

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

بررسی تجربی فلودینگ آب در پیل سوختی غشای پلیمری

نگارنده : مهرا ن افرا

استاد راهنما

دکتر محسن نظری

دکتر محمدحسن کیهانی

بهمن ۱۳۹۵

شکر و قدردانی

چسپاں کزار کسانى، مستم که سرآغاز تولد من هستند. از یکی زاده می شوم و از دیگری جاودانه. استادی که

سیدی را برتخته سیاه زندگی ام نگاشت و مادری که تار موی از او به پای من سیاه نماند. تقدیریم به

مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگی ام را ریون مهر و عطفوت او می دانم. پدر

مهربانی مشفق، بردبار و حامی.

تعهد نامه

اینجانب مهرا ن افرا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی فلودینگ آب در پیل سوختی غشای

پلیمری

تحت راهنمایی دکتر محسن نظری و دکتر محمدحسن کیهانی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده فارسی

پیل‌های سوختی به‌عنوان نماینده نسل جدید تولید انرژی در دهه‌ی اخیر، توجهات زیادی را به سمت خود جلب کرده است. بازدهی بالای تبدیل انرژی در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی، آلودگی نزدیک به صفر، پیل‌های سوختی را به‌عنوان یک نامزد ایده آل تولید انرژی برای استفاده در سیستم‌های حمل‌ونقل انتخاب کرده است. در پیل سوختی غشای پلیمری در حال کارکرد، حرارت و آب به‌عنوان محصولات جانبی تولید می‌شوند. آب تولیدشده باعث کاهش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری و کاستن عمر پیل می‌شود. بنابراین، باید با اعمال روش‌هایی، آب تولیدشده را در سریع‌ترین زمان از لایه‌های پیل خارج و از فلودینگ آن در پیل سوختی غشای پلیمری جلوگیری کنیم. در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی واقعی، با انتخاب یک لایه انتشار گاز شفاف به آشکارسازی انتقال آب در پیل سوختی غشای پلیمری پرداخته و حرکت انگشتی‌ها در لایه انتشار گاز و مکانیزم انگشت زنی در این لایه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تأثیر اضافه کردن لایه متخلخل میکرو و نیز افزایش ضخامت این لایه بر فلودینگ آب در لایه انتشار گاز بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که رژیم جریان دو فاز، انگشتی موئینگی است و نیروی عامل ایجاد انگشتی‌ها، نیروی موئینگی است. علاوه بر این مشاهده شد که جریان عرضی روی لایه کاتالیزور باعث افزایش فلودینگ آب و اختلال در انتقال آب در لایه انتشار گاز می‌شود و از این طریق باعث کاهش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود. مشاهدات نشان داد که با افزودن لایه متخلخل میکرو جریان عرضی بر روی لایه کاتالیزور از بین می‌رود و انگشتی‌ها در محل‌های مشخصی بر روی سطح لایه متخلخل میکرو، وارد لایه انتشار گاز می‌شوند. همچنین انگشتی‌ها مسیرهای مستقیمی را برای رسیدن به کانال گاز انتخاب می‌کنند و از این طریق باعث کاهش فلودینگ و بهبود عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شوند.

کلمات کلیدی: پیل سوختی غشای پلیمری، لایه انتشار گاز، انگشتی

موئینگی، انتقال آب، سیال خیس نشونده، لایه متخلخل میکرو

لیست مقالات مستخرج شده از پایان نامه:

• مهران افرا، محسن نظری، محمد حسن کیهانی، بررسی تجربی

ناپایداری انگشتی موئینگی در پیل سوختی غشای پلیمری؛ دومین

کنفرانس سراسری دستاوردهای نوین در مهندسی مواد، مکانیک و

هوافضا (پذیرش مقاله)

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- پیل سوختی هیدروژنی - اصول کار	۳
۱-۲-۱- پیل‌های سوختی سری - صفحه دوقطبی	۶
۱-۲-۲- انواع پیل سوختی	۸
۱-۲-۳- پیل سوختی غشای مبادله پروتون (پلیمری)	۸
۱-۳-۲-۱- مجموعه غشا - الکتروود	۹
۱-۳-۲-۲- لایه‌های انتشار گاز	۹
فصل ۲ مروری بر تحقیقات پیشین.....	۱۳
۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- مدل‌های عددی ماکروسکوپی	۱۴
۳-۲- مدل‌های میکروسکوپی	۱۶
۱-۳-۲- بررسی به روش مقیاس حفره	۱۶
۴-۲- بررسی‌های آزمایشگاهی	۲۰
۱-۴-۲- تکنیک‌های اندازه‌گیری و آشکارسازی نابه‌جا	۲۰
۲-۴-۲- تکنیک‌های اندازه‌گیری و آشکارسازی درجا	۲۳
۵-۲- مطالعه حاضر	۲۵
فصل ۳ لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی.....	۲۷
۱-۳- مقدمه	۲۸
۲-۳- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش	۲۸
۱-۲-۳- پمپ سرنگ	۲۸
۲-۲-۳- ترازو با دقت بالا	۲۹
۳-۲-۳- همزن هات پلیت	۳۰
۴-۲-۳- دوربین و لنز	۳۰
۵-۲-۳- دستگاه اندازه‌گیری گرانروی (ویسکومتر)	۳۲
۶-۲-۳- دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی	۳۲
۷-۲-۳- پیکنومتر	۳۵
۸-۲-۳- دماسنج دیجیتال	۳۶

۳۷	۳-۳- اجزای ست‌آپ آزمایشگاهی
۳۷	۳-۳-۱- سلول شیشه‌ای شفاف
۳۸	۳-۴- مواد مورد استفاده در آزمایش
۳۸	۳-۴-۱- الیاف شیشه‌ای بافته شده حصیری
۴۰	۳-۴-۲- دانه‌های هیدروژلی
۴۱	۳-۴-۳- دانه‌های شیشه‌ای
۴۲	۳-۴-۴- درپوش
۴۳	۳-۴-۵- سیال خیس نشونده
۴۶	۳-۴-۵-۱- تتراکلرید کربن
۴۷	۳-۴-۵-۲- روغن سویا
۴۸	۳-۴-۵-۳- رنگ
۵۰	۳-۵- مراحل انجام آزمایش

فصل ۴ نتایج و بحث ۵۳

۵۴	۴-۱- مقدمه
۵۴	۴-۲- رژیم جریان
۵۵	۴-۳- فرآیند انگشت‌زنی
۵۵	۴-۴- مکانیزم انگشت‌زنی
۵۸	۴-۵- بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، بدون لایه متخلخل میکرو (آزمایش اول)
۶۵	۴-۵-۱- رفتار حرکتی سیال خیس‌نشونده در لایه انتشار گاز مدل مشابه با توجه به شکل ۴-۲
	۴-۶- بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی‌متر (آزمایش دوم)
۷۱	
۷۷	۴-۶-۱- رفتار حرکتی سیال خیس‌نشونده در لایه انتشار گاز مدل مشابه با توجه به شکل ۴-۹
	۴-۷- بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، با لایه متخلخل میکرو به ضخامت دو سانتی‌متر (آزمایش سوم)
۸۶	
۸۸	۴-۸- بررسی و مقایسه کلی هر سه آزمایش
۹۱	۴-۸-۱- مقایسه انگشتی‌های وارونه
۹۱	۴-۸-۲- مقایسه تعداد انگشتی‌های مؤثر
۹۲	۴-۸-۳- وجود جریان عرضی بر روی لایه کاتالیزور
۹۴	۴-۸-۴- زمان لازم برای رسیدن انگشتی‌ها به کانال گاز
۹۵	۴-۸-۵- حجم سیال موجود در لایه انتشار گاز پس از اتمام آزمایش

۹۷	فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۸	۵-۱- مقدمه
۹۸	۵-۲- نتیجه‌گیری
۹۹	۵-۳- پیشنهادات
۱۰۱	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- پیل سوختی ارائه شده توسط لایر و ویلیام گرو، الکترولیز آب [۱] پیکان جهت جریان الکترون‌ها از - به + را نشان می‌دهد. ۳
- شکل ۱-۲- ساختار پایه بخشهای کاتد، الکترولیت و آند یک پیل سوختی [۱] ۴
- شکل ۱-۳- اصول عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری و لایه‌های آن ۶
- شکل ۱-۴- اتصال ساده سلول‌ها در حالت سری [۱] ۷
- شکل ۱-۵- (الف) دسته پیل (ب) سلول تک با مسیرهای تغذیه کاتد و آند [۱] ۷
- شکل ۱-۶- لایه‌های انتشار گاز از جنس (الف) کاغذ کربنی [۲] (ب) پارچه کربنی [۲] (ج) لایه انتشار گاز و لایه متخلخل میکرو [۳] ۱۰
- شکل ۱-۲- هندسه مربوط به مطالعه تاب و همکارانش [۱۹] ۱۸
- شکل ۲-۲- شماتیک درخت موئینگی همگرا (درخت وارونه) [۲۷] ۲۲
- شکل ۲-۲- شماتیک ایده آل، انتقال آب در لایه انتشار گاز، ارائه شده توسط لیستر و همکارانش [۲۶] ۲۲
- شکل ۱-۳- پمپ سرنگ jms ۲۹
- شکل ۲-۳- ترازو با دقت بالا Sartorius ۲۹
- شکل ۳-۳- همزن هات پلیت IKA RCT ۳۰
- شکل ۴-۳- (الف) دوربین عکس برداری PCO (ب) لنز ماکرو nikon ۳۱
- شکل ۵-۳- ویسکومتر ۳۲
- شکل ۶-۳- دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی ۳۴
- شکل ۷-۳- قطره سیال خیس نشونده برای محاسبه کشش سطحی در دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی ۳۴
- شکل ۸-۳- پیکنومتر ۳۵
- شکل ۹-۳- دماسنج دیجیتال ۳۶
- شکل ۱۰-۳- سلول شیشه‌ای شفاف ۳۷
- شکل ۱۱-۳- مخزن شیشه‌ای ۳۸
- شکل ۱۲-۳- الیاف حصیری بافته شده ۳۹
- شکل ۱۳-۳- دانه‌های هیدروژلی در حالت خشک ۴۰
- شکل ۱۴-۳- دانه‌های هیدروژلی اشباع ۴۱

- شکل ۳-۱۵- دانه‌های شیشه‌ای ۴۱
- شکل ۳-۱۶- درپوش ۴۳
- شکل ۳-۱۷- نمونه‌های ساخته شده سیال خیس نشونده ۴۶
- شکل ۳-۱۸- تراکلرید کربن به کاربرده شده در ساخت سیال خیس نشونده ۴۷
- شکل ۳-۱۹- روغن سویا به کاربرده شده در ساخت سیال خیس نشونده ۴۸
- شکل ۳-۲۰- رنگ پودری به کاربرده شده برای رنگ دار کردن سیال خیس نشونده ۴۸
- شکل ۳-۲۱- شماتیک مدل لایه‌های پیل سوختی (الف) بدون لایه متخلخل میکرو (ب) با لایه متخلخل میکرو ۵۱
- شکل ۴-۱- نمودار تعیین رژیم جریان دو فازی [۳۸] ۵۴
- شکل ۴-۲- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز مدل بدون لایه متخلخل میکرو ۶۴
- شکل ۴-۳- تقسیم جریان (الف) انگشتی شماره ۱ (ب) انگشتی شماره ۲ ۶۶
- شکل ۴-۴- حرکت وارونه در یکی از شاخه‌های انگشتی ۱ ۶۷
- شکل ۴-۵- حرکت وارونه در انگشتی‌های شماره (الف) ۵ (ب) ۱۰ (ج) ۱۵ (د) ۱۸ ۶۷
- شکل ۴-۶- حرکت وارونه در انگشتی شماره ۴ ۶۸
- شکل ۴-۷- رسیدن انگشتی شماره ۴ به کانال گاز (الف) قبل از رسیدن (ب) بعد از رسیدن ۶۹
- شکل ۴-۸- انقباض ناگهانی در انگشتی شماره ۴ (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض ۷۱
- شکل ۴-۹- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی‌متر ۷۷
- شکل ۴-۱۰- تقسیم جریان در انگشتی شماره ۳ ۷۹
- شکل ۴-۱۱- حرکت وارونه در انگشتی B (الف) قبل از برگشت زدن (ب) بعد از برگشت زدن ۷۹
- شکل ۴-۱۲- حرکت وارونه در (الف) انگشتی شماره ۱۶ (ب) شاخه‌های انگشتی B (ج) شاخه‌های انگشتی C ۸۰
- شکل ۴-۱۳- مسیر حرکت انگشتی‌های رسیده به کانال گاز (الف) انگشتی A (ب) انگشتی C و انگشتی شماره ۵ ۸۲
- شکل ۴-۱۴- تشکیل حلقه (الف) انگشتی B (ب) انگشتی C ۸۳
- شکل ۴-۱۵- انقباض ناگهانی در انگشتی A (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض ۸۴
- شکل ۴-۱۶- انقباض ناگهانی در انگشتی C (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض ۸۵
- شکل ۴-۱۷- انقباض در انگشتی شماره ۵ (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض ۸۵

شکل ۴-۱۸- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز با لایه متخلخل میکرو به ضخامت دو
سانتی متر ۸۸

شکل ۴-۱۹- مقایسه توزیع سیال خیس نشونده در هر سه آزمایش (الف) ۵۰ میلی لیتر تزریق (ب)
۱۰۰ میلی لیتر تزریق (ج) ۲۰۰ میلی لیتر تزریق ۹۰

شکل ۴-۲۰- جریان عرضی بر روی لایه کاتالیزور در لایه انتشار گاز در آزمایش اول (الف)
۱۲۵ میلی لیتر تزریق (ب) ۱۳۷,۵ میلی لیتر تزریق (ج) ۱۵۰ میلی لیتر تزریق (د) ۱۶۲,۵ میلی لیتر تزریق
..... ۹۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- انواع مختلف پیل‌های سوختی [۱] ۸
- جدول ۱-۳- مشخصات الیاف شیشه‌ای حصیری ۳۹
- جدول ۲-۳- مشخصات هندسی و پارامترهای مهم لایه‌های مورد استفاده در مدل ۴۲
- جدول ۳-۳- خصوصیات فیزیکی تترا کلرید کربن ۴۷
- جدول ۴-۳- خواص سیال، شرایط آزمایشگاهی، شرایط کارکرد پیل واقعی، اعداد بی‌بعد ۴۹
- جدول ۱-۴- تعداد انگشتی‌های مؤثر در هر آزمایش ۹۱
- جدول ۲-۴- زمان رسیدن انگشتی‌های مؤثر به کانال گاز ۹۴

فهرست علائم

• علائم انگلیسی

V	حجم و سرعت
T	دما
t	زمان
d	سایز ذرات
R	شعاع
Bo	عدد بی بعد باند
Da	عدد بی بعد دارسی
Ca	عدد بی بعد موئینگی
P	فشار
D	قطر
M	نسبت گرانروی
K	نفوذ پذیری

• علائم یونانی

ε	تخلخل
ρ	چگالی
ϑ	زاویه تماس
σ	کشش سطحی
μ	گرانروی دینامیکی

• زیرنویس‌ها

P	حفره
def	زمینه
inv	نفوذ کننده

۱ مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

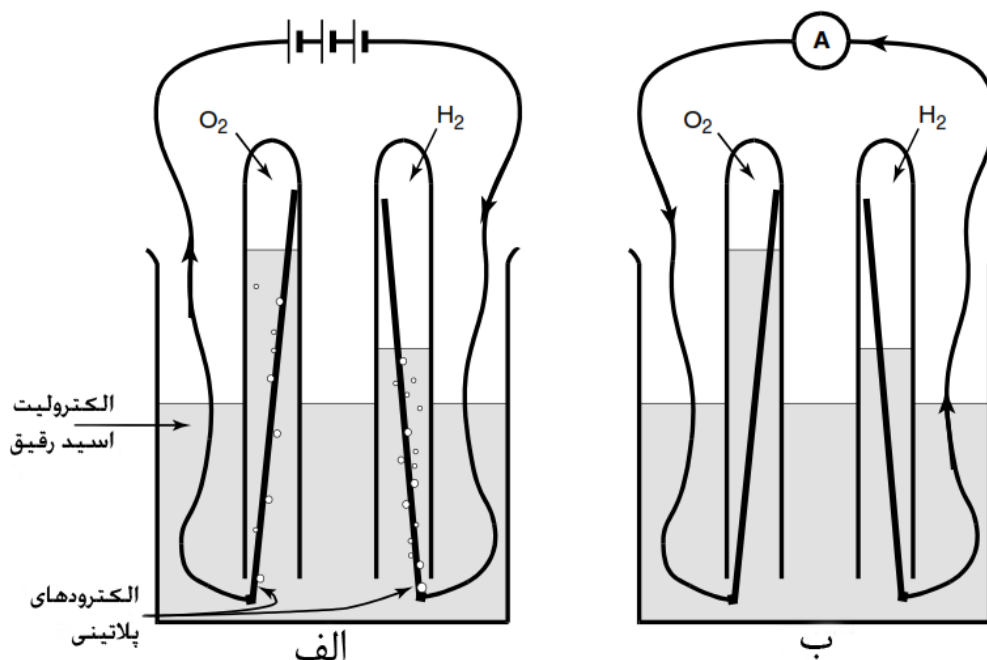
انرژی از دیرباز به عنوان موتور محرک جوامع بشری شناخته شده است و با پیشرفت بشر بر اهمیت آن افزوده شده است. امروزه مجموعه‌ای از عوامل مختلف از جمله محدودیت منابع فسیلی، تأثیرات منفی زیست محیطی سوخت‌های فسیلی، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی از جمله دلایلی هستند که بسیاری از متخصصین مباحث انرژی و محیط زیست را به حرکت به سوی ایجاد ساختاری نوین مبتنی بر امنیت ارائه انرژی، حفظ محیط زیست، ارتقاء کارایی سیستم انرژی وادار نموده است. بر این اساس هیدروژن یکی از بهترین گزینه‌ها جهت ایفای نقش حامل انرژی در سیستم جدید ارائه انرژی می‌باشد. هیدروژن بعنوان فراوان‌ترین عنصر موجود در سطح زمین به روش‌های مختلف قابل تولید می‌باشد. عمل تبدیل انرژی شیمیایی موجود در هیدروژن به انرژی الکتریکی توسط دستگاهی به نام پیل سوختی انجام می‌پذیرد.

پیل‌های سوختی به‌عنوان نماینده نسل جدید تولید انرژی در دهه‌ی اخیر قرن بیست و یک، توجهات زیادی را به سمت خود جلب کرده است. بازدهی بالای تبدیل انرژی نسبت به موتورهای احتراق داخلی، آلودگی نزدیک به صفر و بی سروصدا بودن پیل‌های سوختی را به‌عنوان یک نامزد ایده‌آل تولید انرژی برای استفاده در سیستم‌های حمل‌ونقل و سیستم‌های تولید هم‌زمان قدرت و حرارت^۱ انتخاب کرده است. در پیل سوختی غشای پلیمری در حال کارکرد، حرارت و آب به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌شود. آب تولیدشده باعث کاهش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود. بنابراین، باید با اعمال روش‌هایی، آب تولیدشده را خارج و از فلودینگ آن در پیل سوختی غشای پلیمری جلوگیری کنیم. در ادامه‌ی این فصل اصول کلی کارکرد پیل سوختی و اجزا سازنده‌ی پیل سوختی غشای پلیمری و نحوه کار آن را به طور مختصر شرح می‌دهیم.

^۱ Combined Heat and Power (CHP)

۲-۱ پیل‌های سوختی هیدروژنی^۱ - اصول کار

اصول عملکرد پیل سوختی هیدروژنی بسیار ساده است. سر ویلیام گرو^۲ در سال ۱۸۹۳ یک شکل ابتدایی از پیل سوختی با استفاده از آزمایش‌های تجربی به صورتی که در شکل ۱-۱ آمده است ارائه دادند [۱]:



شکل ۱-۱- پیل سوختی ارائه شده توسط ویلیام گرو، الکترولیز آب [۱] پیکان جهت جریان الکترون‌ها از - به + را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌کنید در شکل ۱-۱ (الف) آب با عبور جریان الکتریکی از میان آن الکترولیز می‌شود و به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود. در شکل ۱-۱ (ب) نیز با جایگزینی منبع قدرت با آمپرسنج یک جریان کوچک برقرار می‌شود و الکترولیز معکوس می‌شود. اکسیژن و هیدروژن دوباره باهم ترکیب می‌شوند و یک جریان الکتریکی تولید می‌شود. به زبان ساده‌تر می‌توان گفت سوخت هیدروژنی سوخته می‌شود و واکنش زیر را انجام می‌دهد به جای آزادسازی انرژی گرمایی، انرژی الکتریکی تولید می‌کند [۱].

¹ Hydrogen Fuel Cells

² William Grove

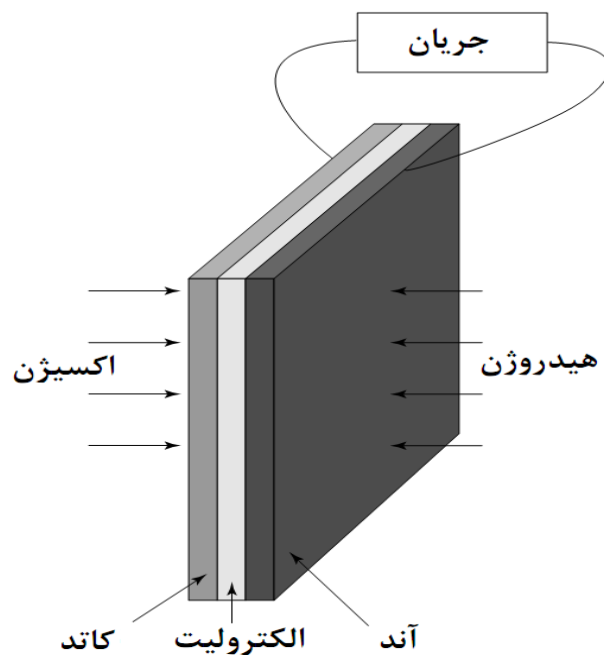


آزمایش‌هایی که در شکل‌های (الف) و (ب) در بالا نشان داده شده است اصول کار ابتدایی یک پیل سوختی را نشان می‌دهد، ولی جریان تولیدشده توسط آن خیلی کوچک است که دلایل اصلی آن به صورت زیر است [۱]:

(الف) کوچک بودن سطح مقطع بین گاز، الکتروده^۱ (کاتد^۲ و یا آند^۳) و الکتrolیت^۴.

(ب) فاصله زیاد بین الکترودها که باعث افزایش مقاومت الکتrolیت در برابر برقراری جریان الکتریکی می‌شود.

برای غلبه بر این مشکلات، الکترودها به صورت تخت (مسطح) ساخته می‌شوند با یک لایه نازک از الکتrolیت همان طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

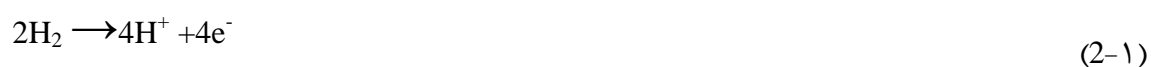


شکل ۱-۲- ساختار پایه بخش‌های کاتد، الکتrolیت و آند یک پیل سوختی [۱]

برای این که الکتrolیت و گاز هر دو بتوانند به الکتروده نفوذ کنند ساختار الکتروده را به صورت متخلخل

¹ Electrode
² Cathode
³ Anode
⁴ Electrolyte

می‌سازند چون با این کار بیشترین امکان تماس ممکن بین الکتروود، الکترولیت و گاز ایجاد می‌شود. برای فهمیدن این که چگونه واکنش بین هیدروژن و اکسیژن جریان الکتریکی تولید می‌کند و این که الکترون‌ها از کجا می‌آیند، ما باید واکنش‌هایی که جداگانه در هر الکتروود اتفاق می‌افتد را بررسی کنیم. در آند یک پیل سوختی با الکترولیت اسیدی، گاز هیدروژن به یون تبدیل می‌شود که یون H^+ (پروتون) تولید و الکترون آزاد می‌کند [1]:

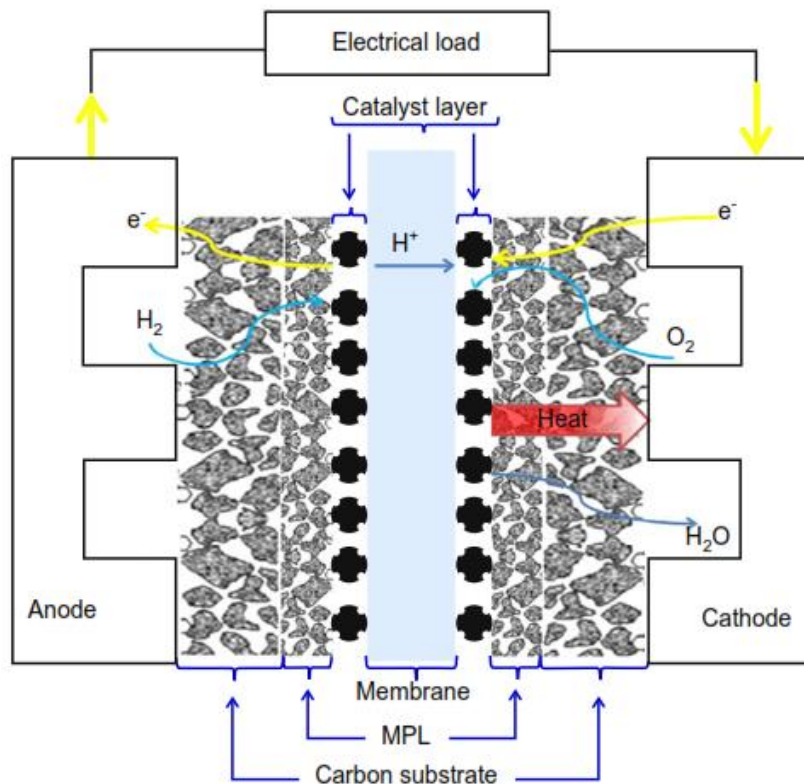


در کاتد اکسیژن با الکترون‌هایی که از الکتروود جدا شده‌اند واکنش می‌دهد، و با یون H^+ که از الکترولیت آمده آب تولید می‌کنند [۱]:



با توجه به هر دو واکنش الکترون‌های تولید شده به‌طور پیوسته از آند از میان یک مدار الکتریکی به سمت کاتد حرکت می‌کند. همچنین هم‌زمان یون‌های H^+ از میان الکترولیت عبور می‌کنند شکل ۱-۳ نحوه‌ی انجام این واکنش‌ها را در پیل سوختی نشان می‌دهد. اسید یک سیال با یون‌های H^+ آزاد است، از این رو انتقال و حرکت H^+ در آن به‌خوبی انجام می‌شود. پلیمرها هم می‌توانند یون‌های H^+ متحرک ایجاد کنند. به همین دلیل این مواد غشای مبادله پروتون^۱ (PEM) نامیده می‌شوند [۱].

¹ Proton exchange membranes



شکل ۳-۱- اصول عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری و لایه‌های آن

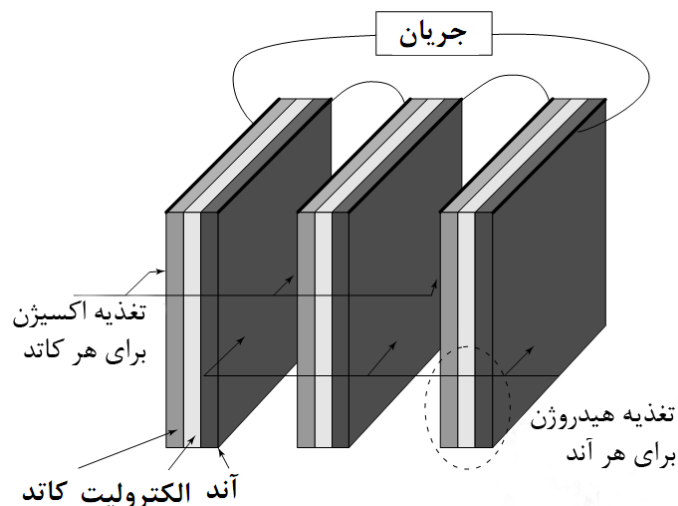
۱-۲-۱ پیل‌های سوختی سری^۱ - صفحه دوقطبی^۲

ولتاژ تولیدی توسط یک پیل سوختی بسیار کم در حدود ۰/۷ ولت است. بنابراین برای تولید ولتاژ مناسب باید تعدادی از پیل‌ها را در حالت سری به هم متصل کنیم. شکل ۴-۱ اتصال سه سلول را در حالت سری نشان می‌دهد. مجموعه‌ای از پیل‌های سوختی که در حالت سری در کنار هم قرار می‌گیرند، را دسته پیل^۳ می‌گویند، شکل ۵-۱ (الف) دسته پیل را نشان می‌دهد [۱].

¹ series

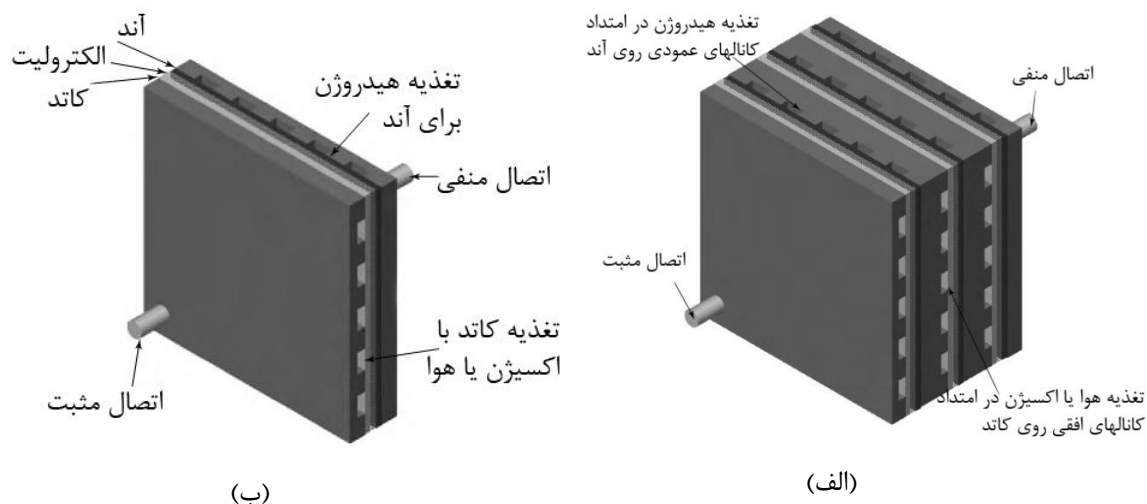
² Bipolar Plate

³ Stack



شکل ۱-۴- اتصال ساده سلول‌ها در حالت سری [۱]

مشکلی که در این نوع حالت قرارگیری است این است که در این حالت الکترون‌ها مجبور به حرکت از میان مقطع هر الکتروود هستند. روش بهتر برای اتصال سلول‌ها استفاده از صفحه دوقطبی است. این صفحه سطح هر کاتد را به آنود سلول بعدی متصل می‌کند. همچنین هم‌زمان به صورت وسیله‌ای برای ورود اکسیژن به کاتد و سوخت گاز به آنود به کار می‌رود. شکل ۱-۵ صفحه دوقطبی و کانال‌های تغذیه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵- (الف) دسته پیل (ب) سلول تک با مسیرهای تغذیه کاتد و آنود [۱]

۲-۲-۱ انواع پیل سوختی

بر اساس نوع الکترولیت به کاررفته، پیل‌های سوختی مختلفی وجود دارد. در حال حاضر شش نوع مختلف از پیل‌های سوختی وجود دارد که اطلاعات آن در جدول ۱-۱ آورده شده است [1].

جدول ۱-۱- انواع مختلف پیل‌های سوختی [۱]

نوع پیل سوختی	یون‌های متحرک	دمای کارکرد (°C)	کاربردها
قلیایی	OH^-	۵۰-۲۰۰	وسایل حمل‌ونقل فضایی (آپولو- شاتل)
غشای مبادله پروتون	H^+	۳۰-۱۰۰	وسایل نقلیه و سیستم‌های کوچک CHP
متیل الکل مستقیم	H^+	۲۰-۹۰	سیستم‌های الکترونیک قابل حمل با قدرت کم و زمان طولانی
اسیدفسفوریک	H^+	۲۲۰	برای سیستم‌های CHP تا 200KW
کربنات ذوب‌شده	CO_3^{2-}	۶۵۰	برای ظرفیت‌های متوسط و بالا CHP تا MW
اکسید جامد	O^{2-}	۵۰۰-۱۰۰۰	مناسب برای اکثر سیستم‌های CHP از 2KW تا چند MW

۳-۲-۱ پیل سوختی غشای مبادله پروتون (پلیمری)

پیل‌های سوختی غشای مبادله پروتون^۱ اولین بار توسط جنرال الکتریک^۲ در آمریکا در سال ۱۹۶۰ برای استفاده توسط ناسا^۳ در وسایل نقلیه فضایی دارای سرنشین استفاده شد. الکترولیت یک هدایت‌کننده یون پلیمری است، که در دو طرف آن یک الکترود متخلخل قرار گرفته است [۱].

پیل‌های سوختی غشای پلیمری از دو جزء اصلی شامل مجموعه غشا- الکترود و لایه‌های انتشار گاز^۴

^۱ polymer electrolyte membrane fuel cells

^۲ General Electric

^۳ NASA

^۴ Gas-Diffusion Layer (GDL)

تشکیل شده‌اند.

۱-۲-۳-۱ مجموعه غشا-الکتروود

الکتروودها (آند و کاتد)، کاتالیزور و غشای مرکزی باهم مجموعه غشا-الکتروود یک پیل سوختی را تشکیل می‌دهند که به اختصار (MEA^۱) گفته می‌شود. ضخامت الکتروود ۰/۰۳ میلی‌متر است [۱].

- **الکتروود آند:** آند قطب منفی پیل سوختی است و مجموع لایه کاتالیزور^۲ و لایه نفوذ گاز سمت آند را باهم الکتروود آند می‌نامند.
- **الکتروود کاتد:** کاتد قطب مثبت پیل سوختی است و الکتروود کاتد نیز مشابه الکتروود آند شامل لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیزور، که بر روی آن بارگذاری می‌شود است.
- **الکتروولیت:** الکتروولیت یک غشاء نازک از جنس ورق پلیمری انعطاف‌پذیر است. ضخامت غشاء ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر است [۱]. الکتروولیت یون‌های تشکیل شده در سمت آند را از خود عبور داده و مانع عبور الکترون در مدار داخلی از سمت آند به کاتد می‌شود. عبور الکترون و یا هرگونه ماده دیگری از الکتروولیت سبب ایجاد اختلال در فرآیندهای شیمیایی و کاهش راندمان پیل سوختی می‌گردد.

این مجموعه الکتروود غشاء به‌طور سری با استفاده از صفحات دوقطبی به هم متصل می‌شوند.

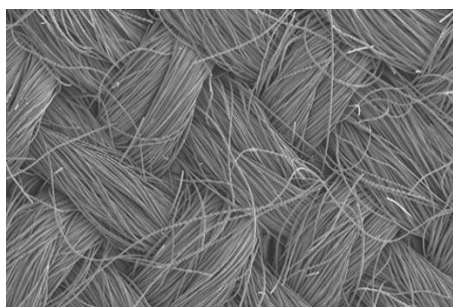
۱-۲-۳-۲ لایه‌های انتشار گاز

لایه‌های انتشار گاز برای افزایش جریان عبوری از غشای مرکزی و در نتیجه افزایش راندمان پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضخامت لایه انتشار گاز بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر است [۱]. لایه‌های انتشار گاز که در هر دو سمت آند و کاتد وجود دارند معمولاً از جنس کاغذ کربنی

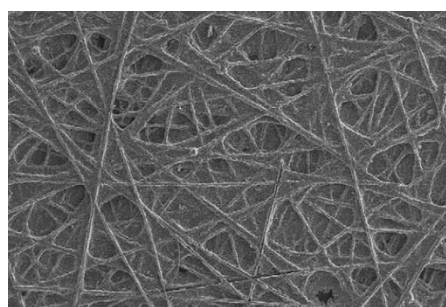
^۱ Membrane electrode assembly

^۲ Catalyst Layer (CL)

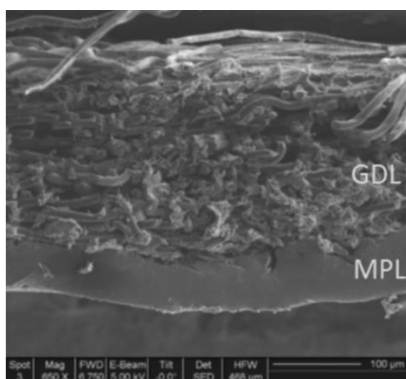
متخلخل^۱ و یا پارچه‌های کربنی^۲ می‌باشند. لایه انتشار گاز می‌تواند به صورت تک لایه و دولایه باشد، که در حالت دولایه، لایه متخلخل میکرو^۳ به آن اضافه می‌شود. لایه متخلخل میکرو بسیار نازک است و با پوشش دهی لایه متخلخل بستر خود (کاغذ یا پارچه کربن) با مخلوط کربن سیاه و PTFE ساخته می‌شود. شکل ۱-۶ اسکن الکترومغناطیسی لایه انتشار گاز و لایه متخلخل میکرو را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱-۶- لایه‌های انتشار گاز از جنس (الف) کاغذ کربنی [۲] (ب) پارچه کربنی [۲] (ج) لایه انتشار گاز و لایه متخلخل میکرو [۳]

به‌طور کلی لایه‌های انتشار گاز می‌بایست از موادی ساخته شوند که قابلیت هدایت الکترون را داشته باشند. علاوه بر این، ماهیت متخلخل بودن لایه‌های انتشار گاز سبب می‌شود تا واکنش‌گرها چه در سمت آند و چه در سمت کاتد به‌طور کامل و مؤثر بر روی کل سطح لایه کاتالیزور مجموعه غشا-الکتروود انتشار گردند. افزایش سطح برخورد واکنشگرها با لایه کاتالیزور، افزایش تعداد الکترون‌های

¹ Porous Carbon Papers

² Carbon Cloths

³ Micro Porous Layer (MPL)

تولیدی را به همراه دارد. همان‌طور که بیان شد افزایش تعداد الکترون به معنی افزایش جریان تولیدی و در نتیجه افزایش راندمان پیل سوختی است.

الکترولیت‌های پلیمری در دماهای پایین کار می‌کنند که این ویژگی باعث می‌شود پیل سوختی بتواند به سرعت شروع به کار کند. مزیت دیگر این نوع پیل سوختی ضخامت کم آن، در نتیجه فضای مورد نیاز کم است. مزیت دیگر این است که در معرض تقابل سوخت قرار نمی‌گیرد و در هر موقعیتی می‌تواند کار کند که این به این معنی است که این نوع از پیل‌های سوختی مخصوصاً برای استفاده در وسایل نقلیه مناسب هستند [۱].

در یک پیل سوختی غشای مبادله پروتون جنبه‌های زیر مهم است [۱]:

- الکترولیت
- ساختار الکتروود و کاتالیزور
- رفتار آب
- روش خنک کردن پیل سوختی
- روش اتصال سلول‌ها در حالت سری، صفحات دوقطبی در روش‌های متفاوتی طراحی می‌شوند.
- فشار کاری پیل سوختی
- واکنش‌دهنده‌های مورد استفاده، به عنوان مثال هیدروژن خالص تنها سوخت مورد استفاده نیست و همچنین اکسیژن نیز می‌تواند به جای هوا برای انجام واکنش استفاده شود.

در میان موارد ذکر شده در بالا یکی از مهم‌ترین جنبه‌ها، بررسی رفتار آب است. همان‌طور که ذکر شد در حین انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی آب به عنوان محصول جانبی در پیل سوختی تولید می‌شود، که آب تولیدی باعث کاهش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود. با بهبود مدیریت آب در پیل‌های سوختی غشای پلیمری می‌توان عملکرد آن‌ها را به‌طور چشم‌گیری بهبود بخشید. و به

توسعه و گسترش آنها به عنوان یک منبع تولید انرژی تجدید پذیر و پاک، کمک کرد. در تحقیقاتی اخیر که در مورد پیل سوختی انجام گرفته، مشاهده می شود که پیل سوختی غشای پلیمری می تواند یکی از امیدوارکننده ترین منابع تولید قدرت در وسایل حمل و نقل باشد. در دو دهه گذشته، تحقیقات زیادی پیرامون موضوع، مدیریت آب در پیل های سوختی غشای پلیمری انجام شده است، که در فصل بعدی مروری بر این تحقیقات خواهیم داشت.

۲ مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱ مقدمه

از آنجاکه امروزه بحث مدیریت آب یک موضوع مهم و کلیدی در دنیای پیل‌های سوختی است، تحقیقات وسیعی پیرامون این موضوع در حال انجام است. در این قسمت تحقیقات پیشین صورت گرفته در مورد پیل‌های سوختی غشای مبادله پروتون مورد بررسی قرار می‌گیرد. که این بررسی‌ها می‌تواند شامل شبیه‌سازی‌های عددی و بررسی‌های تجربی باشد. شبیه‌سازی عددی و تجربی پیل سوختی غشای مبادله پروتون راهی برای پیش‌بینی عملکرد سلول و وسیله‌ای برای مطالعه انتقال در لایه‌های مختلف این نوع پیل سوختی محسوب می‌شود. در بررسی‌های صورت گرفته فرضیات مختلفی شامل حالت‌پایا و گذرا، یک‌بعدی و چندبعدی، تک فاز و دو فاز و ماکروسکوپی و میکروسکوپی مشاهده می‌شود. علاوه بر این مدل‌سازی می‌تواند شامل یک جزء از پیل سوختی یا شامل یک مجموعه پیل سوختی (دسته پیل) باشد [۴].

۲-۲ مدل‌های عددی ماکروسکوپی

در بررسی‌های عددی مدل‌ها تک فاز و دو فاز در نظر گرفته می‌شوند. در مدل جریان تک فاز فرض بر این است که گاز در پیل سوختی یک گاز ایده آل است. در جریان تک فاز اثر حضور آب مایع در سلول در نظر گرفته نمی‌شود و رطوبت ورودی باید به‌گونه‌ای باشد که چگالش اتفاق نیفتد [۵]. فولر و نیومن^۱ [۶] یک مدل شبه دوبرعدی ریاضی برای بررسی مدیریت آب، حرارت و سوخت در پیل سوختی غشای مبادله پروتون بیان کردند. مدل از قسمت‌های جداگانه الکتروود غشا با فرض یک‌لایه انتشار گاز بسیار نازک در نظر گرفته شده بود و از وجود فاز مایع صرف‌نظر شده بود. مدل نگوین و وایت^۲ [۷] که در آن به بررسی انتقال حرارت و آب پرداخته شده است مشابه مدل فولر و نیومن [۶] است و لایه کاتالیزور به صورت یک‌لایه میانی مدل شده است. در این مدل‌ها جریان گاز با فرض اینکه هیچ افت فشاری نداریم مدل شده است.

¹ Fuller and Newman

² Nguyen and White

بررسی انتقال آب در پیل سوختی غشای پلیمری خود می‌تواند به صورت دو فاز باشد. پدیده آب‌گرفتگی یک پدیده معروف و مهم در نحوه‌ی عملکرد پیل سوختی غشای مبادله پروتون است. بنابراین درک انتقال دو فاز در کاتد پیل سوختی غشای پلیمری و تأثیر آن‌ها بر کارکرد پیل سوختی ضروری است [۴]. در طی سال‌های اخیر محققان به‌طور گسترده از روش‌های عددی و تجربی برای بررسی جریان دوفازی انتقال آب و پدیده فلودینگ در پیل سوختی غشای پلیمری استفاده کرده‌اند، در ادامه قسمتی از آن‌ها بیان می‌شود.

هی و همکارانش^۱ [۸] یک مدل دوبعدی دوفازی برای بررسی اثرات آب مایع و اثر انتقال آن روی عملکرد کاتد پیل سوختی ارائه دادند، که در آن انتقال آب مایع از لایه انتشار گاز کاملاً آب‌گریز توسط نیروی موئینگی انجام می‌شود. در این بررسی لایه کاتالیزور به صورت یک شرط مرزی اعمال شده بود. بنابراین تولید آب در مرز مشترک لایه کاتالیزور و لایه انتشار گاز انجام می‌شود. پس از آن‌ها برنینگ و همکارانش [۹] از مدل سه‌بعدی برای مطالعه انتقال آب مایع در لایه متخلخل کاتد استفاده کردند. چانگ^۲ و چن^۳ [۱۰] در سال ۲۰۰۶ با استفاده از یک مدل دوفازی یک‌بعدی در حالت پایا با استفاده از مدل مخلوط چند فازی به بررسی پدیده انتقال در لایه انتشار گاز کاتد و تأثیر آن بر روی عملکرد یک پیل سوختی غشای مبادله پروتون پرداختند. در این بررسی مخلوط گازها به صورت گاز کامل فرض شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که آب مایع تولیدی به‌طور چشم‌گیری می‌تواند باعث کاهش ضریب تخلخل مؤثر لایه انتشار گاز شود، و در نتیجه مانع انتقال اکسیژن در لایه انتشار گاز شود. نرخ حذف آب مایع تولیدشده در اثر حرکت موئینگی با افزایش آب‌گریزی در ابتدا به‌طور آشکاری زیاد شده و سپس به تدریج کاهش می‌یابد.

سونگ^۴ و همکارانش [۱۱] از یک مدل یک‌بعدی دوفازی و نا پایا برای بررسی رفتار انتقال آب در لایه

¹ He *et al.*

² Chang

³ Chen

⁴ Song

انتشار گاز کاند پیل سوختی غشای مبادله پروتون استفاده کردند. دو فاز موجود در این مطالعه فاز آب مایع و فاز بخار آب بود. آن‌ها چهار پارامتر را به ترتیب بر روی توزیع اشباع آب مایع در لایه انتشار گاز مورد بررسی قرار دادند: اشباع آب مایع در مرز مشترک لایه انتشار گاز و کانال‌های جریان، نسبت آب مایع به کل آب موجود در مرز مشترک لایه انتشار گاز و لایه کاتالیزور، چگالی جریان و زاویه تماس یا خیسگی. همچنین زمان لازم برای اینکه اشباع آب مایع به حالت پایا برسد و اشباع آب مایع در مرز مشترک بین لایه انتشار گاز و لایه کاتالیزور به صورت تابعی از چهار پارامتر بالا رسم شده‌اند. در این بررسی‌ها آن‌ها به این موضوع پی بردند که افزایش هر کدام از سه پارامتر اول باعث کاهش زمان لازم برای رسیدن اشباع آب مایع به حالت پایا می‌شود و نیز باعث افزایش اشباع آب در مرز مشترک بین لایه انتشار گاز و لایه کاتالیزور می‌شود.

در سال ۲۰۰۸ نیز چن و چانگ [۱۲] با استفاده از مدل پیشین خود [۱۰] به بررسی انتقال با گرادیان تخلخل مختلف در لایه انتشار گاز کاند پیل سوختی غشای پلیمری پرداختند. آن‌ها این گرادیان تخلخل را با اضافه کردن لایه متخلخل میکرو با درصد تخلخل متفاوت بر روی لایه کاتالیزور ایجاد کردند. نتایج نشان داد که اختلاف در تخلخل باعث بهبود نرخ حذف آب مایع می‌شود. همچنین انتقال اکسیژن به لایه انتشار گاز تسهیل پیدا می‌کند.

۲-۳ مدل‌های میکروسکوپی

تمامی مطالعات انجام شده در قسمت قبل به صورت ماکروسکوپی بود، از اشکالات این روش این است که نمی‌تواند اثر ساختارهای واقعی مربوط به لایه انتشار گاز را مدل کند، در برخی موارد مدل‌های ماکروسکوپی توزیع اشباع آب را در لایه انتشار گاز با اختلاف زیادی تعیین می‌کنند [۱۳].

۲-۳-۱ بررسی به روش مقیاس حفره

روش‌های مقیاس حفره^۱ دیدگاه میکروسکوپی از انتقال آب در لایه انتشار گاز به ما می‌دهد و به دلیل

¹ Pore-scale modes

ضعف روش‌های ماکروسکوپی می‌توان از این روش‌ها که یک ابزار مکمل برای مطالعات آزمایشگاهی می‌باشند استفاده کرد. روش شبکه حفره^۱ و روش شبکه بولتزمن^۲ دو تا از روشهای مقیاس حفره هستند [۱۴].

در روش شبکه حفره، به مطالعه ساختار میکروسکوپی پیچیده محیط متخلخل واقعی لایه انتشار گاز پرداخته می‌شود و محیط متخلخل را به صورت یک شبکه منظم از حفره‌های مکعبی یا کره‌ای مدل می‌کند [۱۳، ۱۴] این مدل فهم بنیادی تری را برای انتقال آب و توزیع آن در لایه انتشار گاز نسبت به مدل‌های ماکروسکوپی ارائه می‌دهد. در این‌جا به نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده با این روش اشاره می‌کنیم:

سینها و وانگ^۳ [۱۵] در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش شبکه حفره رفتار حرکتی انتقال آب مایع و فلودینگ را در لایه انتشار گاز و همچنین نیز پوشش^۴ آب مایع در مرز مشترک لایه انتشار گاز-کانال را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این موضوع پی بردند که کنترل انتقال آب در لایه انتشار گاز توسط نیروی موئینگی صورت می‌گیرد. همچنین آن‌ها ذکر کردند که حرکت آب مایع در لایه انتشار گاز به شکل انگشتی‌های متصل به هم انجام می‌پذیرد و این جریان به تدریج شروع به نفوذ در مسیرهایی با کمترین مقاومت می‌کند. در سال ۲۰۰۹ لی و همکارانش^۵ [۱۶] با استفاده از مدل شبکه حفره به بررسی انتقال آب در لایه انتشار گاز آب‌گریز^۶ پرداختند و اشباع آب، اثرات هندسی و خواص موئینگی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها محیط متخلخل را به صورت یک شبکه منظم از حفره‌های مکعبی در نظر گرفتند.

همان‌طور که در فصل یک بیان شد، از آنجاکه لایه انتشار گاز در پیل‌های واقعی از جنس کاغذ کربن یا پارچه کربنی است، و بافت‌های سازنده آن به صورت تصادفی در کنار هم قرار گرفته‌اند، به دلیل

¹ Pore-network model

² Lattice Boltzmann method (LBM)

³ Wang

⁴ Coverge

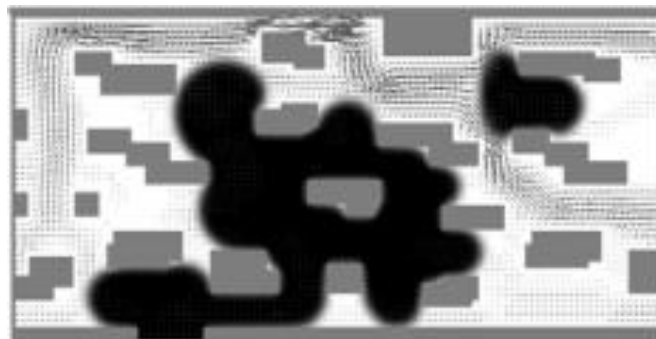
⁵ Lee *et al.*

⁶ Hydrophobic

استفاده از ساختار منظم حفره‌ها در این روش، روش شبکه حفره نمی‌تواند یک‌لایه انتشار گاز با ساختار میکروسکوپی واقعی را مدل کند.

روش شبکه بولتزن یکی دیگر از روش‌های مقیاس حفره است، که این روش می‌تواند انتقال جریان و جرم را بر اساس ساختار واقعی لایه انتشار گاز شبیه‌سازی کند [۱۷]. در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزن به‌عنوان پرکاربردترین جایگزین معادله نویر استوکس شناخته‌شده است در این روش، جریان به‌صورت مجموعه‌ای از ذرات ساختگی در نظر گرفته‌شده که روی گره‌های ساختار شبکه قرار دارند که بین آن‌ها برخوردهایی صورت می‌گیرد که این برخوردها بر اساس یک تابع توزیع سرعت انجام می‌شود [۱۸].

تاب و همکارانش^۱ [۱۹] با استفاده از روش شبکه بولتزن در حالت دوفازی دوبعدی به بررسی لایه انتشار گاز و کانال گاز کاتد پیل سوختی غشای مبادله پروتون پرداختند. آن‌ها اثر عدد موئینگی در رفتار آب مایع، اثر سرعت ورودی در توزیع آب مایع، اثر قابلیت خیسی کانال و تأثیر پارامتر زمان روی رفتار آب مایع را نیز بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که قابلیت خیسی کانال گاز در انتقال دو فاز در پیل سوختی مهم است. همچنین آن‌ها ذکر کردند که در سرعت‌های پایین حرکت آب مایع، رژیم جریان، رژیم حرکت موئینگی انگشتی است. هندسه مورد مطالعه توسط تاب و همکارانش در شکل ۱-۲ ارائه شده است.



شکل ۱-۲ هندسه مربوط به مطالعه تاب و همکارانش [۱۹]

¹ Tabe *et al.*

در سال ۲۰۱۰ هاوو و چن^۱ [۱۴] با استفاده از روش شبکه بولتزنم در حالت دوفازی سه‌بعدی به بررسی رفتار دینامیکی آب مایع، اثر توزیع قابلیت خیسی روی انتقال آب مایع و اثر زاویه تماس در لایه انتشار گاز پیل سوختی غشای مبادله پروتون پرداختند. نتایج نشان داد که قابلیت خیسی نقش مهم و اساسی در توزیع اشباع آب دارد و با افزایش زاویه تماس زمان لازم برای رسیدن آب به خروجی کاهش می‌یابد همچنین آن‌ها بیان کردند که با قرار دادن مسیرهای آب‌دوست در لایه انتشار گاز باعث کاهش اشباع آب می‌شوند. چن و همکارانش^۲ [۱۳] از روش شبکه بولتزنم برای بررسی جریان سیال در مقیاس حفره در لایه انتشار گاز و کاتالیزور یک پیل سوختی غشای پلیمری استفاده کردند. لایه انتشار گاز بر مبنای کاغذ کربن است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار مقیاس حفره تأثیر زیادی روی جریان سیال، به‌ویژه توزیع انتقال جرم و چگالی جریان محلی دارد. همچنین بیان کردند که مسیرهای باریک‌تر می‌توانند زمان حذف آب مایع را کاهش دهند و با افزایش زاویه تماس زمان حذف آب مایع افزایش می‌یابد.

لیو و همکارانش^۳ [۲۰] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش شبکه بولتزنم به بررسی جریان آب مایع در یک محیط متخلخل به‌صورت دوفازی و دوبعدی پرداختند. در این مدل‌سازی اثر عدد موئینگی، نسبت گرانشی، زاویه تماس سطح و عدد باند بررسی شده است. در این مطالعه سه رژیم مختلف جریان قابل‌شناسایی هستند و وابستگی زیادی به نسبت گرانشی، عدد موئینگی و عدد باند دارند. در نسبت‌های گرانشی پایین، الگوی انگشتی نازک است و فضای کمی از حفره‌ها را اشغال می‌کند و با افزایش این نسبت الگوهای انگشتی تقریباً بیشتر فضای حفره را اشغال می‌کند. کیم و همکارانش^۴ [۲۱] از روش شبکه بولتزنم برای بررسی انتقال آب مایع در لایه متخلخل میکرو و لایه انتشار گاز پیل سوختی غشای پلیمری استفاده کردند. ناحیه محاسباتی آن‌ها کاملاً از ذرات دایروی و

¹ Hao and Cheng

² Chen *et al.*

³ Liu *et al.*

⁴ Kim *et al.*

مربعی که به صورت تصادفی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند ایجاد شده است. آن‌ها از یک مدل دوفازی برای مدل‌سازی جریان استفاده کردند. شرایط مدل‌سازی دقیقاً مطابق با انتقال واقعی آب در پیل سوختی غشای پلیمری است و اعداد بی‌استفاده شده برای مدل‌سازی دقیق با اعداد بی‌بعد در پیل سوختی غشای پلیمری واقعی تنظیم شده است. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه متخلخل میکرو، محتوای آب مایع در لایه متخلخل کاهش می‌یابد، همچنین حالت توزیع آب پایا سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد و حذف سریع‌تر آب مایع از لایه متخلخل به کانال گاز صورت می‌گیرد. که این نتایج نشان‌دهنده بهبود مدیریت آب در پیل‌های سوختی غشای پلیمری است.

۲-۴ بررسی‌های آزمایشگاهی

این قسمت به بررسی چند مطالعه آزمایشگاهی انجام شده در این حوزه پرداخته شده است. برای بررسی اثربخش و مفید بودن طرح‌های مدیریت آب روش‌هایی که قادر به آشکار کردن، توزیع و انتقال آب در پیل سوختی غشای پلیمری هستند می‌توانند به کار گرفته شوند. این تکنیک‌های آشکارسازی خود به دو صورت نابه‌جا^۱ و درجا^۲ صورت می‌گیرد. که عمدتاً شامل روش‌های مشاهده مستقیم نوری^۳، عکس‌برداری نوترونی^۴ و فلورسانس میکروسکوپی^۵ می‌باشند. در میان این تکنیک‌ها روش مشاهده مستقیم نوری به دلیل فراهم آوردن با جزئیات بالا در مورد پدیده انتقال آب در کانال گاز، لایه انتشار گاز و لایه کاتالیزور مزیت و برتری نسبت به سایر روش‌ها دارد [۲۲].

۲-۴-۱ تکنیک‌های اندازه‌گیری و آشکارسازی نابه‌جا

تکنیک آشکارسازی نابه‌جا در پیل سوختی غشای پلیمری بدین معنا است که پدیده آب‌گرفتگی و انتقال آب را در محیطی ساختگی و غیرمعمول و خارج از شرایط کارکرد واقعی پیل سوختی بررسی

¹ Ex Situ

² In Situ

³ Direct visualization

⁴ Neutron imaging

⁵ Fluorescence microscopy

کنیم در حقیقت پیل سوختی تحت شرایط کارکرد واقعی خود نیست.

به دلیل طبیعت تیره مواد سازنده لایه انتشار گاز، لایه کاتالیزور و مواد سازنده صفحه دوقطبی بررسی پدیده انتقال آب و رفتار دینامیکی آب مایع در پیل سوختی یک پدیده چالش برانگیز است [۲۲]. به هر حال تصویربرداری مستقیم و نوری تنها زمانی امکان پذیر است که مواد سازنده ی پیل سوختی با مواد شفاف^۱ جایگزین شود [۲].

جانگ هوو همکارانش^۲ [۲۳] برای بررسی انتقال آب در لایه انتشار گاز آب گریز پیل سوختی غشای پلیمری از یک مدل مشابه با لایه های پیل سوختی استفاده کردند. در این آزمایش آن ها از سیال خیس نشونده ای^۳ هم چگالی با آب مایع، که نقش آب در پیل سوختی را ایفا می کند، استفاده کردند. آن ها با عکس برداری مستقیم از سلول شفاف ساخته شده مشاهده کردند که انتقال سیال خیس نشونده قویاً به وسیله ی مکانیزم تهاجم- نفوذ^۴ با موئینگی فعال^۵ صورت می گیرد. همچنین مشاهدات آن ها نشان داد که تشابه بسیار زیادی بین توزیع سیال خیس نشونده در آزمایش و توزیع آب در لایه انتشار گاز مدل شده توسط شبکه حفره وجود دارد.

یانگ و همکارانش^۶ [۲۴] مشابه زانگ و همکارانش^۷ [۲۵] با بررسی پیل سوختی شفاف، مشاهده کردند که آب خارج شده از لایه انتشار گاز به صورت قطره های مجزا با قطرهای متفاوت بوده و در محل های خاصی از سطح لایه انتشار گاز قرار گرفته اند. همچنین لیستر و همکارانش^۸ [۲۶] از روش جدید استفاده از فلورسانس میکروسکوپی^۹ برای دیدن رفتار جریان آب و توزیع آن در لایه انتشار گاز استفاده کردند. آن ها بیان کردند که انتقال آب بر اساس فرضیه کلی پذیرفته شده شاخه زدن صورت

¹ Transparent

² Jung Ho *et al.*

³ Non non-wetting fluid

⁴ Invasion-Percolation

⁵ Active capillary

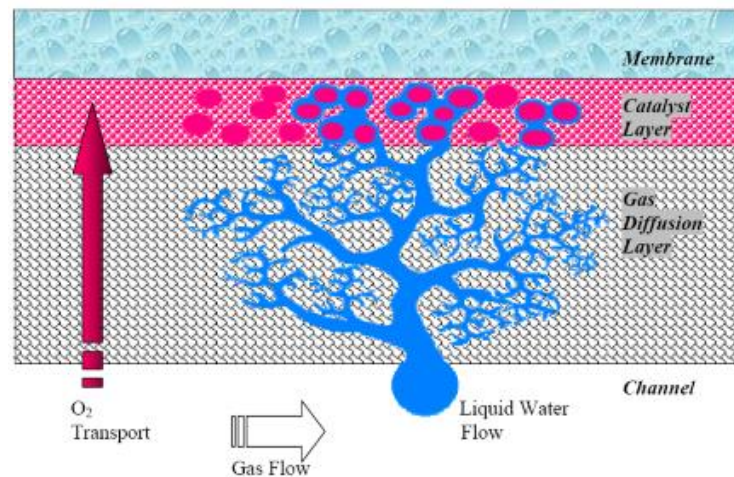
⁶ Yang *et al.*

⁷ Zhang *et al.*

⁸ Litster *et al.*

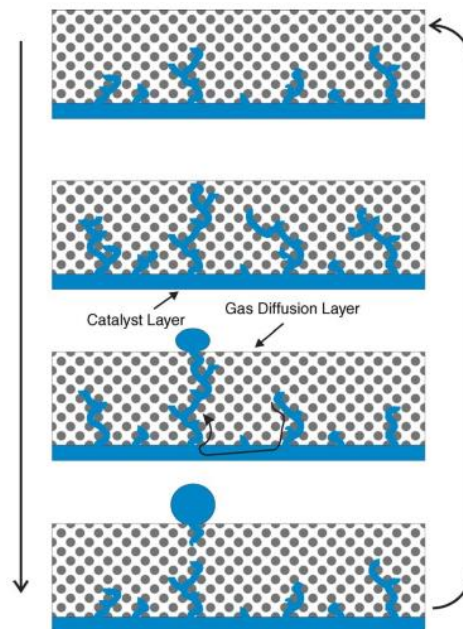
⁹ Fluorescence microscopy

نمی‌گیرد. مشاهدات فیزیکی آن‌ها نشان داد که آب از طریق یک درخت موئینگی همگرا (درخت وارونه^۱) که در کارها و مدل‌های قبلی [۲۷] نشان داده شده است انتقال پیدا نمی‌کند. شماتیک درخت وارونه در شکل ۲-۲ ارائه شده است.



شکل ۲-۲- شماتیک درخت موئینگی همگرا (درخت وارونه) [۲۷]

در عوض انتقال توسط انگشتی‌ها و کانال ساختن‌ها^۲ صورت می‌گیرد. آن‌ها یک شماتیک ایده آل جدید برای انتقال آب در لایه انتشار گاز آب‌گریز ارائه دادند. شکل ۳-۲ این شکاتیک را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲- شماتیک ایده‌آل، انتقال آب در لایه انتشار گاز، ارائه شده توسط لیستر و همکارانش [۲۶]

¹ Upside-down tree
² Channeling

لیو و همکاران^۱ [۲۸] از یک دوربین CCD و لایه انتشار گازهای تجاری که به صورت پارچه و کاغذ کربنی موجود است، برای مشاهده پدیده انتقال آب، در لایه انتشار گازهای مختلف با لایه متخلخل میکرو و بدون آن استفاده کردند. آن‌ها مشابه با تحقیقات پیشین مشاهده کردند که انگشتی‌های نفوذکننده‌ی آب در محل‌های خاصی از لایه انتشار گاز ایجاد شده و دائماً انتقال آب از همان مسیرها صورت می‌گیرد. همچنین مشاهدات آن‌ها نشان داد که انتقال آب در لایه انتشار گاز همراه با لایه متخلخل میکرو در یک سمت، نسبت به حالتی که در دو طرف لایه انتشار گاز لایه متخلخل میکرو داریم، بهبود پیدا می‌کند.

۲-۴-۲ تکنیک اندازه‌گیری و آشکارسازی درجا

از آنجاکه در تکنیک آشکارسازی نابه جا پیل سوختی را در شرایط کارکرد واقعی بررسی نمی‌کنند، بعضی از محققان از تکنیک آشکارسازی درجا برای بررسی پیل‌های سوختی غشای پلیمری در شرایط کارکرد واقعی استفاده می‌کنند. در ادامه چند روش که از این تکنیک بهره می‌برند توضیح داده خواهد شد.

پکلا و همکارانش^۲ [۲۹] نیز با استفاده از تکنیک عکس‌برداری نوترونی^۳، توزیع آب و انتقال آن را در کانال جریان گاز و لایه انتشار گاز پیل سوختی غشای مبادله پروتون بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در چندین شرایط کاری مختلف آب در محل‌های خاصی از لایه انتشار گاز انباشته می‌شود. اخیراً هیچنر و همکارانش^۴ [۳۰] با عکس‌برداری نوترون با وضوح بالا محتوای آب در غشای پیل سوختی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که توزیع محتوای آب در سطح مقطع سلول سوختی پیچیده بوده و تفاوت زیادی با نتایج بدست آمده از مدل‌های ماکروسکوپی دارد.

¹ Liu *et al.*

² Pekula *et al.*

³ Neutron imaging technique

⁴ Hickner *et al.*

سینها و همکارانش^۱ [۳۱] با استفاده از پرتونگاری با اشعه ایکس^۲ توزیع آب در لایه انتشار گاز را در هنگام خارج شدن آب بررسی کردند و نشان دادند که توزیع آب در لایه انتشار گاز به صورت غیریکنواخت و به صورت انگشتی‌های بی‌نظم است. هارتنیگ و همکارانش^۳ [۳۲] با استفاده از عکس‌برداری اشعه ایکس به این موضوع پی بردند که توزیع آب در لایه انتشار گاز به شدت به نرخ آب تولیدی بستگی دارد. همچنین آن‌ها ذکر کردند که انتقال میکروسکوپی آب در لایه انتشار گاز ممکن است نتیجه انعقاد سری قطرات کوچک آب که منجر به تشکیل خوشه‌ی آب می‌شود باشد.

جایوو همکارانش^۴ [۳۳] با استفاده از تکنیک آشکارسازی میکروسکوپ هم کانون^۵ و اسکن لیزری رفتار و انتقال آب مایع در لایه انتشار گاز را بررسی کردند. آن‌ها برای آشکارسازی آب رنگ دار شده‌ی راه، در چندین لایه انتشار گاز مختلف پمپ کردند و این پدیده را بررسی کردند. آن‌ها به این موضوع پی بردند که جریان آب در تمامی نمونه لایه‌های انتشار گاز ناپایدار و مشابه جریان‌های عمودی^۶، معمولی است که در خاک‌های آب‌گریز مشاهده می‌شود.

در سال ۲۰۰۲ ژینگانگ و کافمن^۷ به بررسی عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری با اضافه کردن لایه متخلخل میکرو به لایه انتشار گاز، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزودن لایه متخلخل میکرو توانایی لایه انتشار گاز برای مدیریت آب به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است [۳۴]. کیتاهارا و همکارانش^۸ در سال ۲۰۱۰ به بررسی تجربی تأثیر پارامترهای طراحی لایه متخلخل میکرو، بر روی عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری پرداختند. آن‌ها بیان کردند که افزایش ضخامت لایه متخلخل میکرو تأثیر مثبت بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری دارد. اما در ضخامت‌های بالا لایه متخلخل میکرو، در فرآیند انتقال اکسیژن به الکتروود اختلال ایجاد می‌شود [۳۵].

¹ Sinha *et al.*

² X-ray micro-tomography

³ Hartnig *et al.*

⁴ Gao *et al.*

⁵ Confocal microscope

⁶ Column flow

⁷ Zhigang and kaufman

⁸ Kitahara *et al.*

۲-۵ مطالعه حاضر

با توجه به تحقیقات پیشین می‌توان به این موضوع پی برد که بحث مدیریت آب در پیل سوختی غشای پلیمری یک موضوع چالش‌برانگیز و کاربردی است. کارهای زیادی تاکنون در این حوزه صورت گرفته است. مطالعاتی که با استفاده از عکس‌برداری صورت گرفته، برای مشاهده توزیع آب در پیل سوختی غشای پلیمری موفق بوده و اطلاعات مفیدی برای فهم انتقال آب در لایه انتشار گاز فراهم کرده است. اما در بسیاری از این مطالعات به دلیل این که لایه انتشار گاز ماهیت تیره، تاریک و پیچیده دارد و تمام نمونه‌های واقعی لایه انتشار گاز در مقیاس میکروسکوپی هستند، امکان بررسی در عمق لایه انتشار گاز و همچنین بررسی دقیق انگشتی‌های ایجاد شده فراهم نیست. به همین دلیل در این مطالعه با استفاده از یک مدل با لایه انتشار گاز شفاف، در مقیاس ماکروسکوپی به بررسی دقیق رفتار فیزیکی انگشتی‌های ایجاد شده پرداخته و اثرات وجود لایه متخلخل میکرو را بر مکانیزم رشد و توسعه انگشتی‌ها بررسی شده است. لایه متخلخل میکرو در دو حالت زیر در نظر گرفته شده است:

- با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی‌متر
- با لایه متخلخل میکرو به ضخامت دو سانتی‌متر

ما در این مطالعه از یک روش آشکارسازی نوری برای بررسی فلودینگ آب در پیل سوختی غشای پلیمری استفاده می‌کنیم. این مدل دوفازی، امکان بررسی دقیق هر کدام از انگشتی‌های ایجاد شده و شاخه‌های آن‌را به طور جداگانه به ما می‌دهد. در تحقیقات پیشین صورت گرفته تقریباً هیچ کدام از بررسی‌های آزمایشگاهی به بررسی انگشتی‌های ایجاد شده و تحلیل رفتار حرکتی آن‌ها در لایه انتشار گاز نمی‌پردازد. بنابراین در این مطالعه سعی شده است تا حد امکان به بررسی دقیق رفتار حرکتی هر کدام از این انگشتی‌ها به طور جداگانه بپردازیم و تأثیر نحوه حرکت هر انگشتی در لایه انتشار گاز را بر عملکرد پیل سوختی را بررسی کنیم.

در فصل آینده تجهیزات و مواد آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر به طور کامل معرفی

خواهند شد. ست‌آپ آزمایشگاهی و نکات مربوط به آن در بخشی جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نحوه‌ی ساخت سیال مورد استفاده در آزمایش و روش انجام آزمایش گزارش شده است. در فصل چهارم به بررسی و تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در هر سه حالت مختلف پرداخته و انتهای فصل چهارم به مقایسه نتایج بدست آمده با یکدیگر می‌پردازد. در فصل آخر نیز به بیان خلاصه نتایج این مطالعه و علل آن پرداخته شده است.

۳ لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی

۳-۱ مقدمه

این مطالعه به بررسی تجربی فلودینگ آب در پیل سوختی غشای پلیمری می‌پردازد. مطالعه حاضر از جمله روش‌های آشکارسازی نوری با تکنیک آشکارسازی نابه‌جا است. در واقع از یک مدل، برای ایجاد شرایطی مشابه با لایه‌های پیل سوختی غشای پلیمری، در دو حالت با و بدون لایه متخلخل میکرو استفاده کرده‌ایم. بنابراین قبل از بررسی هر عاملی باید به شرح لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی مورداستفاده پرداخت. بدین منظور ابتدا به معرفی تجهیزات مورداستفاده، مواد و سپس سیال ساخته‌شده در آزمایش خواهیم پرداخت و علل استفاده از این مواد را به‌طور مختصر شرح خواهیم داد.

۳-۲ تجهیزات مورداستفاده در آزمایش

۳-۲-۱ پمپ سرنگ^۱

در این آزمایش‌ها از یک دستگاه پمپ تزریق سرنگی JMS مدل SP-500 که در شکل ۳-۱ نشان داده‌شده، استفاده شده است. دستگاه پمپ سرنگی جهت به‌کارگیری انواع سرنگ‌ها طراحی شده‌است. این دستگاه با توجه به ابعاد سرنگ استفاده شده، قابلیت تزریق مقدار معینی محلول با سرعت‌های مختلف را دارا می‌باشد. به‌طور کلی این سیستم در تمامی مواردی که نیاز به تزریق کم (میلی‌لیتر بر ساعت) و کنترل شده محلول می‌باشد، کاربرد دارد. استفاده از این پمپ در مصارف پزشکی بسیار متداول و شناخته‌شده است. علاوه بر این، از این دستگاه می‌توان در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به‌منظور تحقیق بر روی موضوعات مختلف از جمله نفت، گاز، مواد شیمیایی، رنگ‌ها، آزمایش‌ها مرتبط با تشکیل و تزریق قطره و در اکثر آزمایش‌های انجام‌شده برای تزریق سیال در پیل‌های سوختی مدل شده استفاده کرد. پمپ تزریق سرنگ JMS مدل SP-500 ساخت کشور ژاپن بوده و قابلیت استفاده با کلیه سرنگ‌های داخلی با سایزهای مختلف (۱۰، ۲۰، ۴۰، ۳۰ و ۵۰ سی‌سی) را دارد. این پمپ توانایی تامین دبی ۳۰۰ - ۰/۱ میلی‌لیتر بر ساعت را دارد. در این مطالعه ما از سرنگ‌های ۵۰ سی‌سی

^۱ Syringe pump

پلاستیکی برای تزریق سیال با دبی ۴۰ میلی لیتر بر ساعت استفاده کرده‌ایم.



شکل ۳-۱- پمپ سرنگ jms

۲-۲-۳ ترازو با دقت بالا

تمام نمونه برداری‌ها توسط ترازوی شرکت Sartorius مدل ED224S با دقت ۰/۱ میلی‌گرم انجام گرفته‌شده است. برای اندازه‌گیری دقیق مقدار رنگ پودری مورد استفاده برای رنگ دار کردن سیال خیس نشونده و همچنین وزن کردن دقیق ظرف پیکنومتر^۱ و سیال خیس نشونده داخل آن از ترازو با دقت بالا استفاده شده است.



شکل ۳-۲- ترازو با دقت بالا Sartorius

¹ pycnometer

۳-۲-۳ همزن هات پلیت^۱

سیال مورد استفاده در مطالعه حاضر از سه جز تشکیل شده است: ماده روغنی، تترا کلرید کربن به عنوان حلال آن و رنگ پودری. برای همگن ساختن ترکیب فوق از همزن استفاده می شود. ما در انجام آزمایش ها از همزن هات پلیت IKA RCT استفاده کرده ایم. این همزن سرعت دورانی ۵۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و دمای ۳۶۰ درجه سانتی گراد را تامین می کند. این همزن با ایجاد میدان مغناطیسی دورانی، قرص مغناطیسی موجود در محلول را می چرخاند. همچنین جهت جلوگیری از تغییرات در چگالی سیال از تنظیم دمای دستگاه خودداری کرده و تمام سیال ها در دمای محیط تهیه شده اند. در این مطالعه از همزن هات پلیت با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه برای حل کردن مخلوط استفاده می کنیم.



شکل ۳-۳- همزن هات پلیت IKA RCT

۴-۲-۳ دوربین و لنز

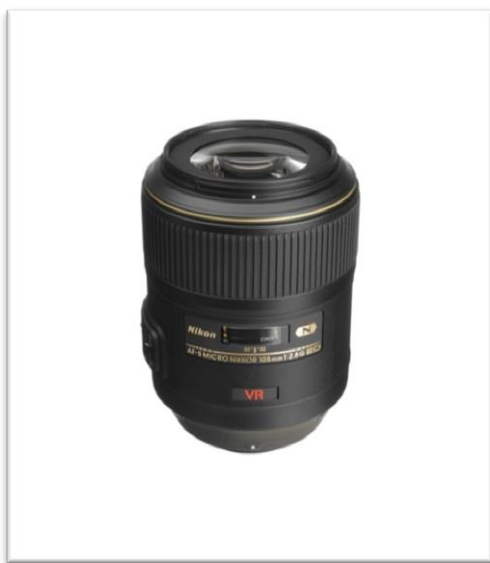
برای بررسی دقیق رفتار حرکتی انگشتی های ایجاد شده در طول زمان تست در فاصله های زمانی معین از ست آپ آزمایش عکس برداری شده است. بزرگ نمایی بالا و از همه مهم تر ثابت بودن موقعیت مکانی دوربین مهم ترین عامل در هنگام عکس برداری می باشد. بدین منظور از یک دوربین پرسرعت (pco.dimax S1) CMOS^۲ استفاده شده است که در بالاترین رزولوشن^۱، توانایی ثبت

¹ Hot plate stirrer

² Complementary metal-oxide-semiconductor

۴۵۰۰ تصویر بر ثانیه را داراست. رزولوشن دوربین از ۲۴۰×۱۶ تا ۱۰۰۸×۱۰۰۸ قابل تغییر است. دوربین در شکل ۳-۴ (الف) نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها از رزولوشن ۱۰۰۸×۱۰۰۸ استفاده شده است. محدوده زمانی نوردهی این دوربین از $۱/۵$ میکروثانیه تا ۴۰ میلی ثانیه است و قابلیت کنترل هوشمند باتری را دارد. این دوربین برای ذخیره تصاویر نیز به حافظه داخلی ۳۶ گیگا بایت مجهز است.

به همراه دوربین از یک لنز Nikon مدل AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED VR برای آزمایش‌ها استفاده شده است. این لنز ماکرو مخصوص عکاسی و فیلم‌برداری از نزدیک^۱ (تا بزرگنمایی ۱:۱) و پرتره^۳ می‌باشد. لنز مذکور این قابلیت را دارد که به هنگام نزدیک شدن دوربین به پدیده‌ی موردنظر، تصویری واضح از آن را در اختیار می‌گذارد. شکل ۳-۴ (ب) لنز مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۴- (الف) دوربین عکس‌برداری PCO (ب) لنز ماکرو nikon

¹ Resolution

² Close up

³ Portrait

۵-۲-۳ دستگاه اندازه‌گیری گرانی (ویسکومتر)

برای محاسبه گرانی سیال موجود در آزمایش از دستگاه ویسکومتر مدل DV-E/LV ساخت شرکت BROOKFIELD استفاده شده است. محدوده مجاز این دستگاه ۱-۲۰۰۰۰۰۰ سنتی پواز (cp) است (البته در صورت وجود تمام اسپیندل‌های مرتبط با دستگاه). در هنگام استفاده از این دستگاه باید توجه داشت که از ظرف مناسب با هر اسپیندل استفاده شود (قطر ظرف بیش از دو برابر قطر اسپیندل نباشد) و دما ثابت نگه داشته شود. شکل ۵-۳ تصویر ویسکومتر و یکی از اسپیندل‌ها همراه با ظرف مورد نیازش را نشان می‌دهد. گرانی سیال ساخته شده مورد استفاده در این مطالعه که توسط این دستگاه اندازه‌گیری شده است در جدول ۴-۳ ارائه شده است.



شکل ۵-۳- ویسکومتر

۶-۲-۳ دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی

نیروی کشش سطحی یکی از مهم‌ترین نیروها و عوامل در تشکیل انگشتی‌ها و پدیده موئینگی است. بدین منظور ما باید اطلاعاتی راجع به کشش سطحی^۱ و بین سطحی^۲ و زاویه تماس^۳ سیال

¹ Surface tension
² Interfacial tension
³ Contact Angel

ساخته شده را داشته باشیم. لازم به ذکر است که روش‌هایی وجود دارد که، می‌توان از طریق آن‌ها با داشتن کشش سطحی هر فاز با هوا مقدار کشش سطحی بین دو فاز سیال را بدست آورد. از جمله این روشها می‌توان به روش آنتونوف^۱ و گریفالکو-گود^۲ اشاره کرد که هر کدام در ادامه مختصراً شرح داده شده‌اند. آقای آنتونوف پیش‌بینی کرد که کشش سطحی بین دو فاز مایع برابر است با اختلاف کشش سطحی هر کدام از دو مایع نسبت به هوا که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_{AB} = \sigma_A - \sigma_B \quad (۱-۳)$$

گریفالکو و گود رابطه‌ای که آقای آنتونوف پیشنهاد داده بود را اصلاح کردند و رابطه‌ی اصلاحی خود را بصورت زیر ارائه کردند:

$$\sigma_{AB} = \sigma_A + \sigma_B - 2\phi\sqrt{\sigma_A\sigma_B} \quad (۲-۳)$$

که ϕ بصورت رابطه‌ای از نسبت حجم مولی دو سیال بیان می‌شود:

$$\phi = \frac{4(\bar{v}_A\bar{v}_B)^{1/3}}{[(\bar{v}_A)^{2/3} + (\bar{v}_B)^{2/3}]} \quad (۳-۳)$$

که \bar{v}_A و \bar{v}_B حجم‌های مولی دو سیال هستند [۳۶].

با توجه به روابط بالا برای محاسبه کشش سطحی بین سیال خیس نشونده و آب، ابتدا کشش سطحی بین سیال خیس نشونده و هوا را توسط دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی موجود در آزمایشگاه آشکار سازی دانشگاه صنعتی شاهرود به روش قطره معلق^۳ اندازه‌گیری کرده، شکل ۳-۶ این دستگاه را نشان می‌دهد. در این روش همانطور که در شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود سیال خیس نشونده به صورت قطره از طریق یک سرنگ به سوزنی با اندازه مشخصی تزریق می‌شود. چگالی هر دو سیال، اندازه قطر سوزن، دما و فشار محیط به نرم‌افزار IFTVision داده می‌شود. مکانیزم دستگاه به این

^۱ Antonoff

^۲ Girifalco-Good

^۳ Pendant drop

صورت است که با استفاده از یک دوربین با وضوح بالا تصاویر قطره معلق را ضبط کرده و مقدار کشش سطحی بین دو فاز را محاسبه می‌کند. در شکل ۳-۷ نمونه‌ای از تصویر قطره سیال خیس نشونده مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۶- دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی

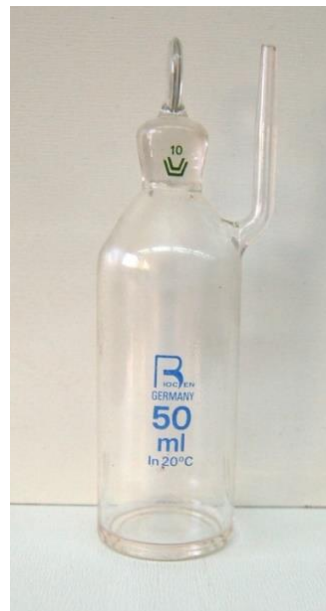
مقدار محاسبه شده کشش سطحی توسط دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی 0.034 نیوتن بر متر است. سپس با استفاده از معادله (۳-۲) کشش سطحی بین سیال خیس نشونده و آب را محاسبه می‌کنیم. مقدار کشش سطحی سیال خیس نشونده نسبت به آب در جدول ۳-۴ ارائه شده است.



شکل ۳-۷- قطره سیال خیس نشونده برای محاسبه کشش سطحی در دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی

۷-۲-۳ پیکنومتر^۱

پیکنومتر یک وسیله یا ابزار آزمایشگاهی شبیه به بالن ژوژه^۲ می باشد که درپوش یا در آن، دارای یک شیار باریک و باز درون خود آن می باشد. شکل ۳-۸ پیکنومتر مورد استفاده در این آزمایش را نشان می دهد. این وسیله برای تعیین دانسیته یا چگالی مایعات به کار می رود. برای اندازه گیری چگالی یک مایع، ابتدا و در مرحله ی اول، جرم پیکنومتر خالی که با آب مقطر شسته شده و سپس خشک شده است، با درپوش آن را با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی بسیار دقیق (ترجیحاً) تا سه یا چهار رقم اعشار بدست می آوریم. در مرحله ی دوم پیکنومتر را پر از آب مقطر می کنند و درپوش آن را می گذارند. وجود شیار باریک تعبیه شده در درپوش سبب می شود که پیکنومتر حجم کاملاً مشخصی در هر مورد داشته باشد. با استفاده از یک دماسنج، دمای محیط را نیز اندازه می گیرند. حال جرم پیکنومتر پر از آب مقطر اندازه گرفته می شود. جرم آب را اندازه گرفته، سپس با استفاده از رابطه ی $\rho = m/v$ ، حجم دقیق پیکنومتر محاسبه می شود.



شکل ۳-۸- پیکنومتر

¹ pycnometer
² Balon joje

در مرحله‌ی سوم پیکنومتر را از مایع مورد نظر پر کرده به طوریکه وقتی در آن را بر روی آن قرار می‌دهیم، مقدار اضافی آن از شیار بیرون بریزد. حال جرم پیکنومتر پُر را به کمک همان ترازوی قبلی بدست می‌آوریم. تفاوت جرم پیکنومتر خالی و پیکنومتر پر، جرم مایع مورد نظر می‌باشد. حجم آن هم که در مرحله‌ی دوم مشخص شد. به کمک رابطه‌ی $\rho = m/v$ و تقسیم کردن مقدار جرم به حجم، چگالی ماده‌ی مورد نظر به دست می‌آید. مقدار محاسبه شده چگالی سیال خیس نشونده با این روش در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

۸-۲-۳ دماسنج دیجیتال

دماسنج دیجیتالی پرتابل^۱ جهت اندازه‌گیری و تست دما بکار می‌رود، این دماسنج دارای یک ورودی برای سنسور دما می‌باشد و صفحه نمایشگر دیجیتال برای نمایش دما به درجه سانتیگراد یا فارنهایت دارد. از این دماسنج برای اندازه‌گیری دمای هوای محیط، سیال ساخته شده و آب مقطر استفاده می‌شود.



شکل ۳-۹- دماسنج دیجیتال

¹ Portable Digital Thermometer

۳-۱۳ جزای ست آپ آزمایشگاهی

۳-۱-۳ سلول شیشه ای شفاف

همان طور که قبلا گفته شد برای بررسی آزمایشگاهی فلودینگ آب در پیل سوختی غشای پلیمری به روش آشکارسازی مستقیم، نیاز به یک سلول شفاف برای نمایش این پدیده است. بدین منظور از یک سلول شیشه ای به طول ۳۰ سانتی متر، عرض ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۱۵ سانتی متر استفاده شده است، ضخامت شیشه به کار برده شده برای ساخت ۶ میلی متر است. برای ورود جریان ته این سلول را به قطر ۵ میلی متر سوراخ شده است. از چسب آکواریوم برای ساخت این سلول استفاده شده است. شکل ۳-۱۰ این سلول را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۰- سلول شیشه ای شفاف

در پیل سوختی غشای پلیمری واقعی سیال جابه جا شونده با سرعت $1/9$ میکرومتر بر ثانیه وارد محیط متخلخل در پیل می شود، این سرعت در تعیین عدد موئینگی نقش دارد. با توجه به این که دبی تزریقی سیال خیس نشونده در آزمایش ۴۰ میلی لیتر بر ساعت است، سطح مقطع مدل مخزن خود را باید به گونه ای باشد که سرعت ایجاد شده نزدیک به سرعت نفوذ در پیل واقعی باشد. بنابراین در مدل پیل سوختی غشای پلیمری این پژوهش، نیاز به ایجاد یک سطح مقطع دایره ای به قطر ۱۰ سانتی متر

داریم تا این شرط سرعت را ارضا کند. بدین منظور در ته سلول از یک شیشه با ضخامت ۱ سانتی متر و طول و عرض ۲۷ سانتی متر استفاده شده است. وسط این شیشه به قطر ۱۰ سانتی متر سوراخ شده است و این شیشه با چسب آکواریوم به ته سلول چسبانده شده است. این شیشه نقش مخزن سیال خیس نشونده را ایفا می کند. شکل ۳-۱۱ این مخزن را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۱- مخزن شیشه‌ای

ابعاد سلول ساخته شده به گونه‌ای انتخاب شده است که با توجه به سرعت تزریق سیال خیس نشونده زمان لازم برای بررسی انگشتی‌ها قبل از رسیدن آن‌ها به دیواره ی سلول را داشته باشیم و بتوان در لحظات مختلف رفتار پدیده را بررسی کنیم.

۳-۴ مواد مورد استفاده در آزمایش

۳-۴-۱ الیاف شیشه‌ای بافته شده حصیری^۱

برای مدل کردن لایه کاتالیزور با درصد تخلخل معین و ایجاد جریان یکنواخت سیال خیس نشونده ورودی به لایه انتشار گاز، از الیاف شیشه‌ای بافته شده حصیری آب‌گریز استفاده شده است. بیش از نیمی از مواد اولیه مورد استفاده در ساخت ماسه سیلیس است و قسمت اصلی هر نوع الیاف شیشه را تشکیل می دهد. سایر اجزاء شامل مقادیر ناچیز سایر ترکیبات شیمیایی می باشند این الیاف به‌طور

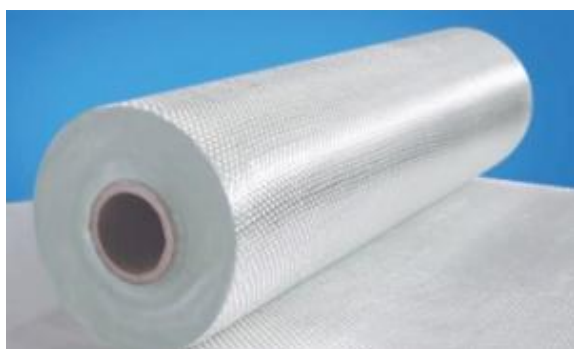
¹ Woven glass fiber mat

گسترده در صنعت کامپوزیت^۱ و ساختمان سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در انواع و بافت های مختلف موجود می‌باشد. مشخصات نوع الیاف به کاررفته شده در این کار در جدول ۱-۳ گردآوری شده است. الیاف حصیری به کاربرده شده ساخت شرکت شیمی افسون^۲ می‌باشد.

جدول ۱-۳- مشخصات الیاف شیشه‌ای حصیری

نوع الیاف شیشه	توزیع وزن (گرم)	درصد سائزینگ	ساختار بافت
E-glass	۴۰۰	۰/۵۵+ ۰/۲	ساده

ضخامت کلی لایه کاتالیزور در این کار برابر با ۵ میلی متر است. از آنجاکه ضخامت تقریبی این الیاف ۰/۵ میلی متر می‌باشد، تعداد ۱۰ عدد از این لایه ها به صورت سری بر روی هم قرار داده شده تا به ضخامت مورد نظر برسد، سپس این لایه ها در ته سلول قرار داده می‌شوند، که ته ظرف و بالای مخزن را به طور کامل می‌پوشاند. و ما را از ایجاد جریان یکنواخت، سیال خیس نشونده به لایه انتشار گاز مطمئن می‌سازد. شکل ۱۲-۳ این الیاف را به ما نشان می‌دهد. سایر پارامترهای هندسی و فیزیکی این الیاف در جدول ۲-۳ ارائه شده است.



شکل ۱۲-۳- الیاف حصیری بافته شده

¹ composite
² Shimie Afsoon

۳-۴-۲ دانه‌های هیدروژلی^۱

همان‌طور که گفته شده برای بررسی فلودینگ آب به صورت آزمایشگاهی و عکس‌برداری از آن نیاز به یک لایه انتشار گاز شفاف است، بدین منظور برای مدل کردن این لایه از دانه‌های هیدروژلی با قطر دو میلی‌متر در حالت خشک استفاده شده‌است. دانه‌های هیدروژلی دانه‌های کوچکی از جنس پلیمر هستند که صدها برابر وزن خود آب را جذب می‌کنند. این دانه‌ها به‌طور معمول ترکیبی از آب و پلیمرهایی از قبیل پلی‌آکریل‌آمید^۲ یا سدیم پلی‌اکریلات^۳ هستند. از این دانه‌ها اغلب در بخش کشاورزی استفاده می‌شود. شکل ۳-۱۳ این دانه‌ها را در حالت خشک نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳- دانه‌های هیدروژلی در حالت خشک

به منظور ایجاد یک لایه آب‌گریز و شفاف انتشار گاز، این دانه‌ها را به مدت ۵ ساعت درون آب مقطر قرار داده، این دانه‌ها به مرور زمان رشد کرده و آب را جذب کرده و به قطر ۱ سانتی‌متر می‌رسند، از آب اشباع^۴ شده و دیگر آب را به خود جذب نمی‌کنند و آب‌گریز می‌شوند. بعد از این که از آب اشباع شدن آماده‌ی قرار گرفتن در سلول شیشه‌ای هستند. شکل ۳-۱۴ این دانه‌ها را در حالت اشباع نشان می‌دهد. سایر پارامترهای هندسی و فیزیکی این دانه‌ها در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

¹ Hydrogel Beads

² Polyacrylamide

³ Sodium polyacrylate

⁴ Saturated



شکل ۳-۱۴- دانه‌های هیدروژلی اشباع

۳-۴-۳ دانه‌های شیشه‌ای^۱

برای ایجاد لایه متخلخل میانی یعنی لایه متخلخل میکرو از دانه‌های شیشه‌ای آب‌گریز استفاده شده است، این دانه‌ها در قطرهای مختلف موجود می‌باشند. شکل ۳-۱۵ این دانه‌ها را نشان می‌دهد. سایر پارامترهای هندسی و فیزیکی این دانه‌ها در جدول ۳-۲ ارائه شده است.



شکل ۳-۱۵- دانه‌های شیشه‌ای

مشخصات هندسی و پارامترهای مورد نیاز لایه‌های استفاده شده در جدول زیر ارائه شده است.

^۱ Glass Beads

جدول ۳-۲- مشخصات هندسی و پارامترهای مهم لایه‌های مورد استفاده در مدل

ساختمان	ساختار	تخلخل	سایز ذرات (mm)	قطر حفرات (mm)	نفوذ پذیری (m ²)	ضخامت	مدل شده به‌عنوان لایه
الیاف شیشه‌ای حصیری	استوانه‌ای	۰/۷ ^(الف)	۰/۱ ^(الف)			۵(mm)	کاتالیزور
دانه‌های شیشه‌ای	کروی	۰/۴ ^(ب)	۳	۱/۳۳ ^(ج)	۸/۹ × ۱۰ ^{-۹(د)}	۱و۲(cm)	متخلخل میکرو
دانه‌های هیدروژلی	کروی	۰/۴ ^(ب)	۱۰	۴/۴۴ ^(ج)	۹/۹ × ۱۰ ^{-۸(د)}	۶و۷(cm)	انتشار گاز

(الف) با توجه به خصوصیات الیاف حصیری بافته شده

(ب) مقادیر فرض شده برای چیدمان تصادفی [۳۷]

(ج) از رابطه $dp = (2\epsilon d)/(3(1 - \epsilon))$ تخمین زده شده [۳۷]

(د) محاسبه شده با استفاده از معادله کارمن-کوزنی^۱ $k = (\epsilon^2 d^2)/(180(1 - \epsilon)^2)$ [۳۷]

نفوذ پذیری برای لایه انتشار گازهای واقعی تجاری توسط خاروف و همکارانش^۲ [۳۸] ارایه شده است. مرتبه بزرگی این اعداد با مقادیر محاسبه شده در این پژوهش تطابق خوبی دارد.

۳-۴-۳ درپوش

به منظور ثابت نگاه داشتن دانه‌های هیدروژلی که در آب، خنثی و شناور^۳ هستند. از یک درپوش خاص استفاده شده است. این درپوش به گونه ای ساخته شده که بتواند انگشتی‌هایی که به بالا رسیده‌اند را به بیرون از محیط انتشار گاز منتقل کند. همچنین مشابه با کانال گاز در پیل سوختی غشای پلیمری امکان تشکیل قطره بر روی سطحش را فراهم کند. این درپوش در انتقال سیال خیس نشونده و تشکیل قطره روی سطحش مشابه با کانال گاز عمل می‌کند. برای ساخت آن از گوی های کروی با قطر ۱,۳ میلی‌تر استفاده شده است. یک شبکه منظم از این گوی ها در ابعاد ۲۷ سانتی متر در ۲۷ سانتی متر ایجاد کرده و به‌عنوان درپوش بر روی هیدروژل ها قرار داده شده است. تا شرایطی که در بالا ذکر شده است را ایجاد کند. شکل ۳-۱۶ این درپوش را نشان می‌دهد.

¹ Carman-Kozeny

² Kharouf *et al.*

³ Neutrally buoyant



شکل ۳-۱۶- درپوش

۵-۴-۳ سیال خیس نشونده

همان طور که پیش تر بیان شد در این مدل از آب مقطر به عنوان سیال زمینه (جابه جاشده) استفاده شده است، در حالی که در پیل سوختی غشای پلیمری واقعی هوا به عنوان سیال زمینه (جابه جاشده) است. و از یک سیال ثانویه به عنوان سیال خیس نشونده (جابه جا شونده) استفاده شده در حالی که در پیل سوختی غشای پلیمری در شرایط واقعی کارکرد آب به عنوان سیال جابه جا شونده است. سیال ثانویه خود باید به گونه ای ساخته شود که شرایطی مشابه با پیل سوختی واقعی را ایجاد کند، این تشابه با رعایت کردن نسبت اعداد بی بعد ایجاد می شود، اعداد اصلی بی بعد در این آزمایش ها به ترتیب عدد موئینگی، عدد باند، عدد دارسی^۱ و نسبت گرانشی می باشد. پس هدف ساخت سیالی است که به گونه ای باشد، که مرتبه بزرگی این اعداد را ارضا کند. و از طرفی این سیال با آب مخلوط نشدنی^۲ باشد و دوفاز مجزا از هم را ایجاد کند.

• **عدد موئینگی** : نسبت بین نیروی ناشی از گرانشی به تنش سطحی که در سطح بین مایع و گاز و یا در سطح بین دو مایع غیر قابل حل عمل می کند گفته می شود. عدد موئینگی در پیل سوختی واقعی بسیار کوچک و در مرتبه بزرگی 10^{-8} است. که ناشی از سرعت بسیار پایین نفوذ در لایه کاتالیزور ($V_{inv} = 1.9 \mu m/s$) است. باید این نکته ذکر شود که در آزمایش های

¹ Darcy number

² Immiscible

ما عدد موینگی از مرتبه بزرگی 10^{-7} است، که یک مرتبه بزرگتر از عدد موینگی در پیل واقعی است، اما به اندازه‌ی کافی کوچک است که اثرات موینگی غالب باشد.

$$Ca = \mu_{inv} V_{inv} / \sigma \cos \vartheta_c \quad (4-3)$$

• **نسبت گرانی: نسبت گرانی دینامیکی سیال خیس نشونده- هجوم برنده به گرانی دینامیکی سیال زمینه گفته می‌شود.**

$$Mv = \mu_{inv} / \mu_{def} \quad (5-3)$$

• **عدد دارسی: نسبت نفوذ پذیری سیال در محیط متخلخل به مجذور شعاع ذرات سازنده محیط متخلخل گفته می‌شود.**

$$Da = k / r^2 \quad (6-3)$$

در این مطالعه r شعاع هیروژل‌های کروی در حالت اشباع و برابر ($r = 5 \text{ mm}$) است.

• **عدد باند: نسبت بین نیروی درونی به تنش سطحی که در سطح بین مایع و گازو یا در سطح بین دو مایع غیر قابل حل عمل می‌کنند گفته می‌شود، نیروی جاذبه یک مثال از نیروی درونی است. به دلیل نزدیک بودن چگالی هر دو سیال در هنگام محاسبه عدد باند فرض می‌کنیم که اختلاف چگالی بین سیال خیس نشونده و آب مقطر (1 kg/m^3) است. برای ارضا عدد باند و کمینه کردن اثرات گرانشی، چگالی سیال خیس نشونده دقیقاً باید با چگالی آب برابر باشد که یکی از چالش‌های اصلی و زمان بر این آزمایش ساختن سیالی با چگالی یکسان با چگالی آب مقطر مورد استفاده بود.**

$$Bo = \Delta \rho g d_p^2 / \sigma \cos \vartheta_c \quad (7-3)$$

برای ساخت سیال خیس نشونده از دوماده با چگالی‌های متفاوت استفاده شده است، یکی سنگین تر و یکی سبک تر از آب، که با ترکیب کردن آن‌ها به چگالی مورد نظر دست پیدا کنیم. در مطالعه از

تتراکلرید کربن و روغن سویا برای ساخت سیال خیس نشونده استفاده شده است.

همان طور که گفته شد یکی از کارهای بسیار زمان بر و چالش برانگیز این مطالعه ساخت سیالی با چگالی مشابه با چگالی آب است. پس باید درصد حجمی مواد سازنده سیال را به گونه ای بدست آورده شود، که در نهایت سیال ساخته شده این ویژگی را داشته باشد. یافتن این درصد های حجمی یکی از سخت ترین قسمت های انجام این آزمایش بوده است. بدین منظور ابتدا با فرض این که مخلوط سیال ساخته شده یک مخلوط ایده آل است. مقدار تئوری درصد حجمی را، برای ساخت ۱۰ میلی لیتر سیال خیس نشونده (فرض شده است که حجم کل سیال خیس نشونده ۱۰ میلی لیتر است) با استفاده از روابط زیر محاسبه می کنیم.

$$m_{oil} + m_{ccl4} = m_{tot} \quad (۸ - ۳)$$

$$\rho = m/v \quad (۹ - ۳)$$

$$v_{oil}\rho_{oil} + v_{ccl4}\rho_{ccl4} = v_{tot}\rho_{tot} \quad (۱۰ - ۳)$$

$$v_{oil} + v_{ccl4} = v_{tot} \quad (۱۱ - ۳)$$

برای چک کردن این که آیا سیال ساخته شده با چگالی آب مقطر برابر است یا نه؟ قطراتی از سیال ساخته شده را، درون ظرف آب مقطر توسط سرنگ تزریق کرده و نتیجه را دنبال کرده، اگر قطرات درون آب معلق و ساکن قرار می گرفتند، تقریباً می توان این نتیجه را گرفت که سیال ساخته شده درست ساخته شده است. در غیر این صورت اگر قطرات به بالا و یا پایین حرکت کنند سیال ساخته شده چگالی مورد نظر را ندارد و برای انجام آزمایش مناسب نیست. همچنین در انتها علاوه بر چک کردن چگالی به روش چشمی، چگالی سیال با استفاده از پیکنومتر با دقت بالا محاسبه شده است. با داشتن مقدار تئوری درصد حجمی، اقدام به ساخت سیال مخلوط به صورت تجربی کرده. اما سیال ساخته شده سیال مورد انتظار ما نبوده، یعنی چگالی ای، متفاوت با چگالی آب داشته است. بنابراین اقدام به ساخت

تعداد بسیار زیادی مخلوط با درصد حجمی‌های متفاوت در چندین مرحله سعی و خطا کرده‌ایم. در نهایت با صدها مرحله سعی و خطا و ساختن نمونه‌های بسیار زیاد، درصد حجمی دقیق تجربی هر کدام از مواد مشخص شد. شکل ۳-۱۷ تعدادی از این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۷- نمونه‌های ساخته شده سیال خیس نشونده

سیال خیس نشونده مخلوطی از تتراکلرید کربن^۱ و روغن سویا^۲ است، از آنجاکه هر دوی این مواد بی‌رنگ هستند برای نمایان شدن سیال خیس نشونده در محیط آشکارسازی، این مخلوط را با یک رنگ^۳ خاص رنگ دار می‌کنیم. لازم به ذکر است که اضافه کردن رنگ نیز چگالی را به میزان جزئی تغییر می‌دهد بنابراین دوباره سیال را اصلاح کرده و دقیقاً به چگالی مورد نظر می‌رسانیم. سیال خیس نشونده ساخته شده، در انتهای کار تا سه رقم اعشار با چگالی آب مقطر مورد استفاده مطابقت دارد. چگالی سیال ساخته شده باید به گونه‌ای باشد که برابر با چگالی آب مقطر مورد استفاده باشد و عامل اصلی حرکت و ایجاد انگشتی‌ها نیروی موئینگی باشد.

۳-۴-۵-۱ تتراکلرید کربن

تتراکلرید کربن یک مایع بی‌رنگ آلی با فرمول CCl_4 می‌باشد. این مایع کاربردهایی دارد به‌عنوان مثال یک حلال غیرقطبی مناسب برای برخی از واکنش‌ها می‌باشد همچنین در ساخت کپسولهای آتش‌نشانی کاربرد دارد. تتراکلرید کربن در هوای اتاق سریعاً به فرم بخار در می‌آید. این ماده سمیت بالایی دارد و به دلیل اینکه سریعاً به فرم بخار در می‌آید، از طریق استنشاق بسیار خطرناک و مضر

¹ Carbon Tetrachloride

² Soybean Oil

³ Dye

است. از آنجایی که آب یه حلال قطبی و روغن سویا یک ماده غیر قطبی است روغن سویا به راحتی در تتراکلرید حل و این مخلوط به هیچ وجه با آب مخلوط نمی شود.

جدول ۳-۳- خصوصیات فیزیکی تترا کلرید کربن

نام ماده	ظاهر	فرمول مولکولی	چگالی (g/ml)	نقطه جوش (C°)
تتراکلرید کربن	مایع بی رنگ با بوی اتری	CCL ₄	۱/۵۹	۷۶/۷۲

بنابراین تتراکلرید بهترین انتخاب برای ساخت این ماده می باشد. تترا کلرید کربن مورد استفاده در این کار ساخت شرکت Merck آلمان با کد ۱۰۲۲۲۲ می باشد. شکل ۳-۱۸ تتراکلرید کربن مورد استفاده در این آزمایش را نشان می دهد. خصوصیات فیزیکی تتراکلرید کربن در جدول ۳-۳ آمده است.



شکل ۳-۱۸- تتراکلرید کربن به کار برده شده در ساخت سیال خیس نشونده

۳-۴-۵-۲ روغن سویا

روغن سویا به کار برده شده در این مطالعه ساخت شرکت اولیتالیا^۱ می باشد. چگالی روغن استفاده شده توسط پیکنومتر اندازه گیری شده و برابر ۰/۹۴۷ گرم بر میلی لیتر است. شکل ۳-۱۹ روغن سویا به کار برده شده را به ما نشان می دهد.

¹ Olitalia



شکل ۳-۱۹- روغن سویا به کار برده شده در ساخت سیال خیس نشونده

۳-۴-۵-۳ رنگ

یکی دیگر از چالش های این کار انتخاب رنگ دانه هایی بود که توانایی رنگ دار کردن این مخلوط را داشته باشد، یعنی در روغن سویا و تترا کلرید کربن به خوبی قابل حل باشد و علاوه بر آن غیر قابل حل در آب باشد. رنگ های بسیاری برای انجام این کار تست شد. اما در نهایت از رنگی با نام تجاری لاتین (Solvent Dye) که در بازار به نام فت موجود است و ویژگی ها را داشت استفاده کردیم. رنگ مورد استفاده در این کار به صورت پودر و قرمز رنگ است. شکل ۳-۲۰ این رنگ را نشان می دهد.



شکل ۳-۲۰- رنگ پودری به کار برده شده برای رنگ دار کردن سیال خیس نشونده

پارامترها، خواص فیزیکی سیال خیس نشونده و سیال زمینه، شرایط آزمایشگاهی و اعداد بی بعد در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴- خواص سیال، شرایط آزمایشگاهی، شرایط کارکرد پیل واقعی، اعداد بی بعد

پارامترها	آزمایش در دمای ۲۵(C°)	پیل سوختی واقعی در دمای ۷۰(C°)
سیال خیس نشونده خیس نشونده	مخلوط رنگی روغن و تتراکلرید کربن	آب مایع
چگالی	۱۰۲۷ (kg/m ³)	۹۷۷/۸(kg/m ³)
گرانروی دینامیکی	۰/۰۳۳ ^(الف) (pa.s)	۰/۰۰۰۴۰۴(pa.s)
سیال جابه جاشده(زمینه) خیس شونده	آب مایع	هوای اشباع
چگالی	۱۰۲۵ (kg/m ³)	۰/۹۱۴ (kg/m ³)
گرانروی دینامیکی	۰/۰۰۱ (pa.s)	۰/۰۰۰۰۱۷۶(pa.s)
خصوصیات بین سطحی		
کشش سطحی	۰/۰۵۶ ^(ب) (N/m)	۰/۰۶۴ (N/m)
زاویه تماس	۱۸۰° ^(ج)	۱۲۰°
سرعت نفوذ	۱/۴۲ (μm/s)	۱/۹ (μm/s)
قطر متوسط حفره	۴/۴۴ (mm)	۲۰ (μm)
پارامترهای بدون بعد		
عدد موئینگی	۸/۳۶×۱۰ ^{-۷}	۲/۴×۱۰ ^{-۸}
نسبت گرانروی	۳۳	۲۳
عدد باند	۳/۴۵×۱۰ ^{-۳(د)}	۵/۹×۱۰ ^{-۵}
عدد دارسی	۳/۹۶×۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۳(ه)}

(الف) گرانروی محاسبه شده در آزمایشگاه سرامیک و مواد دانشگاه صنعتی شاهرود.
 محاسبه شده از رابطه $\sigma = \sigma_{inv} + \sigma_{def} - 2\phi\sqrt{\sigma_{inv}\sigma_{def}}$ با $\phi = 0/5$ [۳۶]، کشش سطحی آب در دمای ۲۵ C برابر با $\sigma_{def} = 0/072(N/m)$. کشش سطحی سیال خیس نشونده نسبت به هوا برابر است با $\sigma_{inv} = 0/034(N/m)$ اندازه گیری شده در آزمایشگاه آشکارسازی دانشگاه صنعتی شاهرود. (ج) این مقدار بر اساس فیلم نازکی از آب که بین هیدروژل و سیال خیس نشونده وجود دارد این فرض شده است.
 (د) محاسبه شده با فرض این که اختلاف چگالی ($\Delta\rho=1\text{ kg/m}^3$) باشد.
 (ه) عدد دارسی در لایه انتشار گاز با توجه به تحقیقات پیشین صورت گرفته در این لایه [۳۹].

۳-۵ مراحل انجام آزمایش

۱. ساخت سیال خیس نشونده در روز انجام آزمایش

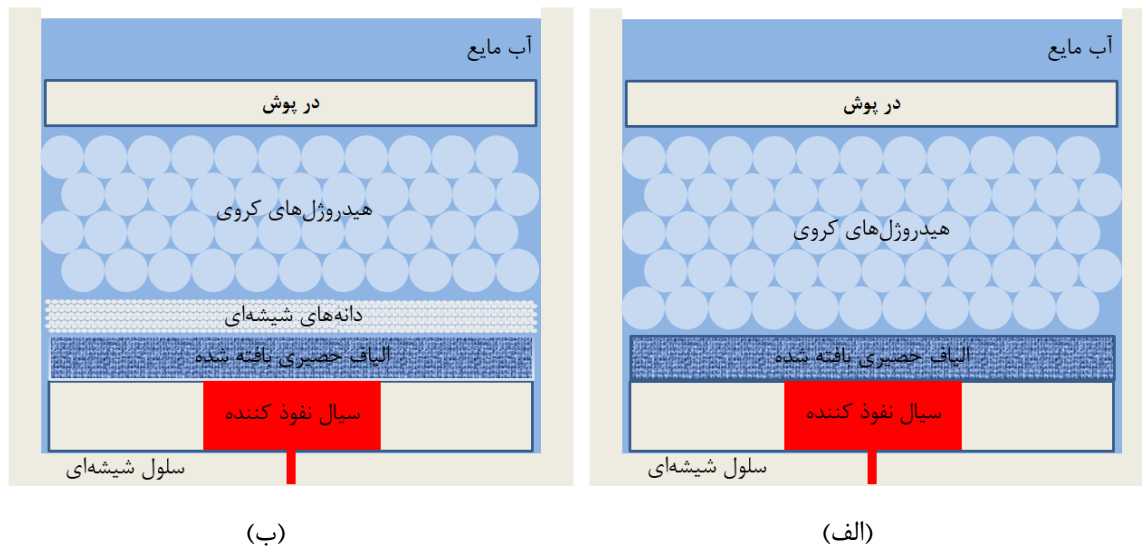
۲. آماده سازی ست آپ پس از ساخت سیال خیس نشونده

۳. شروع آزمایش و عکس برداری از پدیده

به دلیل این که با گذشت زمان چگالی سیال ساخته دچار تغییر می شود و تغییر در چگالی باعث خراب شدن شرایط آزمایش می شود. سیال می بایست در همان روز انجام آزمایش ساخته شود. منظور از تغییر در چگالی به این صورت است که یا سیال خیس نشونده چگالی اش کم تر از آب می شود، که باعث می شود سیال به صورت قطره قطره جدا شده و به سمت بالا حرکت کند و حرکت انگشتی ها تحت عامل اختلاف چگالی باشد و یا این که چگالی اش بیشتر از آب می شود و نیروی موئینگی قادر به بالا کشیدن و حرکت دادن سیال خیس نشونده نبود. برای جلوگیری از ایجاد این مشکلات سیال در همان روز آزمایش ساخته می شود.

در هر آزمایش، ۲۰۰ میلی لیتر برای تزریق سیال، ۷۸/۵ میلی لیتر برای پر کردن مخزن و ۱۰ میلی لیتر برای سیال مجود در شیلنگ سیال خیس نشونده لازم است. برای اطمینان در هر تست ۳۰۰ میلی لیتر سیال خیس نشونده ساخته می شود. مواد سازنده را به اندازه ی درصد حجمی بدست آمده باهم مخلوط کرده و درون ظرف ریخته و به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه بر روی همزن هات پلیت قرار می دهیم تا به طور کامل حل شود و مخلوط همگنی بدست آید. پس از ساخت سیال ست آپ را برای انجام تست آماده می کنیم از آنجا که تترا کلرید کربن یک ماده فرار است باید کم ترین میزان تماس مستقیم با هوا را داشته باشد، به همین دلیل مرحله آماده سازی ست آپ باید به سرعت انجام شود. ابتدا لایه های کاتالیزور را که از قبل بریده ایم و روی هم قرار داده ایم را در ته ظرف و بر روی مخزن قرار می دهیم، در آزمایشی که لایه متخلخل میکرو داریم بعد از گذاشتن لایه کاتالیزور دانه های شیشه ای را بسته به ضخامت مورد نیاز بر روی لایه کاتالیزور می ریزیم. سپس در هر دو حالت

آزمایش، با و بدون لایه متخلخل میکرو، هیدروژل های اشباع شده از آب را به مقداری که درصد تخلخل ۰/۴ را ایجاد کند، داخل سلول بر روی لایه کاتالیزور می ریزیم. شکل ۳ - ۲۱ نحوه ی قرار گیری این لایه ها را به صورت شماتیک نشان می دهد.



شکل ۳-۲۱- شماتیک مدل لایه های پیل سوختی (الف) بدون لایه متخلخل میکرو (ب) با لایه متخلخل میکرو

حال با تزریق سیال خیس نشونده از پایین، مخزن سلول را از سیال پر می کنیم، اگر پیش از زمان شروع آزمایش مخزن را از سیال خیس نشونده پر نکنیم سطح مقطع مورد نظر ما برای بررسی دیگر دایره ای به قطر ۱۰ سانتی متر نخواهد بود، و پس از این که ست آپ را از آب پر کنیم آب وارد مخزن می شود، و در انجام صحیح آزمایش اختلال ایجاد می کند، بدین منظور مخزن حتما باید پیش از شروع آزمایش از سیال خیس نشونده پر شود. مخزن استوانه ای به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۱ سانتی متر است که میزان ۷۸/۵ میلی لیتر سیال باید تزریق شود تا مخزن پر شود.

پس از انجام کارهای بالا و گذاشتن لایه ها بر روی هم ۲/۱ لیتر آب مقطر به سلول اضافه می شود و پس از آن درپوش را روی هیدروژل هایی که در آب شناور هستند قرار می دهیم و با اتصالات موجود آن را ثابت می کنیم. این مقدار آب تا سطح مشترک بین کانال گاز و لایه انتشار گاز را از آب پر

می‌کند. برای این که بتوانیم حجم سیال خیس نشونده خارج از لایه انتشار گاز را محاسبه کنیم باید بتوانیم این سیال را از بالای درپوش جمع‌آوری کنیم، برای جمع‌آوری آن باید از تماس این سیال با هوا خودداری کنیم، بنابراین در انتها آب مقطر را به تدریج به سلول اضافه می‌کنیم تا سلول پر از آب شود و امکان تشکیل مایع سیال تزریق شونده بر روی درپوش فراهم شود. حال پمپ سرنگی را با دبی ۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت روشن کرده و تزریق را شروع می‌کنیم. دوربین را روشن کرده و در فاصله زمانی های ۵ دقیقه ای شروع به عکس‌برداری کرده و تمام تغییرات ثبت شده است.

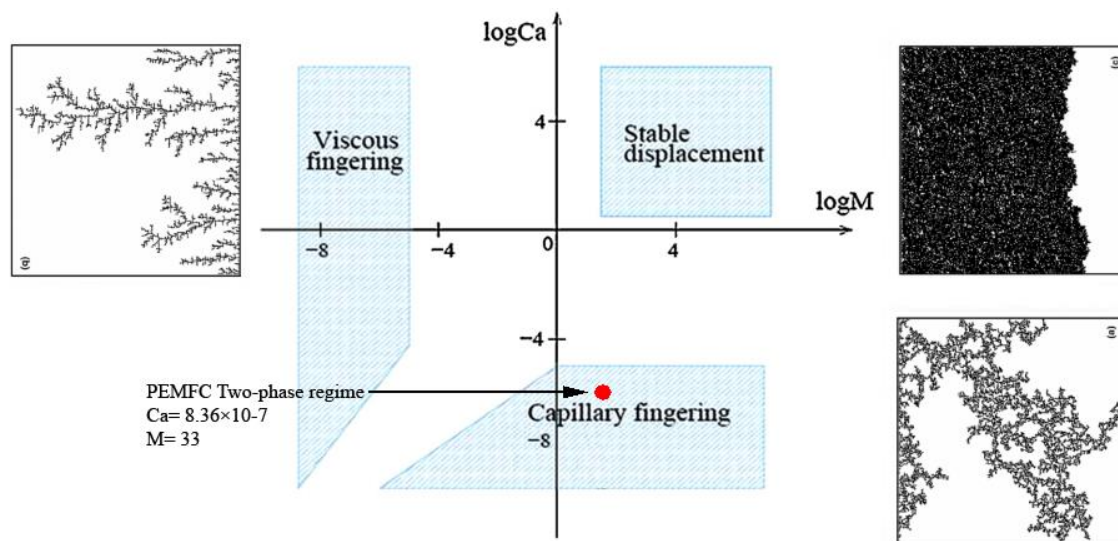
۴ نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا با توجه به مباحثی که در فصول قبل بیان شد و مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی نوع رژیم جریان را، در لایه انتشار گاز مشخص می‌کنیم. سپس مکانیزم ایجاد انگشتی‌ها را به طور کامل شرح می‌دهیم. در بخش بعد به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از هر سه آزمایش و بررسی کامل مراحل مکانیزم انگشت‌زنی، در آزمایش اول و دوم می‌پردازیم. در نهایت به مقایسه کلی هر سه آزمایش با هم می‌پردازیم.

۴-۲ رژیم جریان

در ابتدا لازم است به بررسی رژیم جریان دوفازی موجود در لایه انتشار گاز بپردازیم. با توجه به خصوصیات فیزیکی سیال خیس نشونده و مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی در فصل قبل، با داشتن مقادیر اعداد بی بعد ($Ca=8/36 \times 10^{-7}$, $M=33$) به سراغ نمودار ارائه‌شده توسط لنورمند و همکارانش^۱ می‌رویم و با استفاده از این نمودار نوع جریان دوفازی را مشخص می‌کنیم.



شکل ۴-۱- نمودار تعیین رژیم جریان دوفازی [۴۰]

با توجه به نمودار بالا که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌کنید، برای اعداد موئینگی کوچک‌تر از 10^{-6} و

¹ Lenormand *et al.*

نسبت گرانبوی بزرگ‌تر از یک در ناحیه ناپایداری انگشتی موئینگی قرار می‌گیریم. خارج از این منطقه آبی رنگ هاشور خورده، دیگر در رژیم جریان انگشتی موئینگی قرار نداریم. در این نمودار محل نقطه قرمز رنگ، نوع رژیم جریان را برای تحقیق حاضر مشخص می‌کند. که این نقطه در ناحیه ناپایداری انگشتی موئینگی قرار دارد. پس رژیم جریان دوفازی، رژیم ناپایدار انگشتی موئینگی است.

در لایه انتشار گاز پیشروی سیال خیس نشونده ترجیحاً از حفره‌ها کوچک به سمت حفره‌ها با گلوگاه‌های بزرگ‌تر صورت می‌گیرد، در فرآیند ایجاد انگشتی، نیروی اصلی عامل حرکت، نیروی موئینگی است [۲۰].

۴-۳ فرآیند انگشتی‌زنی

این فرآیند در لایه انتشار گاز به دو مرحله تقسیم بندی می‌شود:

۱. **ظهور و پیدایش** : در این مرحله سیال خیس نشونده به صورت قطرات کوچک در

لایه انتشار گاز نمایان می‌شود.

۲. **رشد و توسعه**: با سپری شدن زمان و تزریق سیال، سیر رشد در لایه انتشار گاز آغاز

می‌شود.

۴-۴ مکانیزم انگشت‌زنی

۱- توقف رشد، در مرحله ظهور و پیدایش انگشتی‌ها

سیال خیس نشونده پس از عبور از لایه یا لایه‌های متخلخل (لایه کاتالیزور و یا لایه کاتالیزور همراه با لایه متخلخل میکرو) که در پایین لایه انتشار گاز قرار دارند، وارد لایه انتشار گاز می‌شود. همان‌طور که ذکر شد در ابتدای حضور سیال خیس نشونده، به صورت قطرات بسیار کوچک، در لایه انتشار گاز نمایان می‌شود. تعدادی از این انگشتی‌ها در همان مرحله‌ی ظهور و

پیدایش در لایه انتشار گاز متوقف شده و به رشد خود ادامه نمی‌دهند.

۲- توقف رشد در مرحله‌ی ایجاد انگشتی ثانویه

انگشتی‌هایی که تقریباً به ارتفاع یک سانتی‌متر در لایه انتشار گاز رشد کرده و بالا آمده‌اند را انگشتی ثانویه نام‌گذاری می‌کنیم. بعضی از انگشتی‌های ثانویه پس از گذشت مدت‌زمانی از حضورشان در لایه انتشار گاز و رشد کردن در این لایه، متوقف می‌شوند و دیگر به رشد خود ادامه در این لایه ادامه نمی‌دهند.

۳- رشد انگشتی‌ها از قسمت، نوک^۱ شاخه‌ها

رشد انگشتی‌ها به این صورت انجام می‌شود که فقط نوک شاخه‌ها (سر آن) شروع به رشد می‌کند، نوک هر انگشتی شروع به رخنه کردن در حفره‌ها می‌کند و سایر قسمت‌های انگشتی در طول رشد ثابت باقی می‌ماند.

۴- تقسیم شدن جریان

انگشتی‌های ثانویه که در حال رشد در لایه انتشار گاز هستند، ممکن است در بعضی از این انگشتی‌ها، از قسمت سرشاخه‌ی انگشتی (نوک) جریان به دو یا چند قسمت تقسیم شود. که باعث تقسیم شدن دبی جریان در انگشتی اصلی می‌شود.

۵- حرکت وارونه انگشتی‌ها

انگشتی‌های ایجاد شده و شاخه‌های آن‌ها، در جهت رو به بالا و جهت‌های جانبی (عرضی) در حال حرکت هستند. جهت مناسب برای ما جهت حرکت رو به بالا است. اما گاهی اوقات این انگشتی‌ها یا بعضی از شاخه‌های آن‌ها در جهتی متفاوت به صورت وارونه (روبه پایین) به سمت

¹ Tip growing

لایه پایینی خود حرکت می‌کنند. در این مطالعه منظور از لایه پایینی لایه کاتالیزور و لایه متخلخل میکرو است.

۶- پیوند انگشتی‌ها

پیوند انگشتی‌ها وقتی اتفاق می‌افتد که، دو انگشتی یا شاخه‌های آن‌ها باهم برخورد کرده و در هر ادغام^۱ می‌شوند و به یک انگشتی تبدیل می‌شوند. در این آزمایش‌ها منظور از پیوند، پیوند بین انگشتی‌های ثانویه است و ما آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۷- رسیدن انگشتی‌ها به کانال گاز

در بین انگشتی‌های ثانویه بعضی از انگشتی‌ها هستند که خود را به کانال گاز (درپوش) می‌رسانند، که به آن‌ها انگشتی‌های مؤثر گفته می‌شود. این انگشتی‌های مؤثر هستند که نقش اصلی در انتقال آب، از لایه انتشار گاز به کانال گاز را برعهده دارند و سیال خیس نشونده را از لایه انتشار گاز خارج می‌کنند. هرچه تعداد انگشتی‌های مؤثر بیشتر باشد تأثیر مثبت بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری دارند.

۸- تشکیل حلقه

انگشتی‌هایی که باهم پیوند برقرار می‌کنند در هنگام برقراری پیوند یک حلقه ایجاد می‌کنند، پس هر حلقه نتیجه‌ی پیوند دو انگشتی با یکدیگر است.

۹- انقباض ناگهانی^۲ در انگشتی

به دلیل وجود اختلاف فشار موئینگی بین لایه انتشار گاز و کانال گاز، پدیده‌ای در لایه انتشار

¹ Merge

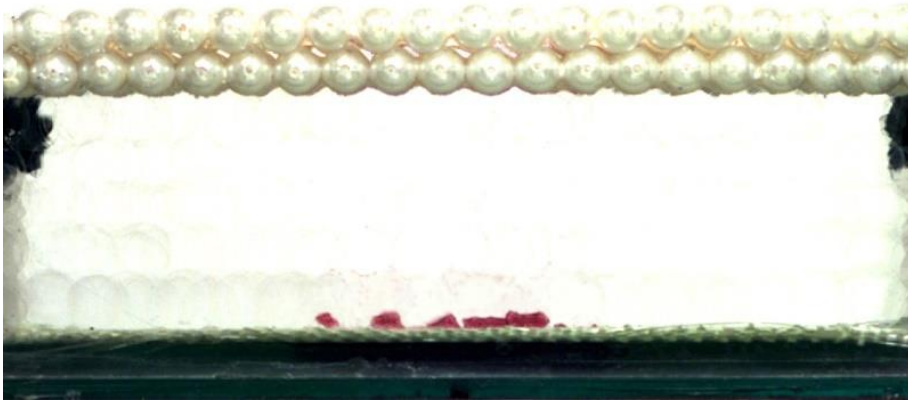
² Shrinkage

گاز اتفاق می‌افتد، که آنرا انقباض ناگهانی نام‌گذاری می‌کنیم. این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که انگشتی‌های مؤثر به کانال گاز می‌رسند. به محض برقراری تماس انگشتی با کانال گاز، سایر شاخه‌های این انگشتی (شاخه‌های جانبی) که در جهات مختلف حتی جهت وارونه در حال حرکت هستند، دچار انقباض شده و سیال موجود در این شاخه‌ها وارد مسیر اصلی انگشتی می‌شود.

۴-۵ بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، بدون لایه متخلخل میکرو

(آزمایش اول)

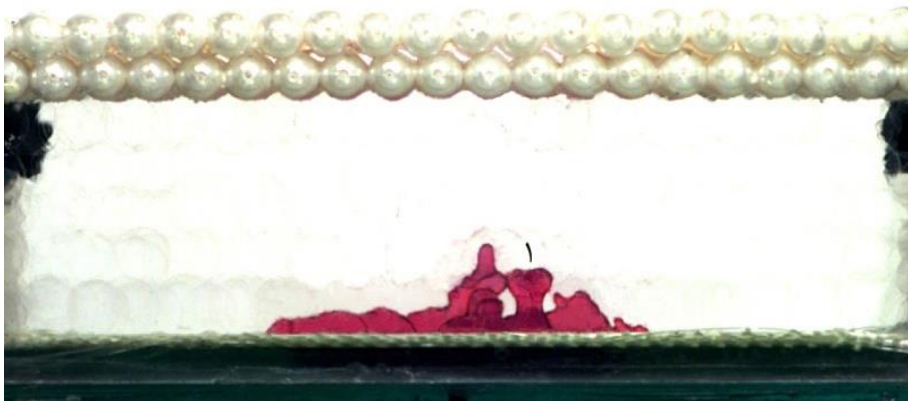
اولین آزمایش به بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز بدون لایه متخلخل میکرو پرداخته است. در این آزمایش ۲۰۰ میلی‌لیتر سیال خیس نشونده با دبی ۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت توسط پمپ سرنگ به مدت ۵ ساعت تزریق شده و روند رشد و حرکت انگشتی‌ها در طول ۵ ساعت ثبت شده‌است. سپس در فاصله زمانی‌های معین با دوربین شروع به عکس‌برداری از سلول شیشه‌ای کرده.



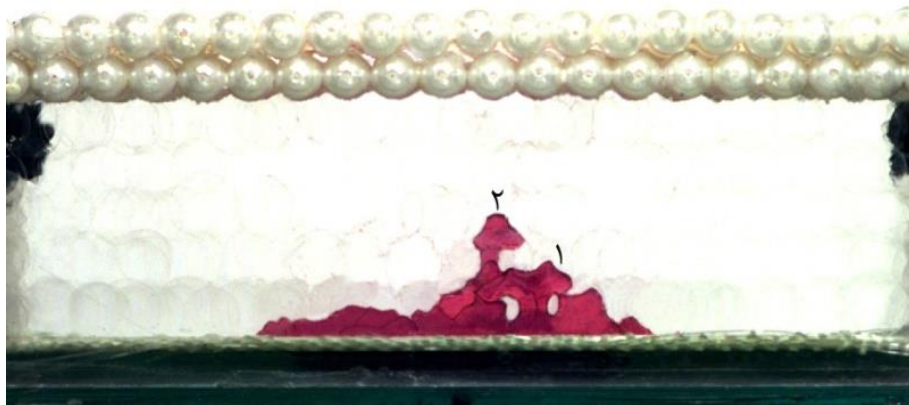
(الف) ۱۲/۵ میلی لیتر تزریق



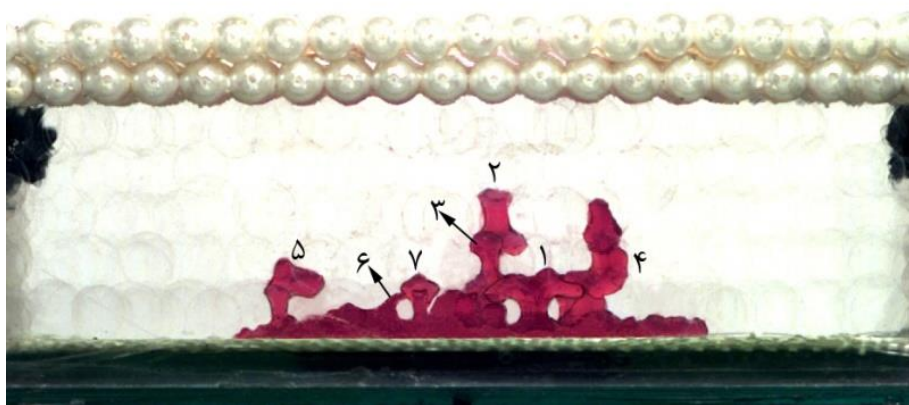
(ب) ۲۵ میلی لیتر تزریق



(ج) ۳۷/۵ میلی لیتر تزریق



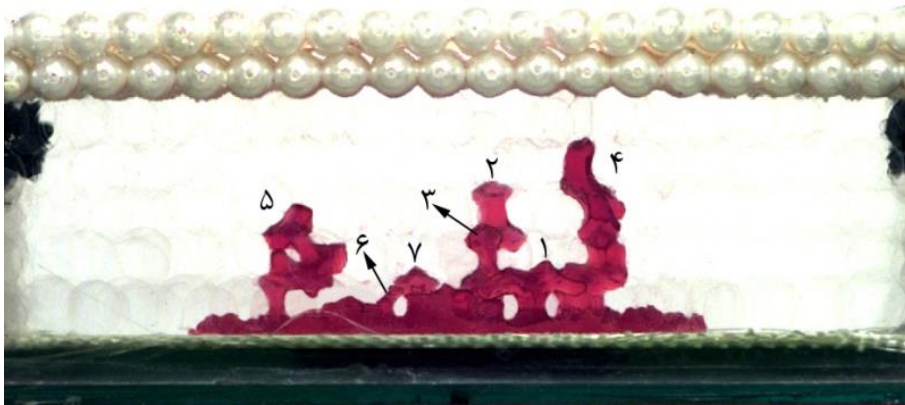
(د) ۵۰ میلی لیتر تزریق



(ه) ۶۲/۵ میلی لیتر تزریق



(و) ۷۵ میلی لیتر تزریق



(ز) ۸۷/۵ میلی لیتر تزریق



(ح) ۱۰۰ میلی لیتر تزریق



(ط) ۱۱۲/۵ میلی لیتر تزریق



(ی) ۱۲۵ میلی لیتر تزریق



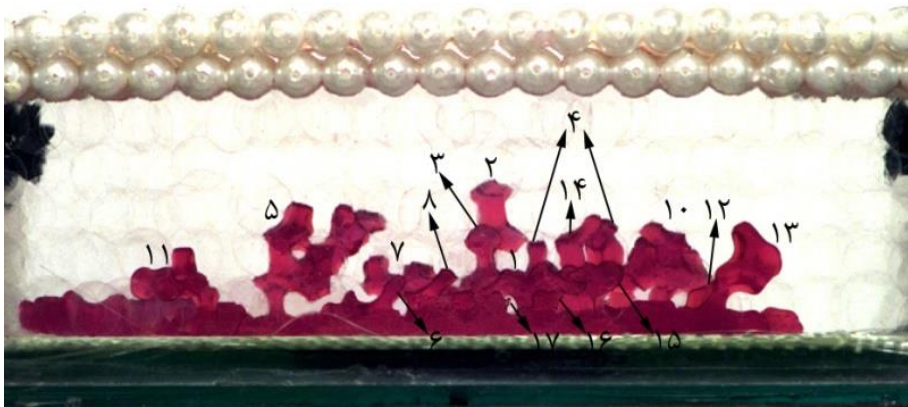
(ک) ۱۳۷/۵ میلی لیتر تزریق



(ل) ۱۵۰ میلی لیتر تزریق



(م) ۱۶۲/۵ میلی لیتر تزریق



(ن) ۱۷۵ میلی لیتر تزریق



(س) ۱۸۷/۵ میلی لیتر تزریق



(ع) ۲۰۰ میلی لیتر تزریق

شکل ۴-۲- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز مدل بدون لایه متخلخل میکرو

شکل ۴-۲- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز، سمت کاتد مدل مشابه پیل سوختی غشای پلیمری را نشان می‌دهد. قطرات کوچک پیدا شده بر روی لایه کاتالیزور با سایر قطرات که در نزدیکی خود هستند یکی شده و فضای خالی بین هیدروژل‌هایی که در مرز مشترک با لایه کاتالیزور هستند را پر می‌کنند. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، در ابتدا تقریباً روی تمام سطح لایه کاتالیزور که در تماس با مخزن تزریق است، توسط سیال خیس نشونده پوشیده می‌شود و فیلمی از سیال خیس نشونده روی لایه کاتالیزور قرار می‌گیرد. با توجه به تصاویر تقریباً تا ارتفاع ۱ سانتی متر از سطح لایه کاتالیزور انگشتی‌ها قابل تشخیص نیستند. انگشتی‌های که تقریباً به ارتفاع یک سانتی متر از روی لایه کاتالیزور بالا آمده‌اند همان انگشتی‌های ثانویه می‌باشند. این انگشتی‌ها در شکل ۴-۲ شماره گذاری شده‌اند. انگشتی‌های کوچک با گذشت زمان و تزریق سیال رشد کرده و به انگشتی‌های بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. انگشتی‌ها در تمامی جهات شروع به رشد و حرکت می‌کنند، حتی در جهت های وارونه به سمت پایین [۴۰]. نتایج آزمایش تجربی ما نشان می‌دهد که پیشروی بعضی از انگشتی‌های ایجاد شده در جهت وارونه (رو به پایین) صورت می‌گیرد که خود بیانگر یکی از ویژگی‌های رژیم انگشتی موئینگی است. یکی دیگر از ویژگی‌های رژیم انگشتی موئینگی انتخاب کردن مسیرهایی با قطر حفره بزرگ‌تر (فشار موئینگی کوچک‌تر) توسط سیال خیس نشونده است، که این پدیده نیز در این آزمایش مشاهده شده است.

۴-۵-۱ رفتار حرکتی سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز مدل مشابه

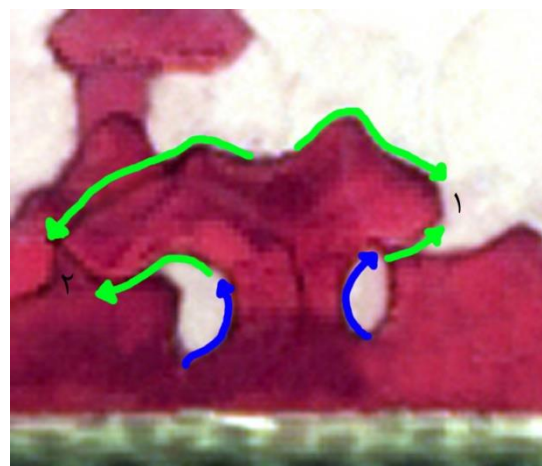
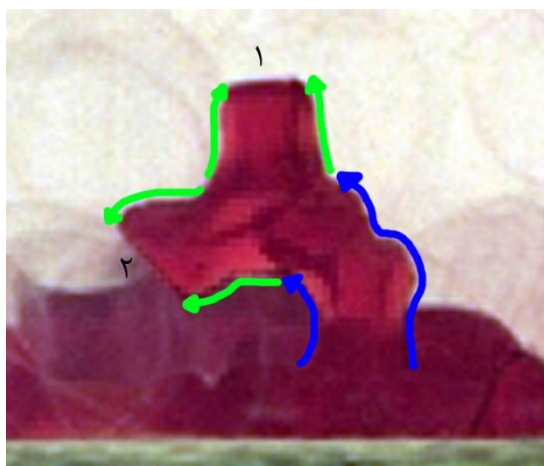
با توجه به شکل ۴-۲

(الف) توقف رشد بعضی از انگشتی‌ها در لحظه اولیه پیدایش: در این حالت سیال خیس نشونده پس از عبور از لایه کاتالیزور وارد لایه انتشار گاز می‌شود. تعدادی از انگشتی‌ها در همان مرحله اول انگشت زنی متوقف شده و به انگشتی‌های ثانویه تبدیل نمی‌شوند، و از تجزیه و تحلیل آن‌ها صرف نظر می‌کنیم. لازم به ذکر است که این انگشتی‌ها باعث افزایش فلودینگ آب و باعث کاهش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شوند.

(ب) توقف رشد بعضی از انگشتی‌های ثانویه: در این آزمایش انگشتی شماره ۱، انگشتی شماره ۲ و انگشتی شماره ۳ پس از ۶۲/۵ میلی‌لیتر تزریق متوقف شده و تا انتهای آزمایش تا ۲۰۰ میلی‌لیتر تزریق ساختار این انگشتی‌ها ثابت و بدون حرکت باقی می‌ماند. شکل ۴-۲ (ه - ع) این رفتار را نشان می‌دهد. انگشتی شماره ۸ اندکی رشد کرده و پس از ۱۰۰ میلی‌لیتر تزریق متوقف می‌شود و تا انتهای آزمایش به همین صورت باقی می‌ماند، شکل ۴-۲ (ح-ع) بیانگر این موضوع است. انگشتی متوقف شده در فرآیند انتقال سیال خیس نشونده به کانال گاز شرکت نمی‌کند و سیال خیس نشونده دیگر این مسیر را برای حرکت انتخاب نمی‌کند و این انگشتی‌ها فقط باعث افزایش فلودینگ سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز می‌شوند، و به‌طور کلی می‌توان این نتیجه را گرفت که پدیده توقف انگشتی‌های ثانویه تأثیر منفی، بر روی عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری واقعی دارد.

(ج) رشد انگشتی‌ها از قسمت، نوک شاخه‌ها: با مشاهده سیر رشد انگشتی‌های ثانویه در شکل ۴-۲ متوجه می‌شویم رشد این انگشتی‌ها از قسمت نوک آن صورت می‌گیرد. برای مثال به رشد انگشتی ۴ در شکل ۴-۲ دقت کنید.

(د) تقسیم شدن جریان: پس از ۵۰ میلی لیتر تزریق جریان در انگشتی شماره ۱ از قسمت نوک انگشتی به دو شاخه تقسیم می شود، همچنین جریان در انگشتی شماره ۱۱ در ۱۵۰ میلی لیتر تزریق به دو شاخه تقسیم می شود، شکل ۳-۴ جریان های تقسیم شده را به ترتیب ذکر شده در بالا نشان می دهد. هرچه تعداد تقسیمات جریان در انگشتی ها کم تر باشد، سیال خیس نشونده در مسیر مستقیم تری رو به بالا حرکت می کند و فرآیند انتقال سیال خیس نشونده به کانال گاز بهتر صورت می گیرد. بنابراین تقسیم شدن جریان تأثیر منفی بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری دارد.



(الف) (ب)
 شکل ۳-۴- تقسیم جریان (الف) انگشتی شماره ۱ (ب) انگشتی شماره ۲

(و) حرکت وارونه (رو به پایین) در بعضی از شاخه های انگشتی ها: حرکت وارونه انگشتی ها در این آزمایش به سمت لایه کاتالیزور می باشد. در این آزمایش چندین انگشتی حرکت وارونه انجام می دهند که به ترتیب آن ها را ذکر می کنیم. یکی از شاخه های انگشتی شماره ۱ وارونه شده و به سمت پایین در حال حرکت است، اما این انگشتی اندکی بعد متوقف شده و از حرکت باز می ایستد، شکل ۴-۴ بیانگر این موضوع است.



شکل ۴-۴- حرکت وارونه در یکی از شاخه‌های انگشتی ۱

دو شاخه جانبی از انگشتی شماره ۵، انگشتی شماره ۱۰، انگشتی شماره ۱۵ و انگشتی شماره ۱۸ وارونه شده و جهت جریان سیال خیس نشونده رو به پایین شده است. شکل ۴-۵ (الف-د) این جریان‌های



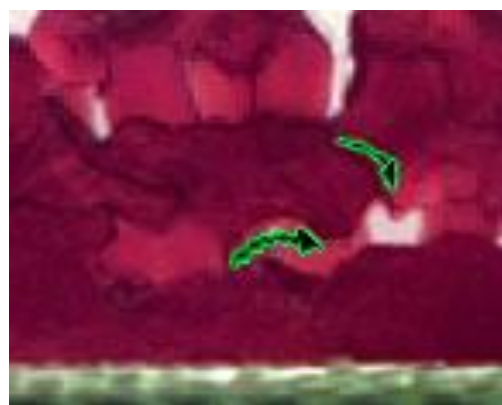
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۵- حرکت وارونه در انگشتی‌های شماره (الف) ۵ (ب) ۱۰ (ج) ۱۵ (د) ۱۸

وارونه را به ترتیب ذکر شده نشان می‌دهد. همچنین سه شاخه جانبی از انگشتی شماره ۴ وارونه شده و

به سمت پایین تغییر جهت داده اند، شکل ۴-۶ هر سه شاخه‌ی این انگشتی را نشان می‌دهد. در این قسمت چندین حرکت وارونه از سیال خیس نشونده را در انگشتی‌های مختلف مشاهده کردیم. نتیجه‌ای که از اطلاعات موجود در تصاویر مدل ساخته شده می‌توانیم بگیریم این است که، حرکت وارونه سیال خیس نشونده به سمت لایه‌ی کاتالیزور، باعث افزایش اشباع سیال خیس نشونده در مدل لایه انتشار گاز می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که جریان‌های وارونه باعث افزایش فلودینگ آب در لایه انتشار گاز می‌شوند و همچنین نیز باعث مسدود شدن مسیرهای خالی موجود در لایه انتشار گاز که برای انتقال گاز به لایه‌های پایینی است می‌شوند، و تأثیر منفی بر روی عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری دارند.



شکل ۴-۶- حرکت وارونه در انگشتی شماره ۴

(ه) پیوند انگشتی‌ها با یکدیگر: در این آزمایش پیوند بین انگشتی‌ها مشاهده شده است. اما به دلیل این که این پیوند، در نواحی پایینی لایه انتشار گاز، در ناحیه‌ای که فیلمی از سیال خیس نشونده بر روی لایه کاتالیزور است، صورت گرفته است. امکان آشکارسازی و نمایش پیوندها فراهم نیست.

(ز) رسیدن بعضی از انگشتی‌ها به کانال گاز: با توجه به شکل ۴-۲ در این آزمایش تنها یک

انگشتی موفق به رسیدن به کانال گاز شده است. مسیر حرکت این انگشتی برای رسیدن به کانال گاز در شکل ۴-۷ (الف) قبل از رسیدن و شکل ۴-۷ (ب) بعد از رسیدن نمایش داده شده است. با توجه به این دو شکل مشاهده می شود که در ابتدای مسیر سیال خیس نشونده مسیر مستقیمی را طی نمی کند، اما هرچه به قسمت های بالاتری از لایه انتشار گاز می رسد مسیر مستقیم را در پیش می گیرد. مسیر انگشتی که خود را به کانال گاز رسانده است، تا انتهای آزمایش ساختار و شکل مسیری ثابت باقی می ماند.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۷- رسیدن انگشتی شماره ۴ به کانال گاز (الف) قبل از رسیدن (ب) بعد از رسیدن

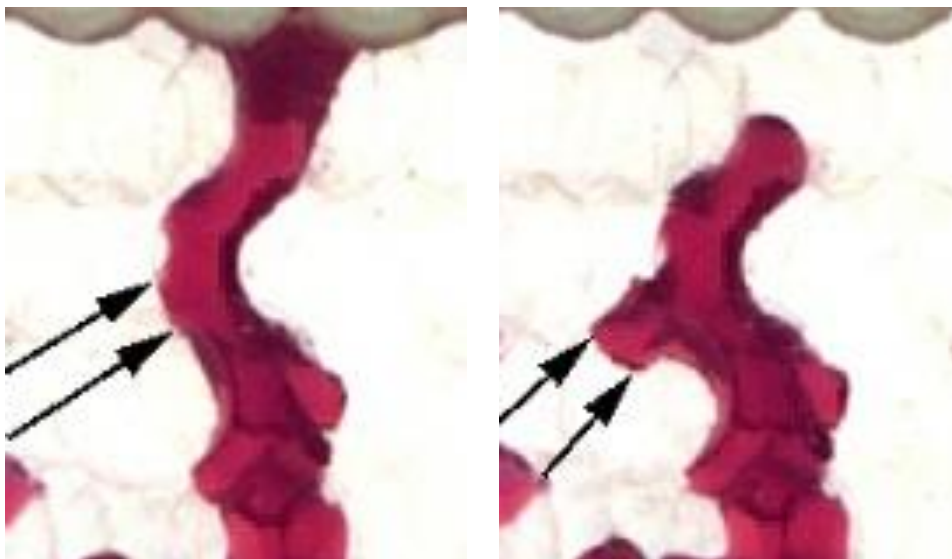
ممکن است در مرحله ای از آزمایش، سیال خیس نشونده پیوستگی خود در مسیر را از دست دهد

و کاملاً از هم جدا شود (این حالت معمولاً در لحظه برخورد اولیه نوک انگشتی با کانال ایجاد می‌شود).
اما در ادامه‌ی آزمایش، سیال خیس نشونده‌ای که وارد این انگشتی در لایه انتشار گاز می‌شود، دوباره
همین مسیر را برای حرکت انتخاب کرده و از همین مسیر خود را به کانال گاز می‌رساند.

(ح) تولید حلقه‌های بسته: از آن جا که در این آزمایش پیوند بین انگشتی‌ها صورت گرفته به‌طور
قطعی نتیجه‌ی این پیوند تشکیل حلقه است. اما به دلیل این که این حلقه‌ها، در نواحی پایینی لایه
انتشار گاز، در ناحیه‌ای که فیلمی از سیال خیس نشونده بر روی کاتالیزور است، قرار دارند. قادر
به آشکارسازی و نمایش حلقه‌ها نیستیم.

(ط) انقباض ناگهانی در انگشتی‌ها: همان‌طور که ذکر شد تنها انگشتی شماره ۴ موفق به
رسیدن به کانال گاز شده است، پس تنها در این انگشتی پدیده انقباض ناگهانی اتفاق می‌افتد.
شکل ۴-۸ (الف) قبل و شکل ۴-۸ (ب) بعد از فرآیند انقباض را در انگشتی شماره ۴ نشان می‌دهد،
پیکان‌ها در شکل جهت جریان انقباضی شاخه را نشان می‌دهد.

پدیده انقباض ناگهانی باعث می‌شود رشد انگشتی‌های عرضی (جانبی) کاهش پیدا کند و سیال خیس
نشونده، در مسیر مستقیم به سمت کانال گاز حرکت کند. این‌طور به نظر می‌رسد که پدیده انقباض
ناگهانی با حذف مسیرهای جانبی باعث کاهش فلودینگ آب در لایه انتشار گاز می‌شود و تأثیر مثبتی
بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌گذارد.



(ب)

(الف)

شکل ۴-۸- انقباض ناگهانی در انگشتی شماره ۴ (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض

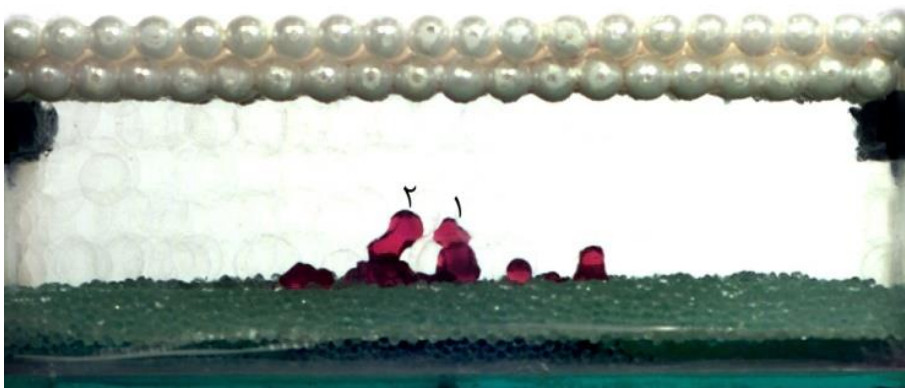
۶-۴ بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، بالایه متخلخل میکرو به

ضخامت یک سانتی متر (آزمایش دوم)

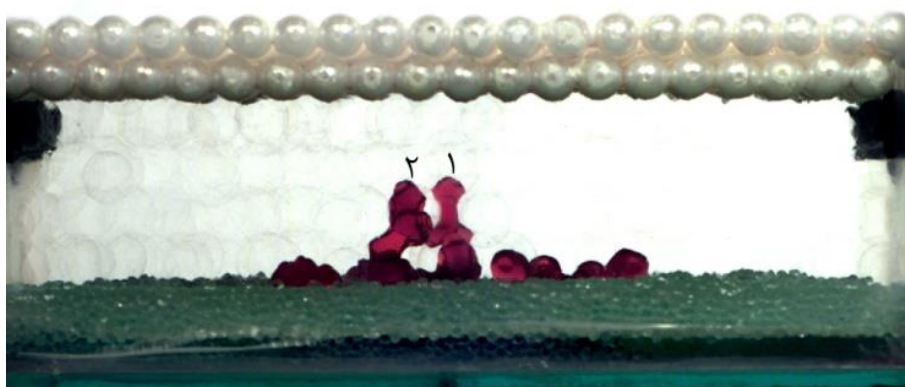
آزمایش دوم به بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی متر پرداخته است. تفاوت این آزمایش با آزمایش قبل در افزودن لایه متخلخل میکرو به آن است، و سایر شرایط مشابه با آزمایش قبل است. بدین منظور در این آزمایش برای مدل کردن لایه متخلخل میکرو، روی لایه کاتالیزور به ضخامت ۱ سانتی متر با دانه‌های شیشه‌ای پوشانده شده است. ضخامت لایه انتشار گاز در این حالت ۶ سانتی متر می‌باشد. ذکر این نکته لازم است که ضخامت کل لایه‌های پیل در مجموع برابر با ۷ سانتی متر و در هر آزمایش ثابت است. مشابه آزمایش قبل ۲۰۰ میلی لیتر سیال خیس نشونده را با دبی ۴۰ میلی لیتر بر ساعت به مدت ۵ ساعت تزریق کرده و روند رشد و حرکت انگشتی‌ها را ثبت و شروع به عکس برداری می‌کنیم.



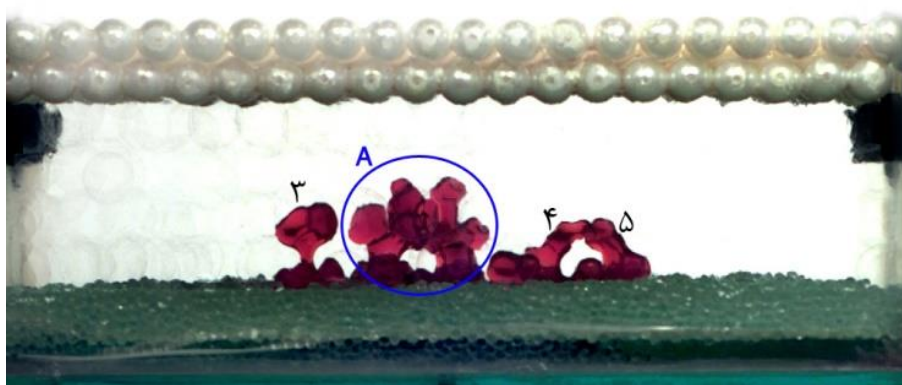
(الف) ۱۲/۵ میلی لیتر تزریق



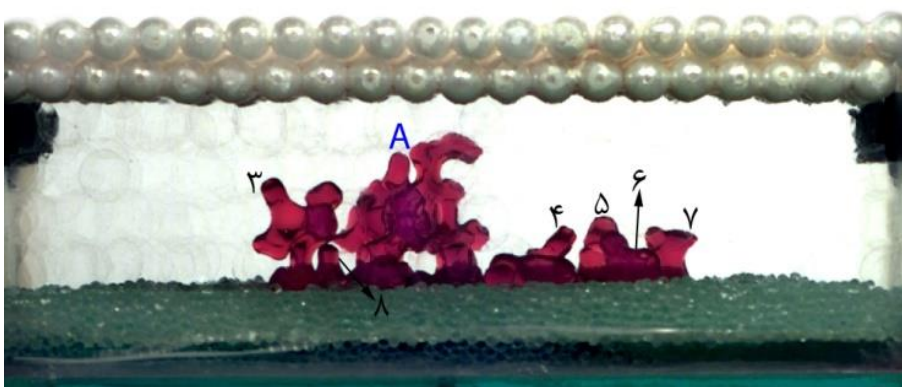
(ب) ۲۵ میلی لیتر تزریق



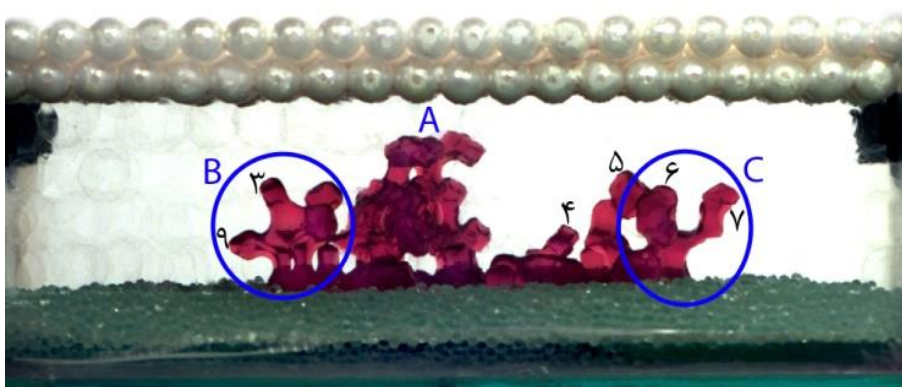
(ج) ۳۷/۵ میلی لیتر تزریق



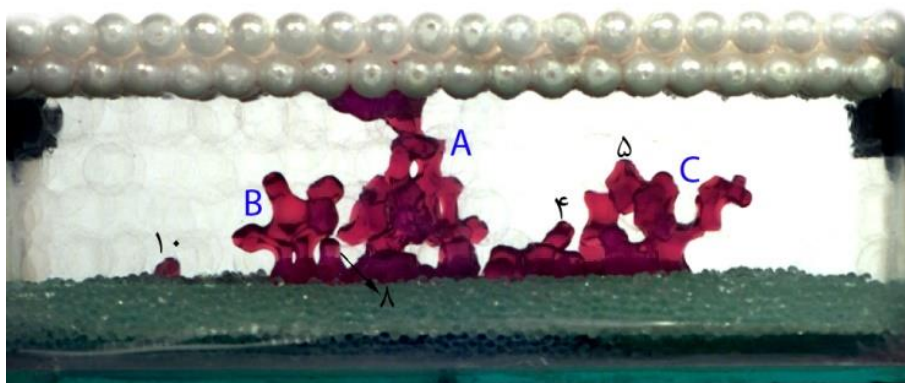
(د) ۵۰ میلی لیتر تزریق



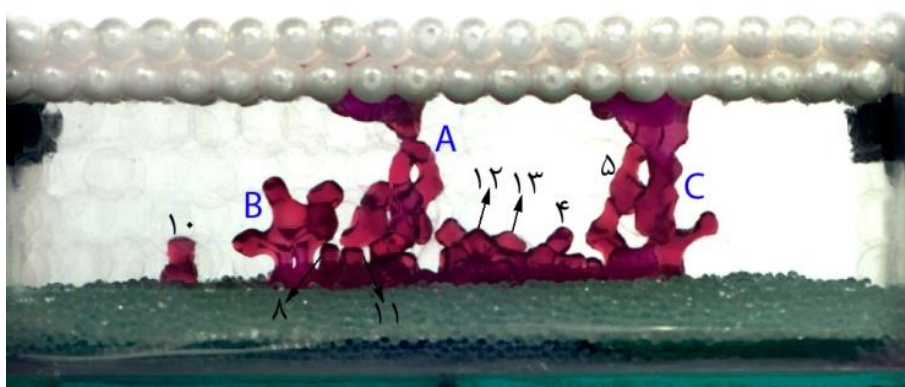
(ه) ۶۲/۵ میلی لیتر تزریق



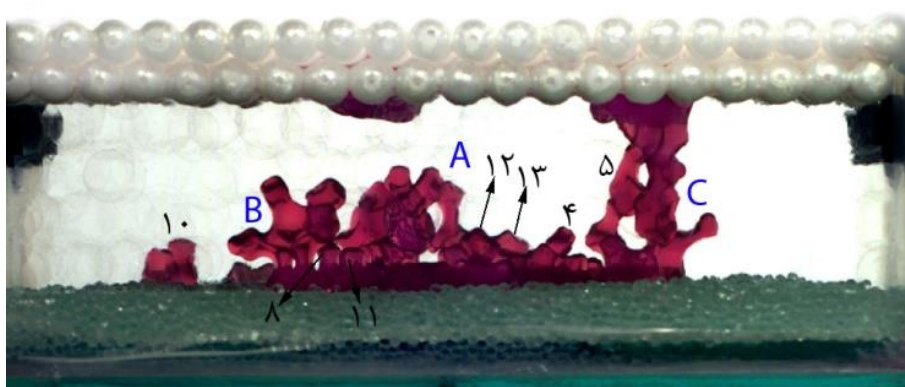
(و) ۷۵ میلی لیتر تزریق



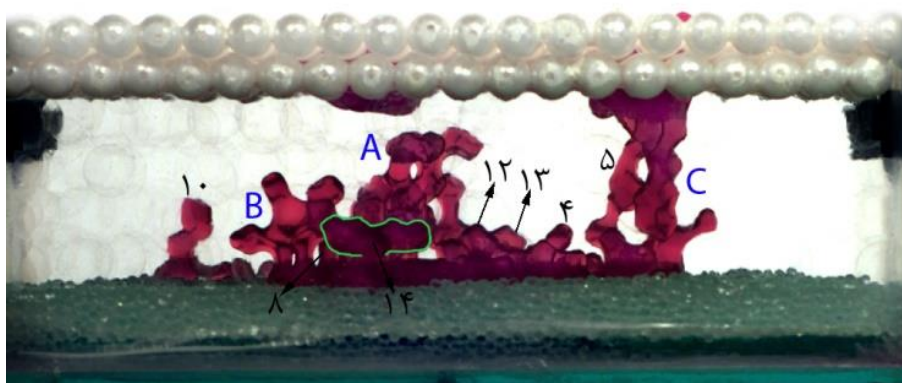
(z) ۸۷/۵ میلی لیتر تزریق



(ح) ۱۰۰ میلی لیتر تزریق



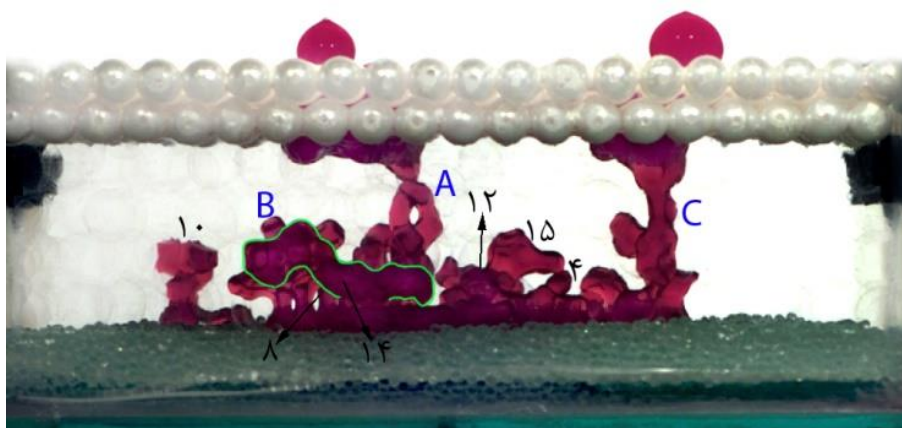
(ط) ۱۱۲/۵ میلی لیتر تزریق



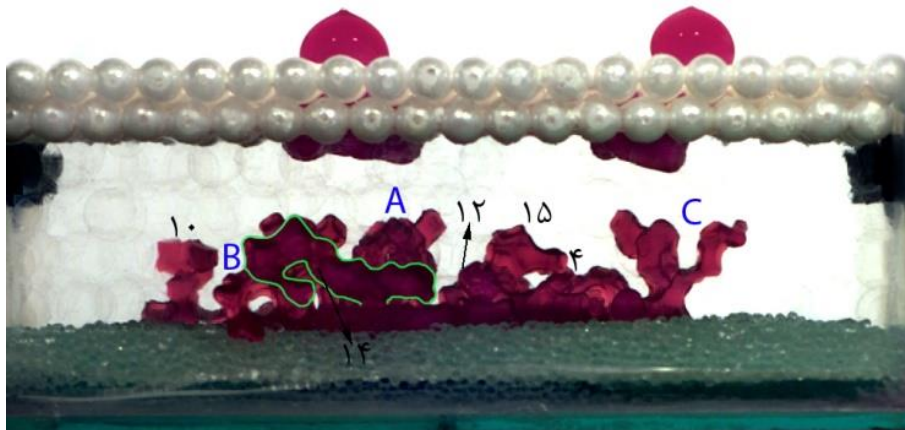
(ی) ۱۲۵ میلی لیتر تزریق



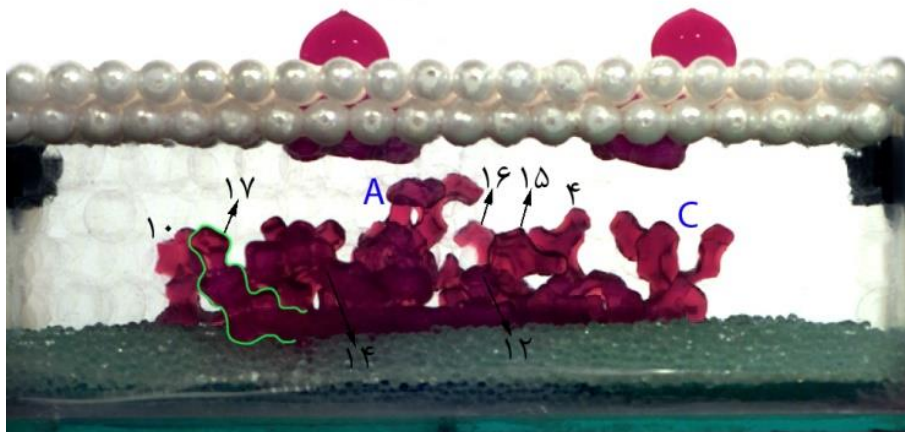
(ک) ۱۳۷/۵ میلی لیتر تزریق



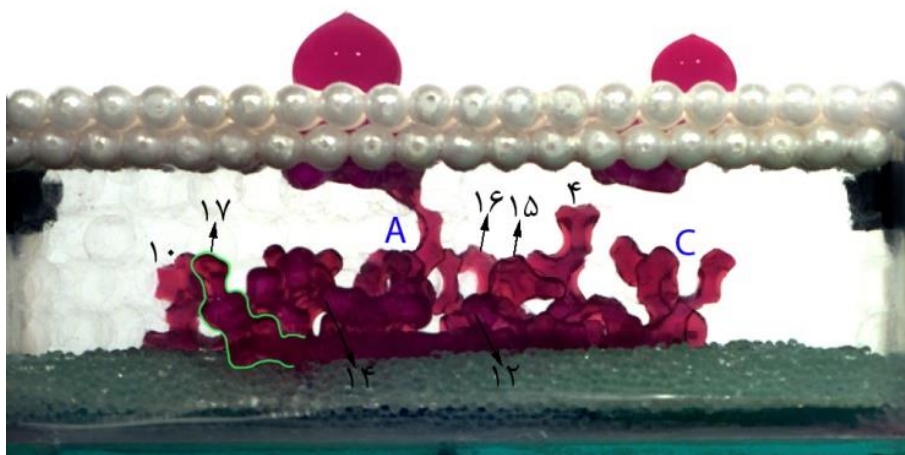
(ل) ۱۵۰ میلی لیتر تزریق



(م) میلی لیتر تزریق ۱۶۲/۵



(ن) میلی لیتر تزریق ۱۷۵



(س) میلی لیتر تزریق ۱۸۷/۵



(ع) ۲۰۰ میلی لیتر تزریق

شکل ۴-۹- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی متر

شکل ۴-۹- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گازی که همراه با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی متر است را نشان می دهد. در این شکل انگشتی های کوچک سیال خیس نشونده در محل های خاصی از روی سطح لایه متخلخل میکرو تشکیل می شوند. این انگشتی های کوچک باگذشت زمان و تزریق سیال رشد کرده و به انگشتی های بزرگ تر تبدیل می شوند، انگشتی های که تقریباً به ارتفاع یک سانتی متر از روی لایه متخلخل میکرو بالاآمده اند انگشتی های ثانویه هستند. این انگشتی ها در شکل ۴-۹ شماره گذاری شده اند.

۴-۶-۱ رفتار حرکتی سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز مدل مشابه با

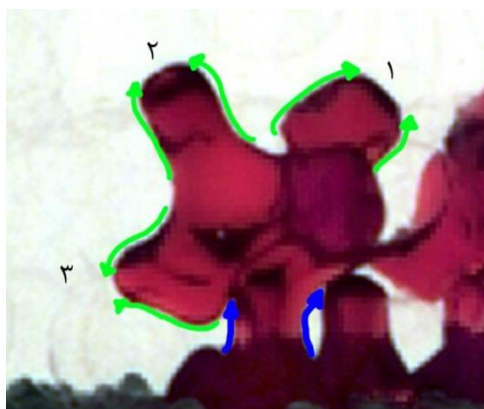
توجه به شکل ۴-۹

(الف) توقف رشد بعضی از انگشتی ها در لحظه اولیه پیدایش: سیال خیس نشونده پس از عبور از لایه های کاتالیزور و متخلخل میکرو وارد لایه انتشار گاز می شود. اما بعضی از انگشتی ها در همان مرحله ابتدای ظهور خود متوقف می شوند. این انگشتی ها در شکل ۴-۹ نام گذاری شده اند. انگشتی های شماره ی ۱۳ و ۱۲ و ۱۱ و ۸ انگشتی های متوقف شده می باشند. و ما از تجزیه و تحلیل آن ها صرف نظر می کنیم.

(ب) توقف رشد بعضی از انگشتی‌های ثانویه: رشد انگشتی شماره ۱۵ پس از ۱۵۰ میلی‌لیتر تزریق متوقف‌شده و تا انتهای آزمایش تا تزریق ۲۰۰ میلی‌لیتر تزریق ساختار این انگشتی ثابت باقی می‌ماند. شکل ۴-۹ (ل-ع) این رفتار را نشان می‌دهد. از آنجاکه انگشتی متوقف‌شده است و در فرآیند انتقال سیال خیس نشونده شرکت نمی‌کند، باعث افزایش فلودینگ در لایه انتشار گاز می‌شود، این پدیده تأثیر منفی بر روی عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری دارد.

(ج) رشد انگشتی‌ها از قسمت، نوک شاخه‌ها: با مشاهده سیر رشد انگشتی‌های ثانویه در شکل ۴-۹ متوجه می‌شویم رشد این انگشتی‌ها مانند آزمایش قبل از نوک آن صورت می‌گیرد. به رشد انگشتی ۵ در شکل ۴-۹ دقت کنید.

(د) تقسیم شدن جریان: پس از ۶۲/۵ میلی‌لیتر تزریق، جریان در انگشتی شماره ۳ از قسمت نوک انگشتی به سه شاخه تقسیم می‌شود و باعث می‌شود دبی جریان در انگشتی ۳، بین ۳ شاخه تقسیم شود. تقسیم جریان باعث کاهش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود. شکل ۴-۱۰ تقسیم جریان در انگشتی ۳ را نشان می‌دهد. پیکان آبی رنگ شاخه‌ی اصلی انگشتی و پیکان‌های سبز رنگ شاخه‌های تقسیم شده را نشان می‌دهد. همچنین جریان در انگشتی شماره ۱۴ که در شکل ۴-۹ (ی) نشان داده شده است، به دو قسمت تقسیم می‌شود. شاخه‌ی سمت راست این انگشتی تقریباً متوقف می‌شود اما شاخه‌ی سمت چپ به رشد خود در لایه انتشار گاز ادامه می‌دهد، این طور به نظر می‌رسد که دبی جریان در شاخه‌ی سمت چپ بیشتر از شاخه‌ی سمت راست است و همچنین مسیر با حفره‌های بزرگ‌تری در پیش روی این شاخه از انگشتی شماره ۱۴ است که به رشد خود ادامه می‌دهد، در حالی که شاخه‌ی دیگر متوقف شده است.

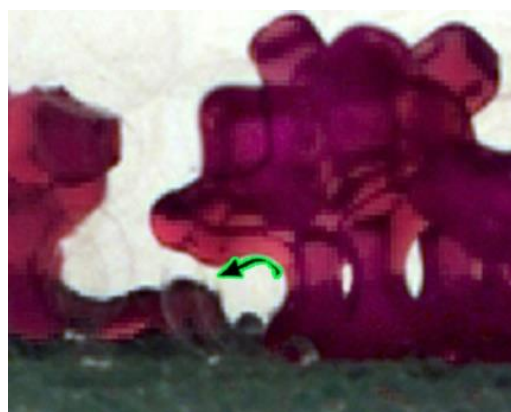


شکل ۴-۱۰- تقسیم جریان در انگشتی شماره ۳

(و) حرکت وارونه (رو به پایین) در بعضی از شاخه‌های انگشتی‌ها: همان‌طور که ذکر شد انگشتی B پس از مدتی متوقف و سپس شروع به رشد می‌کند اما در جهتی برخلاف انتظار، به این صورت که یکی از شاخه‌های این انگشتی شروع به حرکت وارونه (رو به پایین)، به سمت لایه متخلخل میکرو می‌کند و حتی پس از مدتی با این لایه برخورد و وارد این لایه می‌شود. شکل ۴-۱۱ (الف و ب) این جریان وارونه را قبل و بعد از تشکیل شدن نشان می‌دهد. این حالت که جریان وارونه، وارد لایه پایینی می‌شود به شدت تأثیر منفی بر پدیده انتقال در لایه انتشار گاز دارد، در واقع باعث ایجاد یک جریان چرخشی در لایه‌های پیل می‌شود..



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۱- حرکت وارونه در انگشتی B (الف) قبل از برگشت زدن (ب) بعد از برگشت زدن

در این آزمایش ما در انگشتی‌های دیگری جریان وارونه را مشاهده می‌کنیم، در انگشتی شماره ۱۶

شکل ۴-۱۲ (الف)، یکی از شاخه‌های انگشتی A شکل ۴-۱۲ (ب) و یکی از شاخه‌های انگشتی C شکل ۴-۱۲ (ج)، سیال خیس نشونده برگشت می‌کند. پیکان‌های سبزرنگ، جهت جریان‌های وارونه را در تصاویر مشخص می‌کند.



(ب)



(الف)



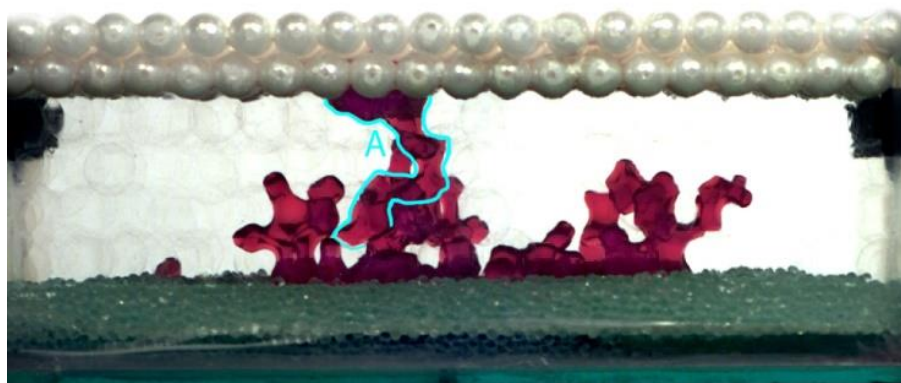
(ج)

شکل ۴-۱۲- حرکت وارونه در (الف) انگشتی شماره ۱۶ (ب) شاخه‌های انگشتی B (ج) شاخه‌های انگشتی C حرکت وارونه به ویژه جریان وارونه‌ای که وارد لایه‌های پایینی می‌شود باعث پرشدن لایه‌های پایینی از آب می‌شود به شدت تأثیر منفی بر عملکرد پیل‌های سوختی غشای پلیمری دارد.

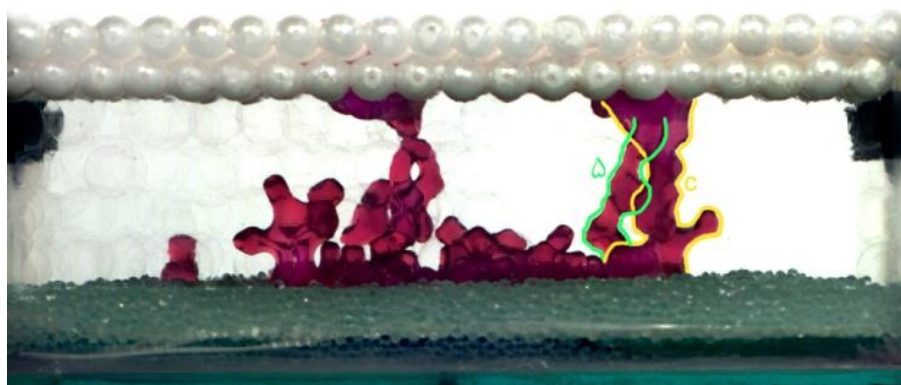
(ه) پیوند انگشتی‌ها با یکدیگر: انگشتی‌های شماره ۱ و ۲ که در شکل ۴-۹ (ب) نشان داده شده‌اند در شکل ۴-۹ (د) باهم پیوند برقرار می‌کنند و انگشتی A را تشکیل می‌دهند. باید به این نکته اشاره کرد که پس از پیوند انگشتی A همچنان به رشد خود در لایه انتشار گاز ادامه می‌دهد. همچنین نیز انگشتی‌های شماره ۳ و ۹ در شکل ۴-۹ (و) باهم پیوند برقرار می‌کنند و انگشتی B را

تشکیل می‌دهند. شکل ۴-۹ (ز) این انگشتی را پس از پیوند نشان می‌دهد. آنچه در هنگام این پیوند مشاهده شد این است که در زمان پیوند و بعد از آن انگشتی B برای مدتی متوقف شده و رشد نمی‌کند شکل ۴-۹ (و-ل) توقف این انگشتی را نشان می‌دهد، و در ادامه‌ی آزمایش این انگشتی شروع به حرکت وارونه می‌کند. انگشتی‌های شماره ۶ و ۷ که در شکل ۴-۹ (ه) نشان داده شده‌اند در شکل ۴-۹ (و) باهم پیوند برقرار می‌کنند و انگشتی C را تشکیل می‌دهند. این انگشتی نیز پس از پیوند، به رشد خود در لایه انتشار گاز به سمت کانال گاز ادامه می‌دهد تا این که به کانال گاز می‌رسد.

(ز) رسیدن بعضی از انگشتی‌ها به کانال گاز: همان‌طور که از شکل ۴-۹ مشخص است، سه انگشتی خود را به کانال گاز رسانده‌اند. انگشتی شماره ۵، یکی از شاخه‌های انگشتی C و یکی از شاخه‌های انگشتی A. مسیر حرکت این سه انگشتی برای رسیدن به کانال گاز در شکل ۴-۱۳ نمایش داده شده است. در اینجا نیز مشابه با آزمایش اول، انگشتی که خود را به کانال گاز رسانده است، تا انتهای آزمایش ساختار و شکل مسیری ثابت باقی می‌ماند. این امکان وجود دارد که سیال خیس نشونده در حین حرکت پیوستگی خود در مسیر را از دست دهد و جدا شود، اما در ادامه‌ی آزمایش، سیال خیس نشونده دوباره همین مسیر را برای حرکت انتخاب کرده و از همین مسیر خود را به کانال گاز می‌رساند. با کمی دقت در تصاویر شکل ۴-۹ مشخص می‌شود که بعد از رسیدن انگشتی‌ها به کانال گاز و تشکیل قطره بر روی کانال گاز و رشد قطره تشکیل شده، تغییرات بسیار کمی در توزیع سیال و رشد سایر انگشتی‌ها مشاهده می‌شود. چون سیال مسیر خود را برای رسیدن به کانال گاز را یافته است و مابقی سیال تزریق شده ترجیحاً همین مسیر را برای حرکت به سمت بالا انتخاب می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۳- مسیر حرکت انگشتی‌های رسیده به کانال گاز (الف) انگشتی A (ب) انگشتی C و انگشتی شماره ۵

(ح) تولید حلقه‌های بسته: در این آزمایش در سه جا حلقه‌ی بسته ایجاد شده است، یکی در

هنگام تشکیل انگشتی B شکل ۴-۱۴ (الف) و انگشتی A شکل ۴-۱۴ (ب). حلقه ایجاد شده دیگر

ناشی از پیوند انگشتی‌های ۶ و ۷ است اما با توجه به زاویه عکس برداری تصویر این حلقه قابل مشاهده

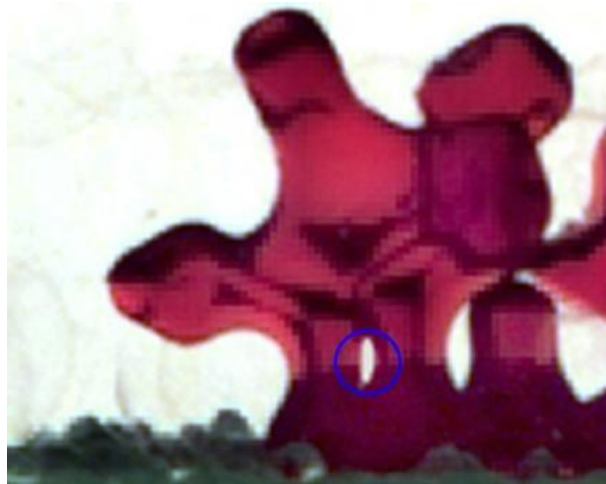
نیست. در حالت بررسی دوبعدی در شرایط کارکرد واقعی پیل، حلقه ایجاد شده باعث می‌شود سیال

جابه‌جاشده (گاز) به دام بیافتد و تأثیر منفی بر فرآیند انتقال داشته باشد و باعث کاهش عملکرد پیل

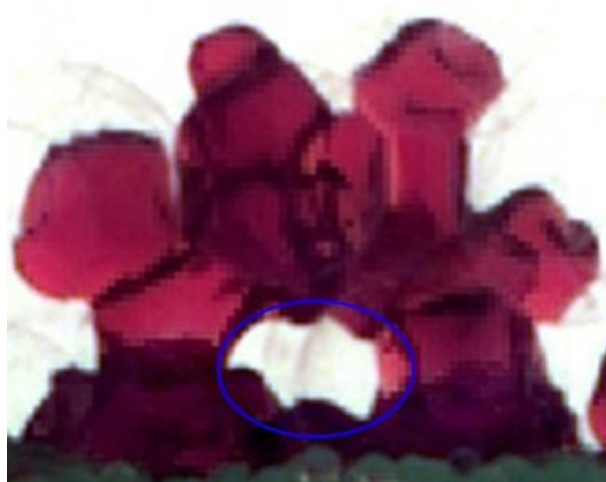
سوختی شود [۴۰]. اما در حالت سه‌بعدی در مدل آزمایشگاهی ما، می‌توان این‌طور گفت که، تشکیل

حلقه به‌گونه‌ای قابلیت حرکت سیال جابه‌جاشده (آب) را کم می‌کند. کاهش قابلیت حرکت سیال

زمینه، تأثیر منفی بر روند انتقال اکسیژن در پیل سوختی غشای پلیمری واقعی دارد. بنابراین تشکیل حلقه تأثیر منفی بر عملکرد پیل سوختی می‌گذارد.



(الف)

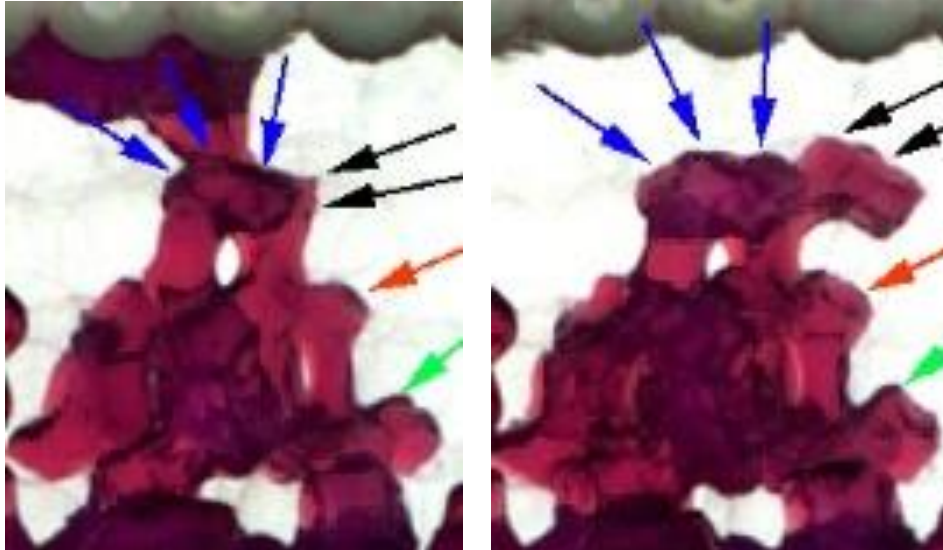


(ب)

شکل ۴-۱۴- تشکیل حلقه (الف) انگشتی B (ب) انگشتی C

(ط) انقباض ناگهانی در انگشتی‌ها: همان‌طور که این پدیده برای شرایط آزمایش اول بررسی شد، در این جا نیز به بررسی این پدیده با حضور لایه متخلخل میکرو می‌پردازیم. در این آزمایش در دو قسمت مختلف اختلاف فشار موئینگی وجود دارد، یکی بین لایه متخلخل میکرو و لایه انتشار گازو دیگری بین لایه انتشار گازو کانال گاز، که این اختلاف فشارها به دلیل تفاوت بسیار زیاد در سایز حفرات این لایه‌ها است. در کارهای پیشین صورت گرفته مشاهده شده است که پدیده انقباض ناگهانی

در لایه‌ی متخلخل میکرو هنگام رسیدن سیال به لایه انتشار گاز هم نیز اتفاق می‌افتد [۲۱] از آنجاکه لایه متخلخل میکرو در آزمایش ما شفاف نیست و نمی‌توانیم رفتار سیال خیس نشونده در لایه متخلخل میکرو را بررسی و مشاهده کنیم، فقط به بررسی این پدیده در لایه انتشار گاز می‌پردازیم.

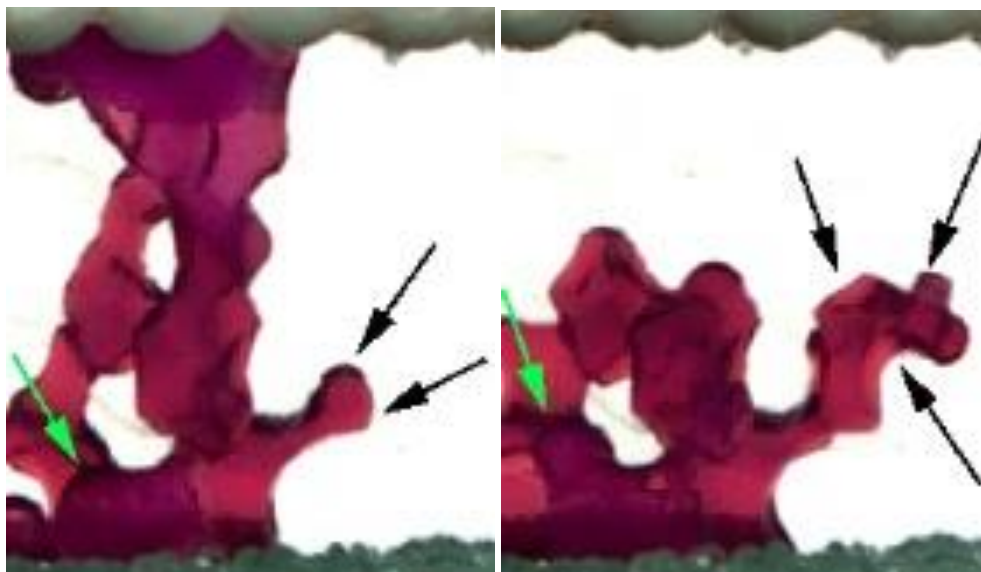


(ب)

(الف)

شکل ۴-۱۵ انقباض ناگهانی در انگشتی A (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض

در لایه انتشار گاز، در هر کدام از انگشتی‌هایی که به کانال گاز رسیده‌اند پدیده انقباض اتفاق می‌افتد. در ادامه انقباض در هر انگشتی به‌طور جداگانه نمایش داده می‌شود. ابتدا این پدیده را در انگشتی A بررسی می‌کنیم. شکل ۴-۱۵ شاخه‌های انگشتی A را قبل و بعد از انقباض نشان می‌دهد، به محض تماس یکی از شاخه‌های انگشتی A با درپوش، انقباض در سایر شاخه‌های این انگشتی مشاهده می‌شود. در قسمت‌های دیگر این انگشتی نیز انقباض مشاهده می‌شود اما به دلیل تیرگی و پیچیده بودن آن ناحیه، قابل ارائه نیست. مشابه همین حالت برای انگشتی C نیز اتفاق می‌افتد. شکل ۴-۱۶ شاخه‌های انگشتی C را قبل و بعد از انقباض نشان می‌دهد. در این شکل دوشاخه‌ی جانبی انگشتی C بلافاصله پس از این که شاخه‌ی اصلی با درپوش برخورد می‌کند، دچار انقباض ناگهانی می‌شوند.

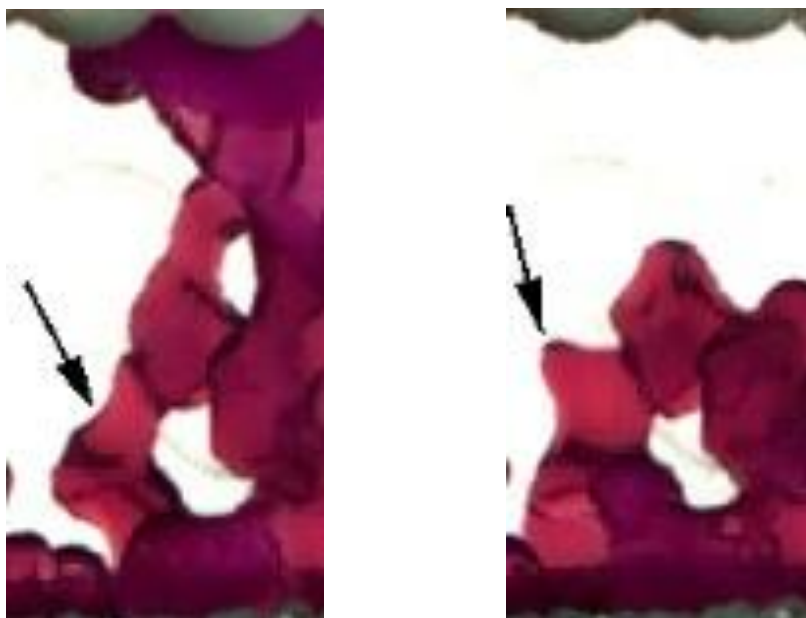


(ب)

(الف)

شکل ۴-۱۶- انقباض ناگهانی در انگشتی C (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض

انقباض در انگشتی شماره ۵ نیز اتفاق می‌افتد، که شکل ۴-۱۷ انگشتی را قبل و بعد از انقباض نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

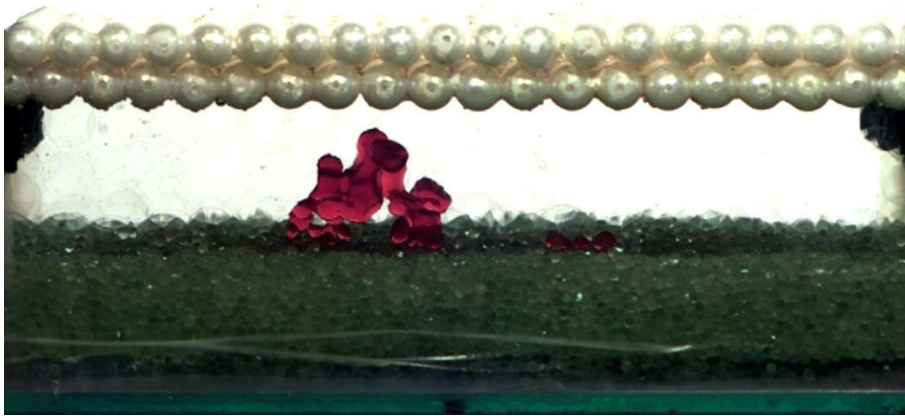
شکل ۴-۱۷- انقباض در انگشتی شماره ۵ (الف) قبل از انقباض (ب) بعد از انقباض

مشابه با آزمایش قبل با توجه به رفتار حرکتی که از سیال مشاهده می‌کنیم، این‌طور برداشت می‌شود که پدیده انقباض باعث تسریع در فرآیند انتقال آب از طریق حذف مسیرهای جانبی و بازگشت جریان های جانبی به مسیر اصلی می‌شود و از همین طریق باعث بهبود عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود.

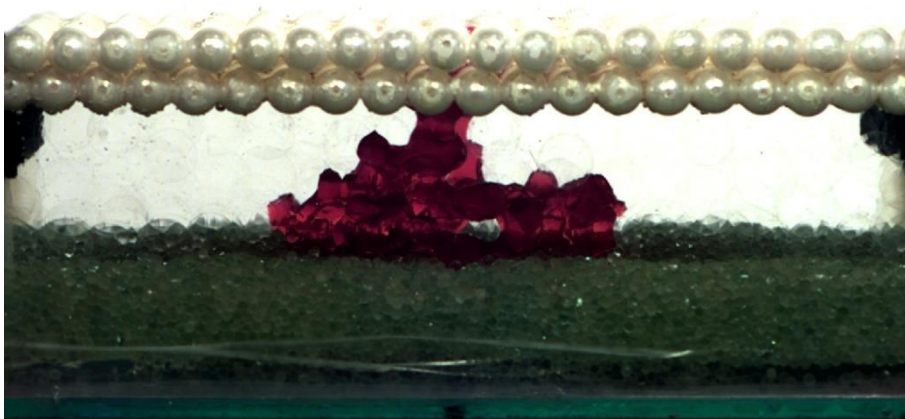
۴-۷ بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، بالایه متخلخل میکرو به

ضخامت دو سانتی‌متر (آزمایش سوم)

آزمایش سوم به بررسی فلودینگ آب در لایه انتشار گاز، با لایه متخلخل میکرو به ضخامت دوسانتی‌متر پرداخته شده‌است. ضخامت لایه انتشار گاز در این حالت ۵ سانتی‌متر است. ذکر این نکته لازم است که ضخامت کل لایه‌های پیل در مجموع برابر با ۷ سانتی‌متر و ثابت است. مشابه آزمایش قبل ۲۰۰ میلی‌لیتر از سیال خیس نشونده را با دبی ۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت به مدت ۵ ساعت توسط پمپ سرنگ تزریق کرده و روند رشد و حرکت انگشتی‌ها را ثبت و شروع به عکس‌برداری می‌کنیم.



(الف) ۵۰ میلی لیتر تزریق



(ب) ۱۰۰ میلی لیتر تزریق



(ج) ۱۵۰ میلی لیتر تزریق



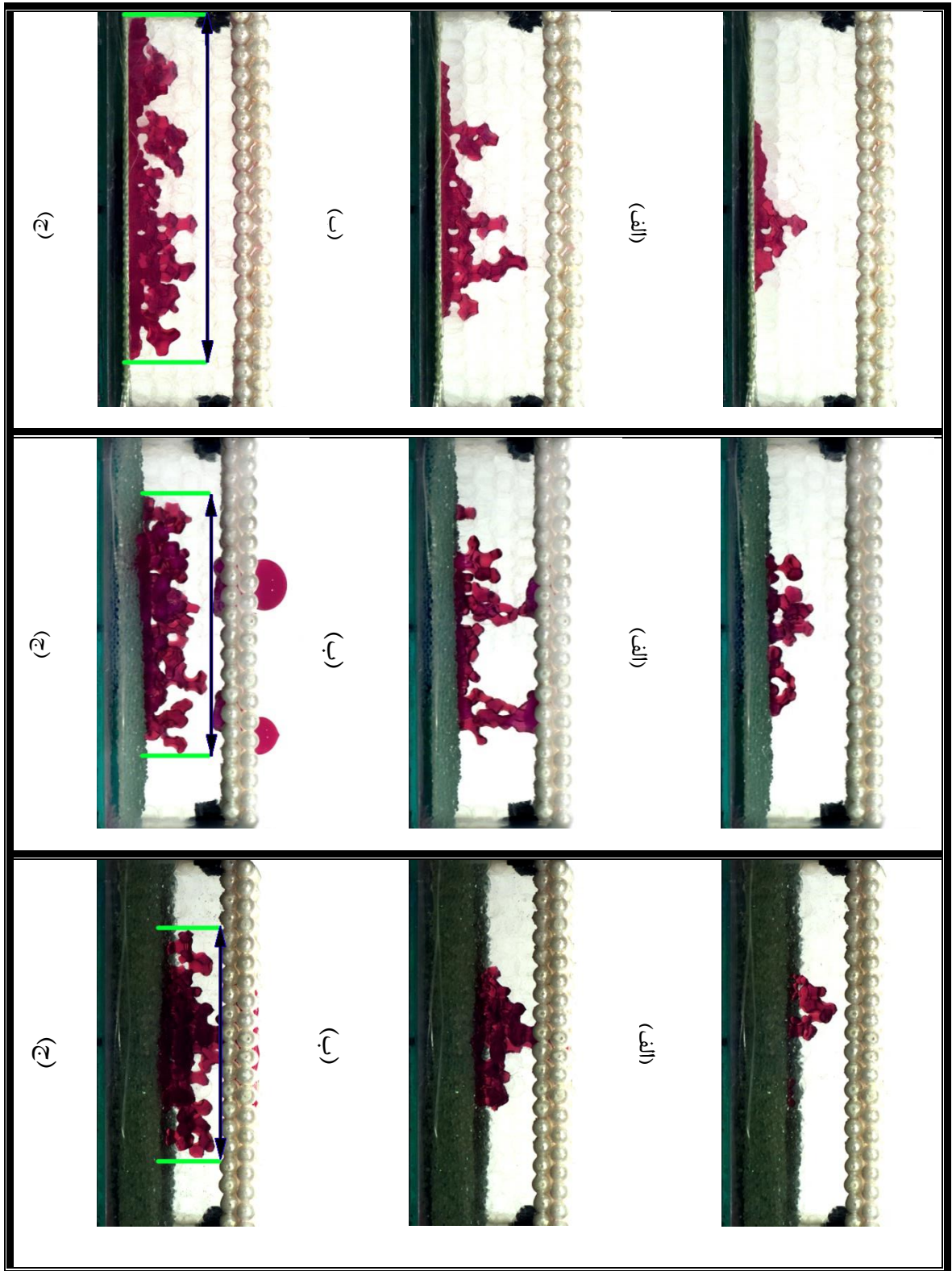
(د) ۲۰۰ میلی لیتر تزریق

شکل ۴-۱۸- توزیع سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز با لایه متخلخل میکرو به ضخامت دو سانتی متر با توجه به شکل ۴-۱۸ می توان گفت که تمام انگشتی هایی که وارد لایه انتشار گاز شده اند از سطح مقطع دایره ای به قطر ۱۰ سانتی متر در سطح مشترک لایه انتشار گاز و لایه متخلخل میکرو ایجاد شده اند. که بیانگر این موضوع است که انگشتی ها کمترین میزان پراکندگی را در لایه کاتالیزور و لایه متخلخل میکرو داشته اند و تمام انگشتی ها تقریباً به طور مستقیم وارد لایه انتشار گاز می شوند. با افزایش ضخامت لایه متخلخل میکرو از یک سانتی متر به دو سانتی متر، به طور چشم گیری از میزان گستردگی سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز کاسته شده و میزان فلودینگ سیال خیس نشونده، کاهش یافته است. به دلیل این که در این آزمایش انگشتی های ایجاد شده بسیار متمرکز و نزدیک به هم هستند، امکان تحلیل و بررسی هر کدام از انگشتی ها مانند آزمایش های قبلی فراهم نیست.

۴-۸ بررسی و مقایسه کلی هر سه آزمایش

مشاهدات تجربی نشان می دهد که رشد انگشتی ها سازگاری خوبی با نمودار جریان دو فاز ارائه شده توسط لنورمند دارد. از ویژگی های اصلی ارائه شده برای رژیم جریان انگشتی موئینگی، وجود انگشتی های وارونه است که این ویژگی در هر سه آزمایش مشاهده شده است، همچنین مشاهدات تجربی ما از توزیع و انتقال سیال در لایه انتشار گاز تطابق خوبی با شماتیک ارائه شده توسط لیستر و همکارانش در شکل ۲-۳ دارد، که صحتی بر مدل ساخته شده و نتایج بدست آمده از آن است.

مشاهدات نشان می‌دهد که با توجه به سیر رشد در هر سه آزمایش انتقال سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز، توسط مکانیزم تهاجم- نفوذ با انگشتی زنی موئینگی فعال صورت می‌گیرد. مسیرها با حفره‌های بزرگ‌تر (فشار موئینگی ورودی کوچک‌تر) مورد هجوم سیال خیس نشونده قرار می‌گیرند. با مقایسه تصاویر در شکل ۴-۱۹، مشخص است که پراکندگی سیال خیس نشونده با افزودن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن، کاهش یافته است. در این تصاویر طول هر پیکان در هر عکس عرض ناحیه‌ای که توسط سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز اشغال شده است را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رود این طول در آزمایش اول بیشتر از سایر آزمایش‌ها است. طول مشخصه از آزمایش اول به آزمایش دوم ۳۴٪ و از آزمایش دوم به آزمایش سوم ۱۳٪ کاهش پیدا کرده است، که روند کاهشی داشته است. که بیانگر پراکندگی کم‌تر انگشتی‌ها و شاخه‌های آن‌ها و کاهش فلودینگ در لایه انتشار گاز است. همچنین حجم سیال موجود در لایه انتشار گاز با افزودن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن کاهش یافته است که این موضوع در همین فصل در بخش ۴-۸-۵ شرح داده می‌شود. علاوه بر این مسافتی که توسط سیال خیس نشونده، برای خارج شدن از لایه انتشار گاز و رسیدن به کانال گاز، باید پیموده شود (با توجه به این که ضخامت کل در هر سه آزمایش ثابت و برابر ۷ سانتی‌متر است) کاهش پیدا کرده است چون زمان لازم برای رسیدن به کانال گاز کاهش پیدا کرده است می‌توان گفت سیال مسیر کوتاه‌تری را طی می‌کند، بحث زمان رسیدن به کانال گاز در بخش ۴-۸-۴ شرح داده شده است. نتیجه‌ای که از این مقایسه گرفته می‌شود این است که افزودن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن باعث کاهش فلودینگ آب و بهبود انتقال آب و در نتیجه افزایش عملکرد پیل سوختی می‌شود.



شکل ۴-۱۹- مقایسه توزیع سیال خیس نشونده در هر سه آزمایش (الف) ۵۰ میلی لیتر تزریق (ب) ۱۰۰ میلی لیتر تزریق (ج) ۲۰۰ میلی لیتر تزریق

۱-۸-۴ مقایسه انگشتی‌های وارونه

با توجه به مباحث گفته شده در بخش‌های ۱-۵-۴ (و) و ۱-۶-۴ (و) تعداد انگشتی‌های وارونه در آزمایش اول بیشتر از آزمایش دوم است (تعداد انگشتی‌های آزمایش سوم موجود نیست). همان‌طور که گفته شد جریان وارونه تأثیر منفی بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری دارد. پس می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزودن لایه متخلخل میکرو تعداد انگشتی‌های وارونه کاهش می‌یابد و از این طریق فلودینگ آب در لایه انتشار گاز کاهش می‌یابد و در نتیجه عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری بهبود می‌یابد.

۲-۸-۴ مقایسه تعداد انگشتی‌های مؤثر

جدول ۱-۴ تعداد انگشتی‌های مؤثر ایجاد شده در هر آزمایش را بیان می‌کند. با توجه به جدول تعداد انگشتی‌هایی که خود را به کانال گاز رسانده‌اند (انگشتی‌های مؤثر)، در آزمایش سوم و دوم بیشتر از آزمایش اول است، یعنی تعداد بیشتری از انگشتی‌ها در انتقال سیال خیس نشونده و بیرون بردن آن از محیط انتشار گاز شرکت می‌کنند و باعث تسریع در فرآیند انتقال نسبت به حالت بدون لایه متخلخل میکرو می‌شوند.

جدول ۱-۴- تعداد انگشتی‌های مؤثر در هر آزمایش

تعداد انگشتی‌های مؤثر	شرایط آزمایش
۱	بدون لایه متخلخل میکرو
۳	با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی‌متر
۳	با لایه متخلخل میکرو به ضخامت دو سانتی‌متر

در آزمایش دوم و سوم تعداد انگشتی‌های بیشتری به کانال گاز رسیده‌اند، که متناسب با آن

انقباض‌های ناگهانی در آزمایش دوم و سوم بیشتر از آزمایش اول است. انقباض ناگهانی، با کاهش جریان‌های جانبی (عرضی) و برگرداندنشان به مسیر اصلی تأثیر مثبت بر فرآیند انتقال آب در لایه انتشار گاز دارد و از همین طریق باعث افزایش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود. پس اضافه کردن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن تأثیر مثبت بر عملکرد پیل دارد.

۳-۸-۴ وجود جریان عرضی بر روی لایه کاتالیزور

در آزمایش اول، تقریباً از تمام سطح لایه کاتالیزور در تماس با مخزن تزریق، سیال خیس نشونده وارد لایه انتشار گاز می‌شود، به‌گونه‌ای که فیلمی از سیال خیس نشونده تقریباً به ضخامت یک سانتی‌متر روی سطح قرار می‌گیرد. این فیلم از سیال خیس نشونده پس از مدتی شروع به حرکت عرضی بر روی لایه کاتالیزور به سمت دیواره‌ها حرکت می‌کند. شکل ۴-۲۰ (الف - د) جهت جریان‌های عرضی بر روی مرز مشترک لایه کاتالیزور و لایه انتشار گاز را نشان می‌دهد. اما در آزمایش‌های دوم و سوم، در حالتی که لایه متخلخل میانی داریم، سیال خیس نشونده در محل‌های خاصی، در مرز مشترک بین لایه متخلخل میکرو و لایه انتشار گاز شروع به پیدایش در لایه انتشار گاز می‌کند، به‌گونه‌ای که این محل‌ها کاملاً از هم جدا و قابل تشخیص هستند. در واقع انگشتی‌های بسیار کوچک درون لایه متخلخل میکرو باهم ادغام شده و انگشتی ایجاد شده در نقطه محل‌های خاص وارد لایه انتشار گاز می‌شود. با مقایسه هر سه آزمایش می‌توان این نتیجه را گرفت که لایه متخلخل میکرو مانع تشکیل جریان‌های عرضی بر روی لایه کاتالیزور می‌شود و انگشتی‌ها را در مسیرهای مستقیم (رو به بالا) وارد لایه انتشار گاز می‌کند و انگشتی‌ها همان مسیرهای مستقیم را برای حرکت در لایه انتشار گاز در پیش می‌گیرند. از این طریق افزودن لایه متخلخل میکرو باعث کاهش فلودینگ آب و بهبود عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴-۲۰- جریان عرضی بر روی لایه کاتالیزور در لایه انتشار گاز در آزمایش اول (الف) ۱۲۵ میلی لیتر تزریق (ب) ۱۳۷/۵ میلی لیتر تزریق (ج) ۱۵۰ میلی لیتر تزریق (د) ۱۶۲/۵ میلی لیتر تزریق

۴-۸-۴ زمان لازم برای رسیدن انگشتی‌ها به کانال گاز

در این قسمت زمان رسید انگشتی‌های مؤثر به کانال گاز را مورد بررسی قرار می‌دهیم. جدول ۴-۲ زمان رسیدن انگشتی‌ها به کانال گاز را برای هر سه آزمایش نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲- زمان رسیدن انگشتی‌های مؤثر به کانال گاز

مدت زمان رسیدن	مدت زمان رسیدن	مدت زمان رسیدن	شرایط آزمایش
سومین انگشتی مؤثر به	دومین انگشتی مؤثر به	اولین انگشتی مؤثر به	
کانال گاز (h)	کانال گاز (h)	کانال گاز (h)	
-	-	۳:۰۷	بدون لایه متخلخل میکرو
۲:۳۰	۲:۱۰	۲:۰۰	با لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی‌متر
۳:۱۰	۲:۳۰	۱:۴۵	با لایه متخلخل میکرو به ضخامت دو سانتی‌متر

با افزایش ضخامت لایه متخلخل میکرو زمان لازم برای رسیدن اولین انگشتی مؤثر به کانال گاز

کاهش می‌یابد. این روند کاهش با افزایش ضخامت لایه متخلخل میکرو به دو سانتی‌متر نیز ادامه دارد. این روند کاهش در دومین انگشتی نیز مشاهده می‌شود. اما در سومین انگشتی روند کاهش مشاهده نشده است. با اضافه کردن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن، شاهد کاهش زمان لازم برای رسیدن انگشتی‌ها به کانال گاز هستیم. این به آن خاطر است که دبی سیال خیس نشونده موجود در انگشتی‌های مؤثر با افزودن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن افزایش یافته است. که به این دلیل است که خیلی از مسیرها در ناحیه متخلخل میانی (لایه متخلخل میکرو) باهم ادغام شده و بعد وارد لایه انتشار گاز شده‌اند. کاهش این زمان باعث تسریع در فرآیند انتقال آب و حذف سریع آب از لایه انتشار گاز می‌شود. در نتیجه باعث بهبود مدیریت آب و افزایش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود.

۴-۸-۵ حجم سیال موجود در لایه انتشار گاز پس از اتمام آزمایش

در انتهای آزمایش پس از آن که ۲۰۰ میلی‌لیتر تزریق تمام شد حجم سیال خارج شده از لایه انتشار گاز را اندازه‌گیری می‌کنیم. بدین صورت که سیال خیس نشونده که در بالای درپوش جمع شده است را توسط سرنگ جمع‌آوری می‌کنیم، و حجم سیال خیس نشونده موجود در سرنگ را اندازه‌گیری کرده و از مقدار کل تزریق (۲۰۰ میلی‌لیتر) کم می‌کنیم. عدد بدست آمده حجم سیال موجود در لایه انتشار گاز را به ما نشان می‌دهد.

در آزمایش اول مدت‌زمان کوتاهی پس از این که انگشتی شماره ۴ به کانال گاز می‌رسد، این انگشتی از کانال جدا شده و قادر به خارج کردن سیال خیس نشونده نیست. بنابراین حجم سیال خیس نشونده در بالای کانال گاز در این حالت صفر است که متناسب با آن حجم سیال خیس نشونده موجود در لایه انتشار گاز پس از پایان آزمایش برابر ۲۰۰ میلی‌لیتر است.

در آزمایش دوم با افزودن لایه متخلخل میکرو به ضخامت یک سانتی‌متر، سه انگشتی مؤثر، وظیفه‌ی

خارج کردن سیال خیس نشونده از لایه انتشار گاز را بر عهده‌دارند. سیال خیس نشونده در این آزمایش به حالت قطره بر روی درپوش شکل گرفته است. با سپری شدن زمان این قطرات شروع به رشد کرده و بزرگ‌تر می‌شوند. رشد حجمی قطرات را در تصاویر شکل ۴-۹ مشاهده کنید. در پایان آزمایش، قطرات ایجادشده را توسط سرنگ جمع‌آوری کرده و حجم آن‌ها را اندازه می‌گیریم، که برابر با ۴۵ میلی‌لیتر است. حجم بدست آمده را از حجم کل کم کرده و مقدار بدست آمده برابر با ۱۵۵ میلی‌لیتر است. بنابراین ۱۵۵ میلی‌لیتر سیال خیس نشونده در انتهای آزمایش در لایه انتشار گاز در آزمایش دوم وجود دارد.

در آزمایش سوم با افزایش ضخامت لایه متخلخل میکرو نیز سه انگشتی عهده‌دار انتقال سیال خیس نشونده به خارج از لایه انتشار گاز هستند. حجم سیال خیس نشونده در بالای درپوش در این حالت برابر با ۵۵ میلی‌لیتر است. این مقدار را از حجم کل کم کرده و مقدار حجم سیال خیس نشونده در لایه انتشار گاز بدست می‌آید که برابر با ۱۴۵ میلی‌لیتر است.

با مقایسه حجم سیال در لایه انتشار گاز در هر سه آزمایش نتیجه می‌گیریم که، افزودن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن باعث کاهش، حجم سیال موجود در این لایه می‌شود. هر چه حجم آب موجود در لایه انتشار گاز کم‌تر باشد، شرایط عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری مناسب‌تر است.

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در این فصل به جمع‌بندی نتایج حاصل از این مطالعه می‌پردازیم و در ادامه پیشنهادهایی برای مطالعات آینده ارائه خواهیم داد.

۵-۲ نتیجه‌گیری

در این تحقیق با تکنیک آشکارسازی نوری و استفاده از یک مدل با لایه انتشار گاز شفاف، رفتار فیزیکی انگشتی‌های ایجاد شده، اثرات وجود لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن را بر مکانیزم رشد و توسعه انگشتی‌ها و تأثیر آن بر عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری بررسی شده است.

در این تحقیق ما با توجه به رفتار حرکتی انگشتی‌ها یک مکانیزم انگشت‌زنی ارائه کردیم که شامل مراحل زیر است:

- توقف رشد در مرحله‌ی ظهور و پیدایش
- توقف رشد در مرحله‌ی ایجاد انگشتی ثانویه
- رشد انگشتی‌ها از قسمت نوک
- تقسیم شدن جریان انگشتی‌ها
- حرکت وارونه انگشتی‌ها
- پیوند انگشتی‌ها
- رسیدن انگشتی‌ها به کانال گاز
- تشکیل حلقه
- انقباض ناگهانی در انگشتی

و این مکانیزم را برای هر آزمایش به‌طور جداگانه بررسی کرده و در نهایت به مقایسه کلی نتایج هر سه آزمایش باهم پرداختیم.

نتایج مشاهدات تجربی نشان داد که پیشروی بعضی از انگشتی‌های ایجادشده در جهت وارونه صورت می‌گیرد که خود بیانگر یکی از ویژگی‌های رژیم انگشتی موئینگی است. یکی دیگر از ویژگی‌های رژیم انگشتی موئینگی انتخاب کردن مسیرهایی با قطر حفره بزرگ‌تر (فشار موئینگی کوچک‌تر) توسط سیال خیس نشونده است، که این پدیده نیز در تمام آزمایش‌های ما مشاهده شده است. همچنین نتایج نشان داد که توقف انگشتی‌ها در هر دو مرحله‌ی ظهور و رشد، تقسیم شدن جریان، تشکیل حلقه و به‌طور خاص جریان وارونه در لایه انتشار گاز باعث افزایش فلودینگ آب و در نتیجه کاهش عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود. انگشتی‌های مؤثر که به کانال گاز می‌رسند وظیفه‌ی خروج سیال از لایه انتشار گاز به کانال گاز را بر عهده‌دارند. همچنین مشخص شد که پدیده انقباض ناگهانی که هنگام رسیدن انگشتی‌های مؤثر به کانال گاز به وقوع می‌پیوندد از طریق حذف مسیرهای جانبی تأثیر مثبت بر فلودینگ آب در لایه انتشار گاز دارد و باعث بهبود عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شود.

در نهایت با تحلیل کلی نتایج بدست آمده از هر سه آزمایش این نتیجه گرفته شد که با افزودن لایه متخلخل میکرو و افزایش ضخامت آن جریان عرضی بر روی لایه کاتالیزور از بین می‌رود و انگشتی‌ها در محل‌های مشخصی بر روی سطح لایه متخلخل میکرو، وارد لایه انتشار گاز می‌شوند. همچنین انگشتی‌ها مسیرهای مستقیمی را برای رسیدن به کانال گاز انتخاب می‌کنند و از این طریق باعث کاهش فلودینگ و بهبود عملکرد پیل سوختی غشای پلیمری می‌شوند.

۳-۵-۳ پیشنهادات

با توجه به مطالب ارائه‌شده در این مطالعه، مواردی که برای بهبود و ادامه‌ی تحقیق پیشنهاد می‌شود به شرح ذیل است:

(الف) مطالعه آزمایش با ایجاد یک محیط متخلخل با هردو ماهیت آب‌گریز و آب‌دوست در لایه انتشار

گاز و بررسی اثرات محل لایه آب دوست در لایه انتشار گاز

(ب) مطالعه آزمایش با ساختاری شبیه‌تر به لایه انتشار گاز واقعی، استفاده از محیط شفاف متخلخل با

ساختاری غیر از ساختار کروی

(ج) مطالعه تأثیر ضخامت‌های بیشتر لایه متخلخل میکرو بر روی لایه انتشار گاز

(د) مطالعه آزمایش با لایه متخلخل میکرو شفاف برای مشاهده پدیده انتقال در این لایه

(ه) مطالعه تأثیر تخلخل‌های مختلف بر روند انتقال سیال در لایه انتشار گاز و لایه متخلخل میکرو

(ز) استفاده از سیستم عکس‌برداری سه‌بعدی برای دریافت جزییات و اطلاعات بیشتر از نحوه حرکت

سیال

(ح) ادامه دادن آزمایش تا رسیدن به حالت توزیع پایدار سیال در لایه انتشار گاز به دلیل این که دبی

تزریق سیال بسیار کم است آزمایش به زمان بسیار زیادی نیاز دارد تا به این حالت برسد

مراجع

- [١] J. Larminie, A. Dicks, and M. S. McDonald, *Fuel cell systems explained* vol. 2: J. Wiley Chichester, UK, 2003.
- [٢] A. Bazylak, "Liquid water visualization in PEM fuel cells: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp. 3845-3857, 2009.
- [٣] H. Sadeghifar, N. Djilali, and M. Bahrami, "Effect of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and micro porous layer (MPL) on thermal conductivity of fuel cell gas diffusion layers: Modeling and experiments," *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 632-64, 2014.
- [٤] P. Das, "Transport phenomena in cathode catalyst layer of PEM fuel cells," 2010.
- [٥] M. Khan, J. Yuan, and B. Sundén, "Numerical simulation of multi-scale transport processes and reactions in pem fuel cells using two-phase models," *Institutionen för värme-och kraftteknik, Tekniska högskolan i Lund*, 2009.
- [٦] T. F. Fuller and J. Newman, "Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 140, pp. 1218-1225, 1993.
- [٧] T. V. Nguyen and R. E. White, "A water and heat management model for Proton-Exchange-Membrane fuel cells," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 140, pp. 2178-2186, 1993.
- [٨] W. He, J. S. Yi, and T. Van Nguyen, "Two-phase flow model of the cathode of PEM fuel cells using interdigitated flow fields," *AIChE Journal*, vol. 46, pp. 2053-2064, 2000.
- [٩] T. Berning, M. Odgaard, and S. K. Kær, "A computational analysis of multiphase flow through PEMFC cathode porous media using the multifluid approach," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 156, pp. B1301-B1311, 2009.
- [١٠] M.-H. Chang, F. Chen, and H.-S. Teng, "Effects of two-phase transport in the cathode gas diffusion layer on the performance of a PEMFC," *Journal of Power Sources*, vol. 160, pp. 268-276, 2006.
- [١١] D. Song, Q. Wang, Z.-S. Liu, and C. Huang, "Transient analysis for the cathode gas diffusion layer of PEM fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 159, pp. 928-942, 2006.
- [١٢] F. Chen, M.-H. Chang, and P.-T. Hsieh, "Two-phase transport in the cathode gas diffusion layer of PEM fuel cell with a gradient in porosity," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 2525-2529, 2008.
- [١٣] L. Chen, H.-B. Luan, Y.-L. He, and W.-Q. Tao, "Pore-scale flow and mass transport in gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell with interdigitated flow fields," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 51, pp. 132-144, 2012.
- [١٤] L. Hao and P. Cheng, "Lattice Boltzmann simulations of water transport in gas

- diffusion layer of a polymer electrolyte membrane fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 3870-3881, 2010.
- [15] P. K. Sinha and C.-Y. Wang, "Pore-network modeling of liquid water transport in gas diffusion layer of a polymer electrolyte fuel cell," *Electrochimica Acta*, vol. 52, pp. 7936-7945, 2007.
- [16] K.-J. Lee, J. H. Nam, and C.-J. Kim, "Pore-network analysis of two-phase water transport in gas diffusion layers of polymer electrolyte membrane fuel cells," *Electrochimica Acta*, vol. 54, pp. 1166-1176, 2009.
- [17] S. Chen and G. D. Doolen, "Lattice Boltzmann method for fluid flows," *Annual review of fluid mechanics*, vol. 30, pp. 329-364, 1998.
- [18] P. P. Mukherjee, C.-Y. Wang, and Q. Kang, "Mesoscopic modeling of two-phase behavior and flooding phenomena in polymer electrolyte fuel cells," *Electrochimica Acta*, vol. 54, pp. 6861-6875, 2009.
- [19] Y. Tabe, Y. Lee, T. Chikahisa, and M. Kozakai, "Numerical simulation of liquid water and gas flow in a channel and a simplified gas diffusion layer model of polymer electrolyte membrane fuel cells using the lattice Boltzmann method," *Journal of Power Sources*, vol. 193, pp. 24-31, 2009.
- [20] H. Liu, A. J. Valocchi, Q. Kang, and C. Werth, "Pore-scale simulations of gas displacing liquid in a homogeneous pore network using the lattice Boltzmann method," *Transport in porous media*, vol. 99, pp. 555-580, 2013.
- [21] K. N. Kim, J. H. Kang, S. G. Lee, J. H. Nam, and C.-J. Kim, "Lattice Boltzmann simulation of liquid water transport in microporous and gas diffusion layers of polymer electrolyte membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 278, pp. 703-717, 2015.
- [22] M. Ji and Z. Wei, "A review of water management in polymer electrolyte membrane fuel cells," *Energies*, vol. 2, pp. 1057-1106, 2009.
- [23] J. H. Kang, K.-J. Lee, J. H. Nam, C.-J. Kim, H. S. Park, S. Lee, *et al.*, "Visualization of invasion-percolation drainage process in porous media using density-matched immiscible fluids and refractive-index-matched solid structures," *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 2608-2612, 2010.
- [24] X. Yang, F. Zhang, A. Lubawy, and C. Wang, "Visualization of liquid water transport in a PEFC," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 7, pp. A408-A411, 2004.
- [25] F. Zhang, X. Yang, and C. Wang, "Liquid water removal from a polymer electrolyte fuel cell," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 153, pp. A225-A232, 2006.
- [26] S. Litster, D. Sinton, and N. Djilali, "Ex situ visualization of liquid water transport in PEM fuel cell gas diffusion layers," *Journal of Power Sources*, vol. 154, pp. 95-105, 2006.
- [27] U. Pasaogullari and C. Wang, "Liquid water transport in gas diffusion layer of polymer electrolyte fuel cells," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 151, pp. A399-A406, 2004.
- [28] T.-L. Liu and C. Pan, "Visualization and back pressure analysis of water transport through gas diffusion layers of proton exchange membrane fuel cell,"

- Journal of Power Sources*, vol. 207, pp. 60-69, 2012.
- [۲۹] N. Pekula, K. Heller, P. Chuang, A. Turhan, M. Mench, J. Brenizer, *et al.*, "Study of water distribution and transport in a polymer electrolyte fuel cell using neutron imaging," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 542, pp. 134-141, 2005.
- [۳۰] M. Hickner, N. Siegel, K. Chen, D. Hussey, D. Jacobson, and M. Arif, "In situ high-resolution neutron radiography of cross-sectional liquid water profiles in proton exchange membrane fuel cells," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 155, pp. B427-B434, ۲۰۰۸ ,
- [۳۱] P. K. Sinha, P. Halleck, and C.-Y. Wang, "Quantification of liquid water saturation in a PEM fuel cell diffusion medium using X-ray microtomography," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 9, pp. A344-A348, 2006.
- [۳۲] C. Hartnig, I. Manke, R. Kuhn, N. Kardjilov, J. Banhart, and W. Lehnert, "Cross-sectional insight in the water evolution and transport in polymer electrolyte fuel cells," *Applied Physics Letters*, vol. 92, p. 134106, 2008.
- [۳۳] B. Gao, T. S. Steenhuis, Y. Zevi, J.-Y. Parlange, R. N. Carter, and T. A. Trabold, "Visualization of unstable water flow in a fuel cell gas diffusion layer," *Journal of Power Sources*, vol. 190, pp. 493-498, 2009.
- [۳۴] Z. Qi and A. Kaufman, "Improvement of water management by a microporous sublayer for PEM fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 109, pp. 38-46, 2002.
- [۳۵] T. Kitahara, T. Konomi, and H. Nakajima, "Microporous layer coated gas diffusion layers for enhanced performance of polymer electrolyte fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol , ۱۹۵ .pp. 2202-2211, 2010.
- [۳۶] P. Ghosh, "Associate Professor Department of Chemical Engineering IIT Guwahati, Guwahati-781039 India".
- [۳۷] M. Kaviany, *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, Second Edition. ed. New York, NY: Springer New York, 199۰.۵
- [۳۸] A. El-kharouf, T. J. Mason, D. J. Brett, and B. G. Pollet, "Ex-situ characterisation of gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 218, pp. 393-404, 2012.
- [۳۹] D. Shou, Y. Tang, L. Ye, J. Fan, and F. Ding, "Effective permeability of gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 10519-10526, 2013.
- [۴۰] R. Lenormand, E. Touboul, and C. Zarcone, "Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media," *Journal of fluid mechanics*, vol. 189, pp. 165-187, 1988.

Abstaract

Fuel cells have drawn incredible attention as a promising candidate for the power generation technology, particularly in the last decades. The promise of high energy efficiencies and near-zero pollution, make fuel cell an ideal nominee for power generation in transportation systems. In Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), heat and water are generated as a side-production. The accumulated water leads to a decrease in PEMFCs efficiency; therefore, water has to be removed and flooding has to be prevented. In this study, by an experimental model and implementation of transparent Gas-Diffusion Layer (GDL), water transport in PEMFC is visualized and the fingering mechanisms in GDL are studied. and Effect of added Micro Porous Layer (MPL) on water flooding in GDL has been also examined. Results show the characteristics of the two-phase regime in GDL are similar to the capillary fingering. Moreover; the fingers inside the GDL are generated by the capillary forces. In addition, it is observed that lateral flow on the Catalyst Layer (CL) leads to an increase in water flooding in GDL in which PEMFC efficiency is decreased. The our observations show that by inserting MPL, lateral flow on CL terminated and the fingers at preferential location on MPL surface in GDL appear and grow. The fingers also select direct pathes to approach gas channel. In this way, it leads to descend in water flooding and reform of PEM efficiency.

Keywords: Polymer electrolyte membrane fuel cell, Gas-diffusion layer, Capillary fingering, Water transport, Non non-wetting fluid, Micro porous layer



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy System Engineering

**Experimental study of water flooding in Polymer Electrolyte Membrane Fuel
cell**

By: Mehran Afra

Supervisor:

Mohsen Nazari

Mohammad Hasan Kayhani

February ۲۰۱۷