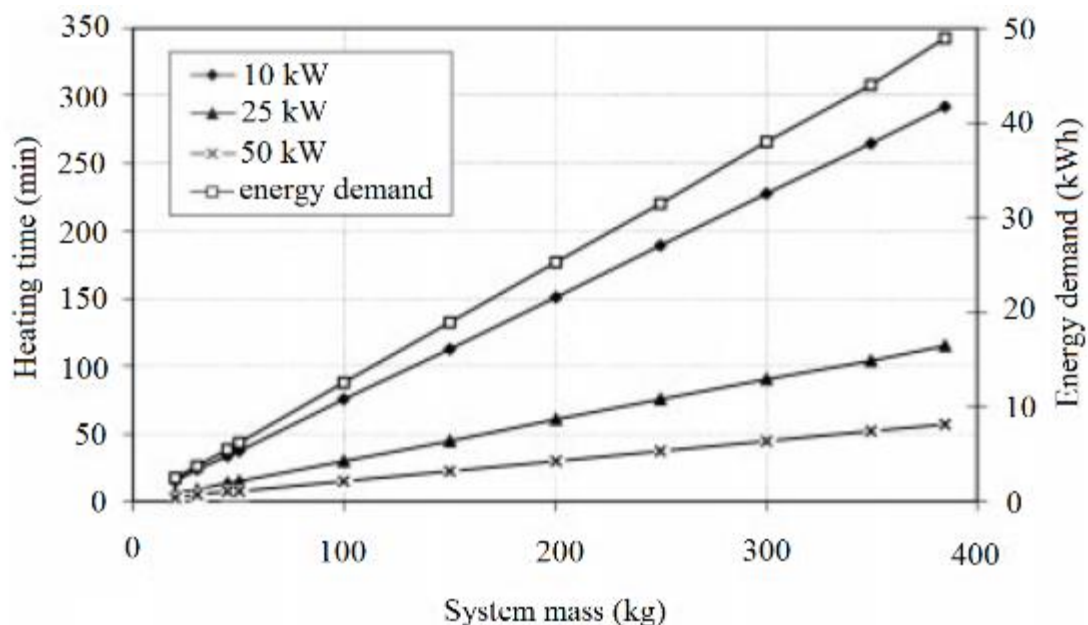
برای فاصله‌ی زمانی کوتاه Δt ، شرایط پایا می‌تواند فرض شود. و لذا اتلاف حرارت از سطح خارجی عایق A_{ext} به محیط اطرافش برابر می‌شود با انتقال حرارت عبوری از عایق و همچنین برابر است با کاهش انرژی حرارتی داخل *HOTBOX*. لذا معادلات ۷، ۸، ۹ را می‌توان به صورت زیر با یکدیگر ترکیب نمود.

$$T_{int}(t + \Delta t) = -\frac{1}{m \cdot c_p(T_{int}(t))} \cdot \left(\left(\frac{U \cdot A_{ext}}{1 + \frac{U \cdot A_{ext}}{\lambda(T_{mean}) \cdot S}} \cdot (T_{int}(t) - T_{surr}) - \dot{Q}_{gain} \right) \cdot \Delta t + T_{int}(t) \right) \quad (6-24)$$

انتقال از حالت دیفرانسیلی به تفاضل محدودی، این امکان را به وجود می‌آورد که با معلوم بودن دمای $T_{int}(t)$ و $T_{mean}(t)$ و $T_{ext}(t)$ بتوان $T_{int}(t+\Delta t)$ را محاسبه نمود. کوره کاتالیستی، به‌عنوان راه‌اندازی و راه‌انداز مجدد استفاده می‌شود. انرژی موردنیاز برای گرم کردن سیستم را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q_{heat} = \dot{Q}_{gain} \cdot t_{heat} \quad (6-25)$$

که t_{heat} زمان موردنیاز برای اینکه $T_{int}(t_{heat})$ به مقدار موردنظر برسد، می‌باشد. در شکل ۴-۶ انرژی مورد نیاز برای گرم کردن سیستم، از دمای محیط ۱۵ درجه سانتیگراد تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد بسته به جرم سیستم، نشان داده شده است. محاسبه با استفاده از معادله (۱۰) انجام شد با مقادیر $T_{ext}(t=0) = 15^\circ\text{C}$ ، $T_{int}(t=0) = 15^\circ\text{C}$ و $\dot{Q}_{gain} = 10 \text{ kW}$ (25kW; 50kW) و زمان رسیدن به دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به عنوان زمان گرمایش تعیین شد و مقدار انرژی مورد نیاز بر اساس معادله ۱۱ محاسبه می‌شود. ضخامت لایه عایق ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. در صورت کاهش ضخامت عایق میزان انرژی مورد نیاز افزایش می‌یابد. یک سیستم ۵ کیلووات (الکتریکی) (۴۵ کیلوگرم) حدود ۵/۵ کیلووات ساعت حرارتی انرژی نیاز دارد تا دمای آن افزایش یابد و یک سیستم ۵۰ کیلووات (الکتریکی) (۳۸۵ کیلوگرم) حدود ۴۹ کیلووات حرارتی انرژی نیاز دارد. در شکل ۴-۶ سه سایز هیتر متفاوت ۱۰، ۲۵ و ۵۰ کیلووات حرارتی مقایسه شده است. یک سیستم ۵ کیلووات الکتریکی با هیترهای مذکور به ترتیب طی ۱، ۲ و ۵ ساعت به دما میرسد و یک سیستم ۵ کیلووات الکتریکی طی ۷، ۱۳ و ۳۳ دقیقه.



شکل ۴-۶- انرژی مورد نیاز و زمان به دما رسیدن یک سیستم SOFC بر اساس جرم آن

۶-۳- جمع بندی

در این فصل با درنظر گرفتن یک طراحی ساده برای محفظه داغ، بر اساس معادلات انتقال حرارت و همچنین خواص مواد مرسوم به کار رفته در یک استک رابطه‌ای برای افزایش دمای استک پیل سوختی اکسید جامد از دمای محیط تا دمای کاری به دست آمد. بر طبق محاسبات انجام شده، یک سیستم ۵ کیلووات (الکتریکی) (۴۵ کیلوگرم)

حدود ۵/۵ کیلووات ساعت حرارتی و یک سیستم ۵۰ کیلووات (الکتریکی) (۳۸۵ کیلوگرم) حدود ۴۹ کیلووات حرارتی انرژی نیاز دارد تا به دمای کاری برسد. بر اساس نحوه گرمایش سیستم و همچنین با توجه به قابلیت مواد به کاررفته در ساخت استک می‌توان مدت زمان شروع به کار یک سیستم پیل سوختی را مدیریت نمود.

۷- جمع بندی و دستاوردها

به طور خلاصه از دستاوردهای حاصل از این پروژه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- توسعه زیرساختهای لازم به منظور انجام شبیه سازی عملکرد استکهای بزرگ پیل سوختی اکسید جامد.
- ۲- بهبود طراحی استکهای کوچک مورد استفاده در پژوهشگاه نیرو با هدف یکنواختی حداکثر جریان گازها و دستیابی به عملکرد بالاتر نسبت به طراحی اولیه.
- ۳- طراحی استکهای بلند و معرفی طراحی با حداکثر یکنواختی عملکرد در طبقات مختلف استک.
- ۴- شبیه سازی الکتروشیمیایی استکهای بلند و بررسی توزیع دما در طبقات مختلف.
- ۵- ارائه راهکارهایی جهت کاهش گرادیان حرارتی و کاهش حداکثر دمای سل‌ها با هدف جلوگیری از تخریب حرارتی استک و افزایش عملکرد طولانی مدت آن.
- ۶- طراحی اولیه برای محفظه داغ که بر مبنای آن و با توجه به ظرفیت استک می‌توان زمان راه‌اندازی را مدیریت نمود.