

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

مدلسازی و شبیه سازی پدیده خوردگی سایشی در لوله های فولادی حاوی سیال

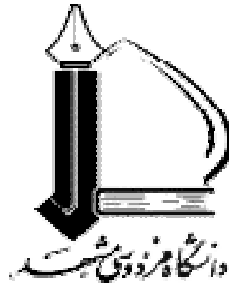
پایان نامه کارشناسی ارشد پدیده های انتقال و جداسازی

فاطمه اکبرنژاد نشلی

استاد راهنما

دکتر ناصر ثقه الاسلامی

۱۳۹۰



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی (پدیده های انتقال و جداسازی) خانم فاطمه اکبرنژاد نشلی

تحت عنوان

مدلسازی و شبیه سازی پدیده خوردگی سایشی در لوله های فولادی حاوی سیال

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۶/۳۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر ناصر ثقه الاسلامی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر محمد مزینانی

۲- استاد داور خارجی

دکتر جواد سرگلزایی

۳- استاد داور داخلی و نماینده تحصیلات تکمیلی

دکتر مهدی پورافشاری چنار

مدیر گروه مهندسی شیمی

در اینجا لازم می‌دانم از زحمات و راهنمایی‌های استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر ثقه الاسلامی برای به ثمر رسیدن این پروژه تشکر و

قدردانی نمایم.

و همچنین

از تمامی دوستانی که در به ثمر رسیدن این پروژه سهم بوده‌اند کمال تشکر را دارم...

به راه بادیه رفتن به از نشستن باطل

که کرم را دنیا بجم به قدر وسع بگو شتم

اینجانب **فاطمه اکبرنژاد نشلی** دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پایان نامه: **مدلسازی و شبیه سازی پدیده خوردگی سایشی در لوله های فولادی حاوی سیال**، تحت راهنمایی **آقای دکتر ناصر تقه الاسلامی** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از این نتایج محققان دیگر به مرجع مورد استفاده 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 فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه فردوسی مشهد» و یا «Ferdowsi University of Mashhad» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های 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 است، اصل رازداری 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 افزارها و تجهیزات ساخته) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شده است.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم به آنان که وجودشان مایه آرامش است...

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
سیزده	فهرست اشکال و نمودارها
شانزده	فهرست جداول
هفده	فهرست علائم
۱	چکیده

فصل اول : مقدمه و تاریخچه پدیده خوردگی سایشی

۱	۱-۱) مقدمه
۲	۲-۱) مروری بر کارهای گذشته

فصل دوم : کلیات خوردگی

۴	۱-۲) تعریف خوردگی
۴	۲-۲) محیط‌های خوردنده
۵	۳-۲) خسارات ناشی از خوردگی
۵	۴-۲) طبقه بندی خوردگی
۶	۵-۲) اصول خوردگی
۸	۶-۲) روشهای بیان سرعت خوردگی
۸	۷-۲) جنبه‌های الکتروشیمیایی خوردگی
۱۱	۸-۲) پولاریزاسیون
۱۲	۱-۸-۲) پولاریزاسیون اکتیواسیون
۱۲	۲-۸-۲) پولاریزاسیون غلظتی
۱۳	۹-۲) رویین شدن یا غیر فعال شدن

- ۱۰-۲) اثرات فاکتورهای محیطی روی سرعت خوردگی ۱۶
- ۱-۱۰-۲) اثر اکسیژن و اکسید کننده ها ۱۶
- ۲-۱۰-۲) اثرات سرعت حرکت ۱۶
- ۳-۱۰-۲) اثر درجه حرارت ۱۶
- ۴-۱۰-۲) اثرات غلظت محیط خورنده ۱۷
- ۵-۱۰-۲) اثر اتصال گالوانیکی ۱۸
- ۶-۱۰-۲) تاثیر گازهای محلول در آب ۱۹
- ۱۱-۲) تئوری خوردگی در محیط آبی ۲۰
- ۱۲-۲) ملاحظات ترمودینامیکی واکنش های خوردگی ۲۲
- ۱۳-۲) اساس پیل خوردگی در محیط آبی ۲۳
- ۱۴-۲) سینتیک واکنش های خوردگی ۲۵
- ۱۵-۲) فرایند نفوذ و لایه دوگانه ۳۰
- ۱۶-۲) روش های کنترل خوردگی ۳۳
- ۱-۱۶-۲) استفاده از سطوح محافظ و پوشش ها ۳۳
- ۲-۱۶-۲) استفاده از اتصالات عایق ۳۳
- ۳-۱۶-۲) حفاظت کاتدی (بهترین روش کنترل خوردگی) ۳۳
- ۱۷-۲) انواع خوردگی ۳۵
- ۱-۱۷-۲) خوردگی یکنواخت ۳۵
- ۲-۱۷-۲) خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی ۳۶
- ۳-۱۷-۲) خوردگی شیاری ۳۷
- ۴-۱۷-۲) خوردگی حفره ای ۳۷
- ۵-۱۷-۲) خوردگی بین دانه ای ۳۸
- ۶-۱۷-۲) جدایش انتخابی ۳۸

۳۹	..... خوردگی توأم با تنش (SCC) (۷-۱۷-۲)
۴۰	..... خسارت هیدروژنی (۸-۱۷-۲)
۴۲	..... خوردگی سایشی (۹-۱۷-۲)

فصل سوم: معرفی نرم افزار COMSOL Multiphysics

۵۱	..... مقدمه (۱-۳)
۵۲	..... تاریخچه ی COMSOL Multiphysics (۲-۳)
۵۵	..... محیط نرم افزار COMSOL Multiphysics 3.4 (۳-۳)
۵۵	..... Model Navigator صفحه ی (۱-۳-۳)
۵۸	..... COMSOL مدول های (۲-۳-۳)
۶۴	..... واسط گرافیکی کاربر (GUI) در COMSOL MULTIPHYSICS 3.4 (۳-۳-۳)
۷۴	..... ایجاد هندسه ی فرایند (۴-۳-۳)
۸۰	..... تعیین خصوصیات فیزیک مورد بررسی (۵-۳-۳)
۸۸	..... ساخت شبکه (Meshing) (۶-۳-۳)
۹۲	..... تعیین Solver (۷-۳-۳)
۹۵	..... پس پردازش (Post Processing) (۸-۳-۳)
۹۶	..... تهیه ی گزارش شبیه سازی (۹-۳-۳)

فصل چهارم: بررسی سیالاتی جریان در لوله ها

۹۵	..... مقدمه (۱-۴)
۹۵	..... انواع جریان (۲-۴)
۹۵	..... جریان لایه ای (۱-۲-۴)
۹۵	..... جریان متلاطم (۲-۲-۴)
۹۶	..... عدد رینولدز و گذار از جریان لایه ای به جریان متلاطم (۳-۲-۴)
۹۹	..... ماهیت تلاطم (۴-۲-۴)

- ۳-۴) لایه های مرزی ۹۷
- ۱-۳-۴) جریان لایه ای و متلاطم در لایه های مرزی ۹۷
- ۲-۳-۴) تشکیل لایه مرزی در لوله های مستقیم ۹۹
- ۴-۴) جریان سیالات تراکم ناپذیر در لوله ها و کانال ها ۹۹
- ۱-۴-۴) تنش برشی و اصطکاک جدار در لوله ها ۱۰۲
- ۲-۴-۴) جریان لایه ای در لوله ها و کانال ها ۱۰۳
- ۳-۴-۴) جریان متلاطم در لوله ها و کانال ها ۱۰۶

فصل پنجم: مدل سازی و شبیه سازی فرایند Erosion - Corrosion در لوله انبساطی - انقباضی

- ۱-۵) مقدمه ۱۰۸
- ۲-۵) توصیف مدل مورد بررسی ۱۰۹
- ۳-۵) مدل سازی فرایند خوردگی - سایشی ۱۱۲
- ۴-۵) مدل سازی جریان دو فازی ۱۱۷
- ۱-۴-۵) فرضیات مسئله ۱۱۷
- ۲-۴-۵) معادلات حاکم بر مسئله ۱۱۷
- ۱-۲-۴-۵) معادلات مومنتم ۱۱۷
- ۲-۲-۴-۵) معادلات شرایط مرزی انتقال مومنتم ۱۱۸
- ۳-۲-۴-۵) معادله انتقال جرم حاکم بر مسئله ۱۲۰
- ۴-۲-۴-۵) معادلات شرایط مرزی انتقال جرم ۱۲۰
- ۳-۴-۵) شرایط اولیه ۱۲۰
- ۴-۴-۵) تحلیل نتایج و نمودارها ۱۲۴

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱-۶) نتیجه گیری ۱۲۶
- ۲-۶) پیشنهادات ۱۲۷

پیوست ۱

مراحل گام به گام شبیه سازی مدل مورد بررسی توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics

- ۱-۱) تعریف معادلات حاکم بر فرایند و انتخاب بعد فضایی سیستم..... ۱۲۸
- ۲-۱) تعریف هندسه سیستم..... ۱۲۹
- ۳-۱) تعیین شرایط مرزی..... ۱۳۰
- ۴-۱) تعیین خواص فیزیکی سیال..... ۱۳۱
- ۵-۱) شبکه بندی هندسه (Meshing)..... ۱۳۲
- ۶-۱) انتخاب solver و حل سیستم مورد بررسی..... ۱۳۳
- ۷-۱) نتایج شبیه سازی..... ۱۳۴
- ۸-۱) رسم نمودار خوردگی..... ۱۳۸
- مراجع..... ۱۴۰

فهرست اشکال و نمودارها

- شکل ۱-۲. فاکتورهای موثر در انتخاب مواد مهندسی ۶
- شکل ۲-۲. فاکتورهای موثر بر مقاومت خوردگی فلز ۷
- شکل ۳-۲. واکنش احیاء هیدروژن که تحت تاثیر پولاریزاسیون اکتیواسیون قرار دارد ۹
- شکل ۴-۲. واکنش های الکترو شیمیایی خورده شدن فلز روی در اسید کلریدریک عاری از هوا ۱۲
- شکل ۵-۲. پولاریزاسیون غلظتی در مرحله احیاء هیدروژن ۱۳
- شکل ۶-۲. سرعت خوردگی فلز بر حسب اکسیدکنندگی محلول (پتانسیل الکتروود) ۱۴
- شکل ۷-۲. رفتار خوردگی فلزی که دارای انتقال فعال - غیر فعال است بر حسب قدرت اکسیدکنندگی محلول ۱۵
- شکل ۸-۲. تاثیر درجه حرارت بر سرعت خوردگی ۱۷
- شکل ۹-۲. تاثیر غلظت محیط خورنده بر سرعت خوردگی ۱۷
- شکل ۱۰-۲. واکنش های الکترو شیمیایی که روی کوپل گالوانیکی روی و پلاتین اتفاق می افتد ۱۹
- شکل ۱۱-۲. نمودار ترمودینامیکی انرژی برای فلزات و ترکیبات آن ها ۲۱
- شکل ۱۲-۲. اساس پیل خوردگی در محیط آبی ۲۵
- شکل ۱۳-۲. منحنی انرژی برای مس و یون آن در آب خالص در شرایط ۲۶
- شکل ۱۴-۲. لایه دوگانه ۲۸
- شکل ۱۵-۲. تغییرات غلظت آنیون ها بر حسب فاصله از کاتد ۳۱
- شکل ۱۶-۲. حفاظت کاتدی یک تانک زیرزمینی با استفاده از روش اعمال جریان خارجی ۳۴
- شکل ۱۷-۲. تاول زدن هیدروژن ۴۰
- شکل ۱۸-۲. خوردگی سایشی پروانه پمپ از جنس فولاد زنگ نزن ۴۳
- شکل ۱۹-۲. شکل شماتیکی خوردگی سایشی دیواره لوله کندانسور ۴۳
- شکل ۱-۳. ترسیم اشکال با هندسه متقارن در GUI ۵۶
- شکل ۲-۳. صفحه ی Model Navigator ۵۶
- شکل ۳-۳. واسط گرافیکی کاربر دو بعدی ۶۴

- شکل ۳-۴. واسط گرافیکی کاربر سه بعدی ۶۵
- شکل ۳-۵. نوار ابزار اصلی (Main toolbar) ۶۸
- شکل ۳-۶. کلیدهای میان بر فایل ۶۸
- شکل ۳-۷. کلیدهای میان بر ویرایش و انتخاب ۶۹
- شکل ۳-۸. کلیدهای میان بر حل، مش و رسم نمودار ۶۹
- شکل ۳-۹. کلیدهای میان بر بزرگنمایی ۷۰
- شکل ۳-۱۰. کلیدهای میان بر GUI و Help ۷۰
- شکل ۳-۱۱. کلید های نوار ابزار رسم (Draw toolbar) در طراحی دو بعدی ۷۱
- شکل ۳-۱۲. کلید های نوار ابزار رسم (Draw toolbar) در طراحی سه بعدی ۷۳
- شکل ۳-۱۳: تنظیم محورها در فضای یک بعدی ۷۴
- شکل ۳-۱۴: تنظیم محورها در فضای دو بعدی ۷۵
- شکل ۳-۱۵: تنظیم محورها در فضای سه بعدی ۷۵
- شکل ۳-۱۶. تنظیمات تقسیم بندی محورها ۷۶
- شکل ۳-۱۷. نوار ابزار Visual ۷۷
- شکل ۳-۱۸. نحوه ی دسترسی به زبانه ی Physics ۷۹
- شکل ۳-۱۹. تنظیمات Subdomain ۸۰
- شکل ۳-۲۰. صفحه ی Material/Coefficient Library ۸۰
- شکل ۳-۲۱. صفحه ی تعیین شرایط مرزی مدل ۸۱
- شکل ۳-۲۲. صفحه ی Model Setting و انتخاب سیستم ابعادی ۸۵
- شکل ۳-۲۳. زبانه ی Mesh در نرم افزار COMSOL Multiphysics ۸۶
- شکل ۳-۲۴. نتایج حاصل از کشش المان های چهارضلعی و ایجاد المان های مکعبی ۸۷
- شکل ۳-۲۵. صفحه ی Free Mesh Parameters و تعیین روش تصحیح ۸۸
- شکل ۳-۲۶. جعبه ی گفتگوی Solver Parameters ۹۱

۹۳	.....	شکل ۳-۲۷. منوی Report Generator
۹۷	.....	شکل ۴-۱. لایه مرزی پرانتل
۹۸	.....	شکل ۴-۲. رشد لایه مرزی متلاطم روی صفحه تخت
۹۹	.....	شکل ۴-۳. رشد لایه مرزی در لوله شکل
۱۰۰	.....	شکل ۴-۴. المان سیال در جریان پایا در لوله
۱۰۱	.....	شکل ۴-۵. تغییرات تنش برشی در لوله
۱۰۴	.....	شکل ۴-۶. توزیع سرعت در لوله
۱۱۰	.....	شکل ۵-۱. واحد آزمایشگاهی سیستم مورد بررسی
۱۱۰	.....	شکل ۵-۲. شماتیک و مشخصات هندسه مورد بررسی
۱۱۵	.....	شکل ۵-۳. سطح مقطع یک لوله در معرض خوردگی و سایش
۱۲۳	.....	شکل ۵-۴. نمودار شبیه سازی نرخ خوردگی بر حسب طول لوله
۱۲۳	.....	شکل ۵-۵. نمودار شبیه سازی نرخ خوردگی بر حسب طول لوله
۱۲۴	.....	شکل ۵-۶. مقایسه نتایج نرخ خوردگی سایشی حاصل از شبیه سازی و نتایج تجربی در سیستم مورد بررسی

فهرست جداول

جدول ۳-۱. توابع ریاضی و ثوابت	۸۲
جدول ۳-۲. Solver های نرم افزار COMSOL Multiphysics	۹۰
جدول ۳-۳. Solver های خطی نرم افزار COMSOL Multiphysics	۹۲
جدول ۵-۱. خواص فیزیکی سیال مورد بررسی	۱۱۱
جدول ۵-۲. شرایط عملیاتی سیستم مورد بررسی	۱۱۱
جدول ۵-۳. مقادیر ثابت های معادله $k-\epsilon$	۱۱۸
جدول ۵-۴. شرایط مرزی اعمال شده	۱۲۱
جدول ۵-۵. نتایج شبیه سازی و سرعت های خوردگی ، سایش و مجموع آن ها	۱۲۲

فهرست علائم

G: انرژی آزاد

ΔG : تغییر انرژی آزاد

ΔG^{++} : تغییرات انرژی آزاد فعالیت

E: پتانسیل (ولت)

E° : پتانسیل در شرایط استاندارد

i: شدت جریان (مقدار جریان در واحد سطح) ($m^2 / \text{آمپر}$)

i_{\max} : حداکثر سرعت جریان

i_a : سرعت واکنش آندی

i_c : سرعت واکنش کاتدی

Z: تعداد الکترونهاى جابجا شده در واکنش

ρ : دانسیته مخلوط (kg/m^3)

ρ_d : دانسیته ذرات (kg/m^3)

ϕ_d : کسر حجمی مخلوط (بی بعد)

u^* : سرعت اصطکاکی

u^+ : نسبت بی بعد سرعت (u/u^*)

y: فاصله شعاعی از دیواره (m)

y^+ : فاصله بی بعد از دیواره

β_a : ضریب تصحیح تکانه در نقطه a (بدون بعد)

β_b : ضریب تصحیح تکانه در نقطه b (بدون بعد)

Δp_s : افت فشار ناشی از اصطکاک جدار

k : انرژی جنبشی توربولانسی

ε : نرخ اتلاف توربولانسی

I_T : شدت توربولانسی

L_T : طول آشفتگی (m)

U_{slip} : سرعت لغزش ذرات جامد

η : ویسکوزیته مخلوط (kg/m.s)

η_c : ویسکوزیته دینامیک فاز مایع (kg/m.s)

h_f : اتلاف اصطکاکی (j/kg)

h_{fs} : اصطکاک جدار (j/kg)

τ_w : تنش برشی در دیواره لوله (N/m^2)

Re : عدد رینولدز (بدون بعد)

Z_a و Z_b : ارتفاع بالای صفحه مبنا در نقطه a و b (m)

C_μ ، σ_K ، σ_T ، $C\varepsilon_2$ ، $C\varepsilon_1$: ثوابت بی بعد معادله $k-\varepsilon$

ϕ_{max} : ماکزیمم غلظت انباشتگی فاز جامد

چکیده

خوردگی یکی از مشکلات عمده در صنایع مختلف به شمار می آید و سالانه مبالغ هنگفتی را به خود اختصاص می دهد. این پدیده با از بین بردن فلزات و به همراه داشتن زیان های اقتصادی ، منابع معدنی و سرمایه های ملی را به هدر داده و در مواردی که منجر به نشت گازها و مواد سمی از درون لوله ها و مخازن می شود سلامت و امنیت جانی مردم را به مخاطره می افکند. در تحقیق حاضر با توجه به هزینه های زیاد مطالعات آزمایشگاهی، از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۱ برای پیش بینی میزان نرخ خوردگی سایشی^۲ در لوله های فولادی حاوی سیال ، استفاده شده است . در این تحقیق ، برای پیش بینی نرخ خوردگی سایشی در یک هندسه انقباضی - انبساطی ، ابتدا یک مدل برای پیش بینی نرخ خوردگی^۳ و یک مدل برای پیش بینی نرخ سایش^۴ ارائه شده و سپس مدل توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics شبیه سازی شده است. برای شبیه سازی ، مدل به صورت متقارن محوری^۵ در نظر گرفته شده و در آن با حل همزمان دو پدیده انتقال جرم و مومنتم ، دو پارامتر غلظت ماده خوردنده و سرعت ذرات در لایه مرزی محاسبه شده است. مقایسه نتایج حاصل با داده های آزمایشگاهی موجود در بازه عدد رینولدز ۱۷۰۰۰۰ تا ۳۴۰۰۰۰ انطباق خوبی از نتایج را در بخش انبساطی نشان می دهد. لذا با توجه به هزینه کم محاسبات و قابل اطمینان بودن و دقت این روش ، می توان از آن برای محاسبه میزان نرخ خوردگی سایشی در لوله ها استفاده نمود.

کلمات کلیدی: خوردگی سایشی ، دینامیک سیالات محاسباتی ، هندسه انبساطی - انقباضی ، شبیه سازی

¹ Computational Fluid Dynamic

² Wear Rate

³ Corrosion

⁴ Erosion

⁵ Axisymmetric

فصل اول

مقدمه و تاریخچه پدیده خوردگی سایشی

۱-۱) مقدمه

خوردگی را تخریب یا فاسد شدن یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد تعریف می‌کنند. خوردگی را می‌توان به انواع مختلفی تقسیم بندی کرد. خوردگی سایشی یکی از انواع مهم خوردگی بوده و عبارت است از سرعت یافتن یا افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفتن یک فلز در اثر حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز. معمولاً این حرکت خیلی سریع است و اثرات سایش مکانیکی و یا ساییده شدن وجود دارد. یون‌های فلزی حل شده روی سطح فلز در اثر حرکت روی سطح باقی نمی‌مانند، یا محصولات جامد حاصل از خوردگی از سطح فلز به طریقه مکانیکی کنده می‌شوند. این پدیده در محیط‌های محلول، پدیده پیچیده‌ای می‌باشد که مقدار آن به عوامل زیر بستگی دارد:

- ماده مورد نظر: سختی^۱، چقرمگی^۲، افزودنی‌های آلیاژی^۳، مدول الاستیکی^۴، عملیات حرارتی^۵
- ذرات جامد موجود در محلول: سرعت، اندازه، شکل، دانسیته، زاویه برخورد، سختی
- شرایط جریان: سرعت، عدد رینولدز
- محیط خورنده: pH، پتانسیل الکتروشیمیایی، حضور یون‌هایی مانند کلر، ویسکوزیته، فشار و دمای محیط خورنده

¹ Hardness

² Toughness

³ Alloying additions

⁴ Elastic modulus

⁵ Heat treatment