بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين الرحمن الرحيم مالك يوم الدين
اهدنا الصراط المستقيم صراط الذين
انعمت عليهم غير المغضوب عليهم
ولا الضالين

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای احسان سوری رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان تحلیل تجربی ناپایداری جریان خروجی دای در فرآیند اکستروژن کامپوزیت چوب-پلاستیک** در تاریخ ۱۳۹۱/۳/۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک - ساخت وتولید پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر امیر حسین بهروش	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر علی حق طلب	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمد گلزار	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدحسین صادقی	استاد	
استاد ناظر	دکتر فرهاد شریف	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر کارن ابری نیا	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمدحسین صادقی	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمد گلزار	دانشیار	

آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی-پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلا به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکترای احسان سوری در رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر امیرحسین بهروش و مشاوره جناب آقای دکتر علی حق‌طلب از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتاب‌های عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب احسان سوری دانشجوی رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید مقطع دکترای تخصصی تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: احسان سوری

تاریخ و امضا:

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب احسان سوری دانشجوی رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۶-۸۷ مقطع دکترای تخصصی دانشکده فنی و مهندسی متعهد می شوم کلِیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم.»

امضا:

تاریخ:

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

رساله دکترای مهندسی مکانیک- ساخت و تولید

تحلیل تجربی ناپایداری جریان خروجی دای در فرآیند اکستروژن کامپوزیت چوب-پلاستیک

احسان سوری

استاد راهنما:

دکتر امیرحسین بهروش

استاد مشاور:

دکتر علی حق‌طلب

خرداد ۹۱

تقدیم به

دخترم شادان

تشکر و قدردانی:

بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌شائبه‌ی اساتید محترم جناب آقای دکتر بهروش و جناب آقای دکتر حق‌طلب که از ابتدای کار تا پایان با حمایت‌ها و دقت نظر خود موجب به نتیجه رسیدن این کار تحقیقی شدند سپاسگزاری کنم.

از همسر عزیزم خانم مهندس قشلاقی که در تمامی لحظات زندگی، به ویژه در مسیر گذراندن دوره دکترا و انجام رساله، حامی و مشوق من بوده و با صبرش این مسیر دشوار را هموار کرده است تشکر ویژه و صمیمانه دارم و از اینکه در این دوره نتوانستم به طور شایسته در کنار او و دختر عزیزم شادان باشم از آنها دلجویی می‌نمایم.

شایسته است از حمایت‌های همه جانبه خانواده خود و همسرم که همیشه حامی و راهنمای من در طول زندگی بوده‌اند، بسیار قدردانی نمایم.

قدردانی دیگر من از جناب آقای دکتر ناتان جعفریان جم، دوست صمیمی بنده است که جز با همیاری، راهنمایی و تلاش ایشان این کار تحقیقی به ثمر نمی‌نشست.

از دوستان و اساتید عزیزی که در مسیر ساخت تجهیزات و انجام آزمون‌ها اینجانب را یاری رسانده‌اند بسیار سپاسگزارم: آقایان مهندس عدلی، رفیعی‌نیا، محمدی، بیات، قاسمی و بویژه استاد گرامی جناب آقای دکتر گاوس ریزوی.

در نهایت از راهنمایی‌ها و حمایت‌های اعضای گروه تکنوپلاست مدرس که در همه مراحل اجرای کار یاریگر بنده بودند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده:

در این رساله دکتری به بررسی ناپایداری‌های جریان به وجود آمده در تولید قطعات اکسترودی کامپوزیت چوب-پلاستیک پرداخته شده است. ناپایداری‌های جریان موجب تولید قطعات با کیفیت سطح نامناسب و نیز کاهش سرعت تولید می‌شود و مشکلاتی را برای تولید قطعات اکسترودی بوجود می‌آورد. برای انجام این بررسی از دو نوع پلی‌پروپیلن و یک نوع پلی‌اتیلن سنگین برای ساخت ترکیباتی از این کامپوزیت استفاده شد و با انتخاب مقاطع بزرگ پروفیل دایروی، روند تحقیق به مقیاس کار تولید واقعی نزدیک‌تر گردید. تعداد زیادی نمونه به کمک طراحی آزمایش تولید شده و آزمون‌های مختلفی در هنگام تولید و پس از تولید روی قطعات انجام گردید. متغیرهای فرآیند اکستروژن شامل درصد چوب، سرعت ماردون، دمای مذاب، قطر دای، نسبت طول دنباله به قطر دای و شاخص جریان‌پذیری پلیمر بوده و اندازه‌گیری‌ها شامل فشار دای و سرعت خروج مواد و آزمون‌ها شامل زبری سطح قطعات، میزان جذب آب و همچنین DSC (گرماسنجی تفاضلی) و رئولوژی بودند. در ادامه اثر هرکدام از متغیرهای مستقل فرآیند بر روی پارامتر مورد نظر بررسی گردید. با استفاده از برخی از روابط تئوری، پیش‌بینی فشار دای و نیز تنش برشی روی دیواره بدست آمد که برای پیش‌بینی کیفیت سطح به عنوان معیاری از ناپایداری جریان استفاده می‌شود. نتیجه کلی بدست آمده از این بررسی‌ها این است که در تنش‌های برشی بزرگ‌تر از یک مقدار مشخص (در اینجا ۰.۳ مگا پاسکال) روی دیواره، قطعه خروجی با کیفیت سطح کاملا مطلوب بدست می‌آید. برای بررسی صحت فرضیه‌های ارائه شده برای مقاطع دایروی، از یک دای با مقطع مستطیل شکل استفاده شد و به کمک طراحی آزمایش جداگانه، پروفیل‌هایی تولید و آزمون‌های کیفیت سطح بر روی قطعات انجام گردید. نتایجی که برای دای با مقطع مستطیلی بدست آمد کاملا با نتایج دای‌های دایروی همخوانی داشت. پس از انجام همه آزمون‌ها و بررسی‌های تئوری مشخص گردید که در تنش برشی روی دیواره بالاتر از ۰.۳ مگا پاسکال پروفیل‌های با کیفیت سطح کاملا مطلوب قابل تولید هستند.

واژگان کلیدی: کامپوزیت چوب-پلاستیک، دای اکستروژن، رئولوژی، ناپایداری جریان، پلاستیک

فهرست مطالب

فصل ۱ : مقدمه ۱

۱-۱ پیش‌زمینه ۲

۱-۲ ساختار رساله ۴

۱-۳ پیشینه پژوهش ۴

۱-۴ اهداف و نوآوری‌ها ۱۷

۱-۵ تعاریف و توضیحات پایه‌ای ۲۰

۱-۵-۱ لغزش دیواره ۲۰

۱-۵-۲ پارگی سطحی در اکستروژن ۲۱

۱-۵-۳ پدیده لغزیدن-چسبیدن ۲۴

۱-۵-۴ اندازه‌گیری کیفیت سطح و ارتباط آن با ناپایداری جریان ۲۶

۱-۵-۵ رئولوژی و رئومتری ۲۸

۱-۵-۶ روش‌های مرسوم محاسبه لغزش ۳۵

۱-۵-۷ توجیه ملکولی خطای لغزش ۳۸

فصل ۲ : آزمایش ۴۱

۲-۱ طراحی آزمایش ۴۲

۲-۲ آزمایش‌های انجام شده ۴۳

۲-۲-۱ آزمون کیفیت سطح ۴۳

۲-۲-۲ آزمون جذب آب ۴۸

۲-۲-۱ آزمون بررسی گرماسنجی تفاضلی (DSC) ۴۸

۲-۲-۲ آزمون‌های رئولوژی ۴۸

۲-۲-۳ سایر اندازه‌گیری‌ها ۵۲

۲-۳ مواد مصرفی ۵۲

۲-۳-۱ چوب ۵۲

۲-۳-۲ پلی‌پروپیلن ۵۳

۲-۳-۳ پلی‌اتیلن ۵۴

۲-۴ تجهیزات ۵۵

۲-۴-۱ اکسترودر ۵۵

۲-۴-۲ دای‌های اکستروژن دایره‌ای ۵۶

۲-۴-۳ دای اکستروژن مستطیل شکل ۵۷
۲-۴-۱ فیدرها و خشک‌کن چوب ۵۸
۲-۴-۲ همزن‌ها ۶۰
۲-۴-۳ سنسورهای فشار-دما ۶۱
۲-۴-۴ دستگاه زبری‌سنج ۶۲
۲-۴-۵ دوربین کیفیت بالا ۶۳
۲-۴-۶ ترازوی دقیق و دستگاه اندازه‌گیری چگالی ۶۴
۲-۴-۱ دستگاه DSC ۶۴
۲-۴-۲ رئومتر چرخشی ۶۵
فصل ۳ : نتایج و بحث ۶۶
۳-۱ نتایج آزمون کیفیت سطح ۶۷
۳-۲ نتایج آزمون جذب آب ۷۲
۳-۲-۱ تاثیر کیفیت سطح بر جذب آب ۷۴
۳-۱ نتایج آزمون DSC ۷۶
۳-۲ نتایج آزمون‌های رئولوژی ۷۸
۳-۲-۱ آزمون روبش دما ۷۸
۳-۲-۲ آزمون روبش درصد کرنش ۸۲
۳-۲-۳ آزمون روبش فرکانس ۸۴
۳-۲-۴ آزمون روبش سرعت کرنش پایا ۸۸
۳-۲-۵ اندازه‌گیری لغزش در آزمون روبش سرعت کرنش پایا ۹۱
۳-۳ نتایج اندازه‌گیری فشار، سرعت و چگالی ۹۴
۳-۴ پیش‌بینی فشار، تنش و کیفیت سطح ۹۶
۳-۵ آزمون پروفیل مستطیل شکل ۱۰۴
فصل ۴ : نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۰۹
۴-۱ نتیجه‌گیری ۱۱۰
۴-۲ پیشنهاد برای آینده ۱۱۳

فهرست جداول

جدول ۱-۱: پایان‌نامه انجام شده در گروه تکنوپلاست مدرس در زمینه کامپوزیت چوب-پلاستیک [۱۳-۲۲].....۱۴
جدول ۱-۲: فهرست کارهای تحقیقی اصلی مرتبط با رساله.....۱۶
جدول ۲-۱: طراحی آزمایش برای تولید قطعات چوب-پلی‌پروپیلن.....۴۷
جدول ۲-۲: طراحی آزمایش برای تولید قطعات چوب-پلی‌اتیلن.....۴۷
جدول ۲-۳: طراحی آزمایش برای آزمون رئومتری روبش درصد کرنش کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن.....۵۰
جدول ۲-۴: طراحی آزمایش برای آزمون رئومتری روبش فرکانس کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن.....۵۱
جدول ۲-۵: طراحی آزمایش برای آزمون رئومتری روبش سرعت کرنش پایای کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن.....۵۱
جدول ۲-۶: مشخصات پلی‌پروپیلن Moplen EPD60R تولید شرکت پتروشیمی شازند اراک (اکستروژن) [۹۱].....۵۴
جدول ۲-۷: مشخصات پلی‌پروپیلن Moplen Z30S تولید شرکت پتروشیمی مارون (تزریق) [۹۲].....۵۴
جدول ۲-۸: مشخصات پلی‌اتیلن HD5620EA تولید شرکت پتروشیمی شازند اراک (تزریق) [۹۳].....۵۵
جدول ۲-۹: ابعاد دای‌های اکستروژن.....۵۷
جدول ۳-۱: اطلاعات کلی نتایج آزمون‌های کیفیت سطح.....۶۹
جدول ۳-۲: مقادیر P-value حاصل از تحلیل رگرسیون آزمون کیفیت سطح.....۷۱
جدول ۳-۳: اطلاعات کلی نتایج آزمون‌های جذب آب.....۷۲
جدول ۳-۴: مقادیر P-value حاصل از تحلیل رگرسیون آزمون جذب آب.....۷۴
جدول ۳-۵: مقادیر دمای ذوب WPCها حاصل از آزمون DSC (درجه سلسیوس).....۷۸
جدول ۳-۶: اطلاعات کلی نتایج آزمون‌های رئومتری روبش فرکانس.....۸۵
جدول ۳-۷: مقادیر P-value حاصل از تحلیل رگرسیون آزمون رئومتری روبش فرکانس.....۸۷
جدول ۳-۸: اطلاعات کلی نتایج آزمون‌های رئومتری روبش سرعت کرنش پایا.....۸۹
جدول ۳-۹: مقادیر P-value حاصل از تحلیل رگرسیون آزمون رئومتری روبش سرعت کرنش پایا.....۹۰
جدول ۳-۱۰: تنش‌های برشی مرزی حاصل از برازش معیارهای کیفیت سطح.....۱۰۱
جدول ۳-۱۱: تنش‌های برشی مرزی حاصل از برازش معیارهای کیفیت سطح دای مستطیلی.....۱۰۶

فهرست تصاویر

شکل ۱-۱: پدیده شکست مذاب در اکسترود پروفیل‌های کامپوزیت چوب-پلاستیک [۱۸] ۳
شکل ۱-۲: دای اکستروژن فرآیند Strandex [۷] ۱۰
شکل ۱-۳: دای تولیدی Trex [۷] ۱۱
شکل ۱-۴: شماتیک فرآیند شرکت EIN [۷] ۱۲
شکل ۱-۵: دای اکستروژن فرآیند AERT [۷] ۱۳
شکل ۱-۶: جریان برشی با لغزش در دیواره [۶۰] ۲۱
شکل ۱-۷: ارتباط کیفیت قطعات اکسترودی معمولی با تنش برشی دیواره نسبت به سرعت برش دیواره [۶۰] ۲۲
شکل ۱-۸: تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی از قطعه‌ی اکسترودی پلی‌اتیلنی [۶۴] ۲۴
شکل ۱-۹: تصویر شماتیک پدیده‌ی لغزیدن-چسبیدن [۶۵] ۲۴
شکل ۱-۱۰: پروفیل های اکسترودی قبل و بعد از شروع شکست مذاب. الف) قطعات صاف زیر سرعت برشی بحرانی ب) نوسانات دوره‌ای ج) قطعات مارپیچی د) قطعات زبر و نامنظم و ه) قطعات تکه شده [۶۳] ۲۵
شکل ۱-۱۱: شماتیک پارامترهای زبری سطح Ra و Rz [۶۷] ۲۷
شکل ۱-۱۲: تصویر شماتیک از چهار نوع رئومتر چرخشی الف) پیچش مستطیلی، ب) صفحات موازی، ج) مخروط و صفحه و د) استوانه‌های هم مرکز [۷۱] ۲۹
شکل ۱-۱۳: تصویر شماتیک مشخصات هندسی رئومتر چرخشی [۶۰] ۳۰
شکل ۱-۱۴: تصویر شماتیک رئومتر مویین با مقطع دایره‌ای [۷۰] ۳۲
شکل ۱-۱۵: مشخصات جریان از داخل یک لوله [۶۸] ۳۴
شکل ۱-۱۶: شماتیک رئومتر مویین با مقطع مستطیلی [۶۸] ۳۴
شکل ۱-۱۷: (الف) شماتیک تنش برشی دیواره نسبت به سرعت برش ظاهری در جریان دای مویینه (ب) شماتیک سرعت برش ظاهری نسبت به تنش برشی اسمی دیواره [۶۰] ۳۸
شکل ۲-۱: توزیع وزنی ذرات چوب استفاده شده در آزمایش‌ها ۵۳
شکل ۲-۲: دستگاه اکسترودر و اجزای آن ۵۶
شکل ۲-۳: نقشه جزییات ابعادی مارپیچ‌های اکسترودر ۵۶
شکل ۲-۴: نقشه برش خورده دای‌های اکستروژن (ابعاد به میلی‌متر) ۵۷
شکل ۲-۵: نقشه دای اکستروژن با مقطع مستطیلی ۵۸
شکل ۲-۶: فیدر مورد استفاده برای انتقال پلاستیک ۵۸
شکل ۲-۷: فیدر و خشک‌کن چوب ۶۰
شکل ۲-۸: شماتیک خشک‌کن و همزن خاک اره ۶۱
شکل۲-۹: اجزا و مراحل ثبت اطلاعات فشار و دما در رایانه ۶۲

شکل ۲-۱۰: دستگاه زبری سنج مدل SurfScan 200 ..... ۶۳
شکل ۲-۱۱: تصویربرداری قطعات با سطح زبر توسط دوربین با قابلیت تفکیک بالا ۶۳
شکل ۲-۱۲: دستگاه اندازه‌گیری حجم قطعات به کمک روش ارشمیدس ۶۴
شکل ۲-۱۳: دستگاه DSC مدل 2000-Q20 ساخت شرکت TA instruments ۶۵
شکل ۲-۱۴: رئومتر چرخشی ARES و ساخت شرکت TA Instrument ۶۵
شکل ۳-۱: برخی از پروفیل‌های اکسترود شده کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن ۶۸
شکل ۳-۲: برخی از پروفیل‌های اکسترود شده کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن ۶۸
شکل ۳-۳: تغییرات جذب آب نسبت به کیفیت سطح کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن (MFI PP=0.35) ۷۵
شکل ۳-۴: تغییرات جذب آب نسبت به کیفیت سطح کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن (MFI PP=25) ۷۵
شکل ۳-۵ تغییرات جذب آب نسبت به کیفیت سطح کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن ۷۶
شکل ۳-۶: نمودار جریان گرما نسبت به تغییرات دمای آزمون DSC چوب-پلی‌پروپیلن (PP MFI=0.35) ۷۷
شکل ۳-۷: نمودار جریان گرما نسبت به تغییرات دمای آزمون DSC چوب-پلی‌پروپیلن (PP MFI=25) ۷۷
شکل ۳-۸: نمودار جریان گرما نسبت به تغییرات دمای آزمون DSC چوب-پلی‌اتیلن ۷۸
شکل ۳-۹: نمودار مدول ذخیره نسبت به دمای کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن ۷۹
شکل ۳-۱۰: نمودار مدول اتلاف نسبت به دمای کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن ۸۰
شکل ۳-۱۱: نمودار ویسکوزیته مرکب نسبت به دمای کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن ۸۰
شکل ۳-۱۲: نمودار مدول ذخیره نسبت به دمای کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن ۸۱
شکل ۳-۱۳: نمودار مدول اتلاف نسبت به دمای کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن ۸۱
شکل ۳-۱۴: نمودار ویسکوزیته مرکب نسبت به دمای کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن ۸۲
شکل ۳-۱۵: نمودارهای مدول ذخیره نسبت به درصد کرنش برشی کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن (PP MFI=0.35) با سه درصد وزنی چوب ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد و دو دمای ۱۷۵ و ۱۹۵ درجه سلسیوس ۸۲
شکل ۳-۱۶: نمودارهای مدول ذخیره نسبت به درصد کرنش برشی کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن (PP MFI=25) با سه درصد وزنی چوب ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد و دو دمای ۱۷۵ و ۱۹۵ درجه سلسیوس ۸۳
شکل ۳-۱۷: نمودارهای مدول ذخیره نسبت به درصد کرنش برشی کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن با سه درصد وزنی چوب ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد و دو دمای ۱۵۵ و ۱۷۵ درجه سلسیوس ۸۳
شکل ۳-۱۸: یکی از نتایج آزمون‌های روبش فرکانس (درصد چوب=۷۰، PP MFI= ۰.۳۵، دما=۱۷۵ درجه سلسیوس، درصد کرنش=۰.۱ و فاصله بین کفه‌ها=۱ میلی‌متر) ۸۵
شکل ۳-۱۹: یکی از نتایج آزمون‌های روبش سرعت کرنش پایا (درصد چوب=۶۰، PP MFI= ۰.۳۵، دما=۱۹۵ درجه سلسیوس و فاصله بین کفه‌ها=۱ میلی‌متر) ۸۹
شکل ۳-۲۰: یکی از نتایج آزمون رئولوژی روبش سرعت کرنش پایا (نمودار تنش برشی نسبت به سرعت برش) ۹۱
شکل ۳-۲۱: نمونه‌ای از تغییرات سرعت لغزش نسبت به سرعت برش ۹۳

شکل ۳-۲۲: نمودار تنش بر حسب سرعت لغزش برای درصدهای مختلف کامپوزیت چوب-پلی اتـیلن در دمـای ۱۵۵ درجه سلسیوس..... ۹۳
شکل ۳-۲۳: نمودار سرعت حجمی خروج مواد نسبت به فشار دای کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن..... ۹۵
شکل ۳-۲۴: نمودار سرعت حجمی خروج مواد نسبت به فشار دای کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن..... ۹۶
شکل ۳-۲۵: نمودار تنش برشی دیواره نسبت به سرعت برش کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن..... ۹۷
شکل ۳-۲۶: نمودار تنش برشی دیواره نسبت به سرعت برش کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن..... ۹۷
شکل ۳-۲۷: نمودار کیفیت سطح (Ra) نسبت به تنش برشی کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن..... ۹۸
شکل ۳-۲۸: نمودار کیفیت سطح (Ra) نسبت به تنش برشی کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن..... ۹۸
شکل ۳-۲۹: نمودار تعداد نمونه نامناسب تولیدی با تغییر دامنه تنش برشی کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن..... ۱۰۲
شکل ۳-۳۰: نمودار تعداد نمونه نامناسب تولیدی با تغییر دامنه تنش برشی کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن..... ۱۰۲
شکل ۳-۳۱: تغییرات کیفیت سطح با کاهش تنش برشی روی دیواره..... ۱۰۴
شکل ۳-۳۲: نمودار کیفیت سطح (Ra) نسبت به تنش برشی دای مستطیلی کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن..... ۱۰۵
شکل ۳-۳۳: نمودار کیفیت سطح (Ra) نسبت به تنش برشی دای مستطیلی کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن..... ۱۰۶
شکل ۳-۳۴: نمودار تعداد نمونه نامناسب دای مستطیلی کامپوزیت چوب-پلی‌پروپیلن..... ۱۰۷
شکل ۳-۳۵: نمودار تعداد نمونه نامناسب دای مستطیلی کامپوزیت چوب-پلی‌اتیلن..... ۱۰۸

فهرست علائم و نشانه‌ها

تنش برشی	τ
سرعت برشی	$\dot{\gamma}$
سرعت لغزش	V_S
ضریب اصطکاک دینامیکی	k
ویسکوزیته ظاهری	η
طول لغزش	b
معیار زبری سطح	R_a
معیار دیگر زبری سطح	R_z
سرعت برشی ظاهری	$\dot{\gamma}_a$
سرعت برشی واقعی	$\dot{\gamma}_T$
شعاع	R
سرعت زاویه‌ای	ω
فاصله صفحات رئومتر	h
فاصله بی بعد صفحات رئومتر	$\hat{h}$
گشتاور	Ω
ویسکوزیته مرکب	η^*
مدول ذخیره	G'
مدول اتلاف	G''
طول دای اکستروژن	L
قطر دای اکستروژن	D
طول مخروطی دای	L_c
افت فشار	ΔP
تنش برشی دیواره	τ_w
سرعت خروج حجمی (دبی)	Q
سرعت خطی	V
سرعت برشی دیواره	$\dot{\gamma}_w$
ارتفاع دای مستطیلی	H
عرض دای مستطیلی	B
قطر هیدرولیکی	D_h
دما	T
دمای گذار شیشه‌ای	T_g

دمای تبلور	T_c
دمای ذوب	T_m
دور ماردون	N
درصد وزنی چوب	W
شاخص جریان‌پذیری	M
میزان جذب آب	WA
درصد کرنش	S
قطر نهایی	D_{out}
جرم	m
چگالی	ρ
سرعت خروجی	V_{out}
سرعت جرمی خروجی	$\dot{m}$

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ پیش‌زمینه

کامپوزیت‌ها با استفاده از ترکیب فیزیکی مواد بوجود می‌آیند تا خواص منحصر به فردی نسبت به مواد سازنده بدست آید. کامپوزیت چوب-پلاستیک یکی از کامپوزیت‌هایی است که تولید آن در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. این کامپوزیت به صورت تجاری در زمینه ساختمانی، معماری، خودرو و مبلمان رشد قابل توجهی داشته است [۱]. کامپوزیت چوب-پلاستیک با استفاده از مخلوط کردن پلاستیک و الیاف چوبی و افزودنی‌ها (روان‌سازها، جفت کننده‌ها، رنگ‌دانه‌ها و غیره) ساخته می‌شود و با استفاده از یک فرآیند تولید انبوه مانند اکستروژن، شکل‌دهی فشاری یا قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شود. پلاستیک در این مخلوط معمولا از ترموپلاستیک‌های صنعتی از قبیل پلی‌اتیلن سنگین (HDPE[1])، پلی‌پروپیلن (PP[2]) و پلی‌وینیل کلراید (PVC[3]) انتخاب می‌شود. جزء چوبی معمولا به شکل ذرات آسیاب شده‌ی محصولات چوبی یا الوارهای ضایعاتی و یا الیاف طبیعی با خواص و منابع مختلف است [۲-۵]. استفاده از الیاف سلولزی به دلیل فراوانی، قابلیت تجدید و نسبت استحکام به وزن مناسب، سودمند است. خاصیت زیست تجزیه‌پذیری الیاف طبیعی آنها را به عنوان مواد دوستان طبیعت معرفی می‌کند در حالی که قیمت پایین و کارآیی بالا می‌تواند علاقه‌مندی اقتصادی صنعت را نیز برآورده کند. علاوه بر این در مقایسه با پرکننده‌های شیشه و مواد معدنی، پرکننده‌های چوبی برای تجهیزات فرآیند، ساینده‌گی کمتری به وجود می‌آورند به طوری که آنها را برای کاربردهای تولید انبوه از قبیل کف‌پوش‌های خارجی، نرده‌های حصار، پروفیل‌های پنجره و غیره مناسب می‌سازد [۶، ۷]. اگرچه اضافه کردن ذرات چوب به ماتریس پلیمری مزایای زیادی دارد اما اضافه کردن آن ممکن است موجب برخی نتایج نامطلوب مثل کاهش چکش‌خواری و مقاومت به ضربه پایین شود [۸-۱۰]. مورد مهم دیگر این است که اضافه کردن ذرات چوب به ترموپلاستیک‌ها موجب افزایش چشمگیر ویسکوزیته مذاب می‌شود که برخی مشکلات را در فرآیند ایجاد می‌کند؛ از قبیل ناپایداری‌های جریان و

[1] High Density Polyethylene
[2] Polypropylene
[3] Polyvinyl Chloride

عیوب سطحی [۱۱، ۱۲]. برای مطالعه و آشنایی بیشتر در زمینه کامپوزیت چوب-پلاستیک می‌توان به پژوهش‌های انجام شده در گروه تکنولوژی پلاستیک دانشگاه تربیت مدرس، مراجع [۱۳-۲۲] مراجعه نمود.

اکستروژن یکی از فرآیندهایی است که برای تولید پروفیل‌های پلیمری و نیز کامپوزیت‌های با پایه پلیمر استفاده می‌شود. با گذشت چندین دهه از استفاده صنعتی، همچنان مشکلاتی در تولید قطعات با استفاده از این فرآیند وجود دارد. یکی از این مشکلات ناپایداری جریان خروجی دای است که موجب پایین آمدن کیفیت قطعات تولیدی می‌شود. مهم‌ترین فرآیندی که برای تولید کامپوزیت چوب-پلاستیک استفاده می‌شود فرآیند اکستروژن است. مشکل ناپایداری جریان خروجی دای در تولید این کامپوزیت نیز وجود دارد که به تولید قطعات با کیفیت پایین منجر می‌شود. شکل ۱-۱ نمونه‌هایی از قطعات تولید شده چوب-پلاستیکی را نشان می‌دهد که سطح آنها در اثر پدیده شکست مذاب[1] دچار مشکل شده است.

شکل ۱-۱: پدیده شکست مذاب در اکسترود پروفیل‌های کامپوزیت چوب-پلاستیک [۱۸]

سوالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که چه عواملی و به چه میزان بر ناپایداری‌های بوجود آمده در جریان خروجی دای اکستروژن کامپوزیت چوب-پلاستیک موثرند و آیا می‌توان به طریقی این عوامل را کنترل کرد تا اینکه همزمان با داشتن حجم تولید بالا کیفیت سطح محصولات تولیدی هم مناسب باشد.

[1] Melt Fracture

۱-۲ ساختار رساله

ساختار رساله حاضر به این ترتیب است که در ادامه این فصل توضیحاتی در زمینه پیشینه پژوهش و همچنین اهداف و نوآوری‌های تحقیق ارائه شده است. در ادامه به صورت پایه‌ای، توضیحاتی در زمینه لغزش دیواره[۱]، پارگی سطحی[۲]، پدیده لغزیدن-چسبیدن[۳]، و روش‌های اندازه‌گیری کیفیت سطح ارائه گردیده و همچنین، نحوه کار رئومتری و روش‌های مرسوم اندازه‌گیری لغزش در رئومترها شرح داده شده است. در انتهای این فصل توضیح مختصری در زمینه توجیه ملکولی خطای لغزش آمده است. در فصل دوم، نحوه انجام آزمایش‌ها و طراحی‌های آزمایش تشریح گردیده و مواد و تجهیزات مورد نیاز برای تولید قطعات و انجام آزمون‌ها و اندازه‌گیری‌ها معرفی شده‌اند. در فصل سوم که مربوط به نتایج و بحث است نتیجه هرکدام از بررسی‌های انجام شده شرح داده شده است و به کمک روابط تئوری، روش‌هایی برای پیش‌بینی ناپایداری‌های جریان ارائه گردیده است. نهایتا در فصل چهارم، نتیجه‌گیری کلی رساله ارائه شده است.

۱-۳ پیشینه پژوهش

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی بررسی ناپایداری‌های جریان خروجی دای در پلیمرها و عیوب بوجود آمده در اثر آن انجام شده است. با یک تقسیم‌بندی موضوعی می‌توان آنها را به ترتیب زیر شرح داد:

شبیه‌سازی عددی و یا تحلیلی ناپایداری‌ها: گراهام[۴] [۲۳] مدل‌های ساده‌ای را برای الاستیسیته سیال و لغزش به کار برد تا به صورت تئوری و محاسباتی دینامیک غیرخطی مذاب را در برش نوسانی مطالعه کند. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن هر دو مورد الاستیسیته سیال و یک مدل دینامیکی برای رخ دادن لغزش دیواره در حرکت‌های نامتناوب، لازم است. دِن دوئلدر[۵] و همکاران [۲۴] برای توصیف ناپایداری‌های ناگهانی بوجود آمده در اکستروژن پلیمر، منحنی‌های سه مدل ارائه شده‌ی حاصل از معادلات

[1] Wall Slip
[2] Sharkskin
[3] Slip-Stick
[4] Graham
[5] Den Doelder