دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک- هوافضا

بهبود روش ساخت پوسته بال هواپیما از جنس مواد مرکب

سجاد رجبی جلال

استاد راهنما

دکتر محمد گلزار

استاد مشاور

مهندس حمید قبادیان

زمستان ۸۸

بسم الله الرحمن الرحیم

تاییدیه اعضای هیأت داوران حاضر در جلسهٔ دفاع

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: **سجاد رجبی جلال**

را با عنوان: **بهبود روش ساخت پوسته بال هواپیما از جنس مواد مرکب**

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	**دکتر محمد گلزار**	استادیار	
استاد مشاور	**مهندس حمید قبادیان**	مهندس	
استاد ممتحن	**دکتر غلامحسین لیاقت**	استاد	
استاد ممتحن	**دکتر اکبر شجاعی**	دانشیار	
نماینده گروه	**دکتر مجید میرزایی**	دانشیار	

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 دانشجوی 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 و یا نرم افزار و یا آثار ویژه حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها 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.

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

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

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

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

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد سجاد رجبی جلال در رشته مهندسی مکانیک- هوافضا است که در سال ۱۳۸۸در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمد گلزار از آن دفاع شده است.»

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

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، 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 سجاد رجبی جلال دانشجوی رشته‌مهندسی مکانیک- هوافضا مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سجاد رجبی جلال

تاریخ و امضا: ۱۳۸۸/۱۲/۰۲

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک- هوافضا

بهبود روش ساخت پوسته بال هواپیما از جنس مواد مرکب

سجاد رجبی جلال

استاد راهنما

دکتر محمد گلزار

استاد مشاور

مهندس حمید قبادیان

زمستان ۸۸

تقدیم به پدر و مادرم

سپاس و ستایش خداوند متعال که به جسم من روح خدایی دمید و امید زنده بودن و زندگانی بخشید.

درود بر پیامبر اسلام حضرت محمد (ص) و خاندان عصمت وطهارت که به من راه و روش درست زندگی کردن را آموختند.

با تشکر از پدر و مادرم که ماه و ستاره روشنگر شب‌هایم و خورشید فروزنده دنیایم بودند و در تمام مراحل زندگی یار و همراه و مشوق من بودند.

سپاس گذاری

نهایت تقدیر و کمال تشکر از استاد گرانقدر

جناب آقای دکتر محمد گلزار بخاطر راهنمایی‌های بی دریغ در پیشبرد و به پایان رساندن این پژوهش را دارم و موفقیت ایشان را در تمام مراحل زندگی از خداوند متعال خواستارم و همچنین از راهنمایی‌های جناب آقای مهندس حمید قبادیان در پیشبرد این پژوهش و همچنین در هماهنگی و سهولت برقراری ارتباط با شرکت هواپیمایی سپهر کمک بزرگی به بنده نمودند تشکر فراوانی به عمل می‌آورم.

چکیده

در این تحقیق روش انتقال رزین به کمک خلاء (VARTM[1]) به عنوان جایگزینی برای روشهای موجود بخصوص روش دستی در ساخت پوسته بال هواپیما معرفی شده است. با توجه به مراجع موجود در دسترس گزارشی در رابطه با این موضوع دیده نشده است، پس از بومی سازی فناوری قطعات با این روش پارامترهای موثر با امکانات مورد استفاده در این پایان نامه مورد بررسی قرار گرفته است، برای این منظور ابتدا پارامترهای موثر در این روش به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار گرفته شده است تا با بهبود آنها بتوان سرعت این روش را افزایش داد. برای این منظور ابتدا پارامترهای موثر در این روش با انتخاب تئوری مناسب، توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است. سپس پارامترهایی از جمله تاثیر چگالی بافت، ضخامت لایه توزیع، ضخامت لایه پریفرم، ویسکوزیته رزین و قطر لوله تزریق در سرعت حرکت رزین و همچنین تاثیر ضخامت لایه توزیع در زمان پر شدن قالب، طول جبهه جریان و ضرایب نفوذپذیری به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

چون کیفیت پوسته بال هواپیما از اهمیت خاصی برخوردار است برای مشخص کردن میزان افزایش کیفیت در قطعات ساخته شده به روش VARTM نسبت به روش دستی آزمایشهای خواص مکانیکی و خواص فیزیکی انجام گرفت که در این پایان نامه حداقل این آزمایشها از قبیل تست کششی، تست خمشی، تعیین درصد حجمی الیاف و تعیین درصد حباب در قطعات انجام شده است.

با انجام آزمایشهای یاد شده با انتخاب بهینه نسبت بین ضخامت لایه توزیع و پریفرم، افزایش تراکم الیاف، کاهش ویسکوزیته رزین و انتخاب بهینه قطر لوله تزریق می‌توان حداکثر سرعت را در این روش بدست آورد و همچنین خواص مکانیکی و خواص فیزیکی در قطعات ساخته شده به روش VARTM بهتر از روش دستی بوده است.

بعد از بررسی پارامترها و بهینه سازی آن، قطعاتی پیچیده با ابعاد متوسط برای شناسایی مشکلات ساخت آنها ساخته شد. سپس بعد از رفع کلیه مشکلات و با کسب تجربه کافی در این زمینه و با بدست آوردن روش مناسب برای ساخت قطعات فوم دار، برای اولین بار پوسته بال ۹ متری در چنین ابعاد بزرگی که سرتاسر آن از هسته فومی تشکیل شده است با موفقیت کامل ساخته شد و نسبت به روش دستی مورد مقایسه قرار گرفت و به این نتیجه رسیده شد که وزن قطعه و زمان ساخت آن نسبت به روش دستی کاهش نموده است و همچنین کیفیت پوسته به دلیل مکانیزه شدن، بهتر از روش دستی بوده است.

کلید واژه : ساخت کامپوزیت - پوسته بال هواپیما - *VARTM*- خواص مکانیکی

[1]- Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)

فهرست مطالب

عنوان ..... **صفحه**

فهرست مطالب ..... أ

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... ه

فهرست علائم و نشانه‌ها ..... ی

فهرست اختصارات ..... ل

فصل اول : ..... **مقدمه** ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ اهداف پایان نامه ۴

۱-۳ روش اجرای پروژه و مراحل آن ۵

۱-۴ ساختار پایان نامه ۷

۱-۵ مروری بر پژوهشهای پیشین ۹

۱-۵-۱ روشهای موجود در ساخت پوسته بال هواپیما ۹

۱-۵-۲ تحقیقات انجام شده در زمینه روش مکشی ۲۴

۱-۵-۳ تحقیقات انجام شده در زمینه خواص مکانیکی ۲۶

فصل دوم : ..... **فناوری ساخت مکشی (VARTM)**..... ۲۸

۲-۱ مقدمه ۲۹

۲-۲ شناسایی تکنولوژی ساخت توسط فرآیند مکشی ۲۹

۲-۲-۱ تئوری روش مکشی ۳۰

۲-۲-۲ بررسی پارامترهای موثر در روش مکشی توسط نرم افزار MATLAB ۳۶
۲-۲-۳ مراحل اجرای فرآیند ۳۶
۲-۲-۴ مواد مورد مصرف در روش مکشی ۳۷
۲-۲-۵ ژل شدن در فرآیند مکشی ۳۸
۲-۲-۶ ساخت نمونه‌های تست ۴۱

فصل سوم : ..... **مواد، تجهیزات و روشهای آزمون** ۴۴
۳-۱ مقدمه ۴۵
۳-۲ مواد آزمایش ۴۵
۳-۳ تجهیزات ۴۶
۳-۴ روش انجام آزمایشها ۵۰
۳-۴-۱ آزمایشهای خواص مکانیکی ۵۰
۳-۴-۲ آزمایشهای بررسی پارامترهای موثر در روش مکشی ۵۸

فصل چهارم ..... **بحث و بررسی نتایج** ۶۵
۴-۱ مقدمه ۶۶
۴-۲ بحث و بررسی پارامترهای موثر در روش مکشی ۶۶
۴-۲-۱ بررسی تاثیر تراکم الیاف ۶۶
۴-۲-۲ بررسی تاثیر ضخامت لایه توزیع ۶۹
۴-۲-۲-۱ بررسی تاثیر ضخامت لایه توزیع در سرعت حرکت رزین و زمان پر شدن قالب..... ۶۹
۴-۲-۲-۲ تاثیر ضخامت لایه توزیع در طول جبهه جریان ۷۲
۴-۲-۲-۳ تاثیر ضخامت لایه توزیع در ضرایب نفوذپذیری ۷۳

۴-۲-۳ تاثیر ضخامت لایه پریفرم در سرعت حرکت رزین ۷۵
۴-۲-۴ تاثیر مقدار ویسکوزیته در سرعت حرکت رزین ۷۶
۴-۲-۵ تاثیر قطر لوله تزریق در سرعت حرکت رزین ۷۷
۴-۲-۶ تخمین مهندسی زمان پر شدن قالب ۷۸
۴-۳ بحث و بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها ۷۹
۴-۳-۱ بررسی نتایج میزان درصد حجمی الیاف ۷۹
۴-۳-۲ بررسی نتایج میزان درصد حباب ۸۰
۴-۳-۳ بررسی نتایج مقاومت کششی و خمشی ۸۱

فصل پنجم ..... ساخت پوسته بال ۹ متری از جنس مواد مرکب ۸۴
۵-۱ مقدمه ۸۵
۵-۲ ساخت قطعات کوچک و متوسط با اشکال پیچیده ۸۵
۵-۳ ساخت پوسته بال ۹ متری ۹۴
۵-۳-۱ بررسی شرایط ساخت پوسته بال هواپیمای ۹ متری قبل از ساخت ۹۵
۵-۳-۲ مراحل ساخت ۹۷
۵-۳-۳ مقایسه ساخت پوسته بال ۹ متری توسط روش مکشی و دستی ۱۰۴

فصل ششم ..... نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای ادامه کار ۱۰۷
۶-۱ نتیجه گیری ۱۰۸
۶-۲ پیشنهادها ۱۱۲
مراجع ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

عنوان ..... صفحه

جدول ۳-۱ مشخصات رزین استفاده شده در تستها ۴۶

جدول ۳-۲ مشخصات پریفرم و پارامترهای مورد نیاز در تستها..... ۶۳

جدول ۳-۳ ضریب نفوذپذیری کلی محاسبه شده در جهت حرکت رزین از معادله ۲-۱۷ ..... ۶۴

جدول ۳-۴ ضریب نفوذپذیری کلی محاسبه شده در جهت حرکت رزین از معادله ۲-۱۸ ..... ۶۴

جدول ۴-۱ طول جبهه جریان بدست آورده شده از آزمایش و تئوری ۷۲

جدول ۴-۲ نتایج خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش دستی و مکشی ۸۲

جدول ۵-۱ مقایسه سرعت تولید توسط روش مکشی و دستی ۱۰۵

فهرست شکل‌ها

عنوان ..... صفحه

شکل ۱-۱ لایه گذاری دستی ۱۰

شکل ۱-۲ قالبگیری با کیسه و خلاء (مکش) ۱۲

شکل ۱-۳ پیش آغشته‌ها ۱۴

شکل ۱-۴ پیش آغشته‌های پخت شونده در دمای پایین ۱۵

شکل ۱-۵ پخش یا نفوذ ورقه رزین (RFI) ۱۷

شکل ۱-۶ قالبگیری با انتقال رزین (RTM) ۱۹

شکل ۱-۷ قالبگیری با انتقال رزین بکمک خلاء ۲۱

شکل ۲-۱ مدل دو لایه جریان رزین در روش مکشی ۳۱

شکل ۲-۲ فلوچارت بررسی پارامترهای موثر در روش مکشی توسط نرم افزار MATLAB ۳۵

شکل ۲-۳ استفاده از یک راهگاه برای تزریق ۳۸

شکل ۲-۴ استفاده از چندراهگاه برای تزریق ۳۸

شکل ۲-۵ مراحل تولید توسط UV-VARTM ۴۰

شکل ۲-۶ نمونه تست ناقص از لحاظ پر نشدن رزین ۴۱

شکل ۲-۷ نمونه تست با کیفیت نامناسب از لحاظ چسبیده شدن لایه توزیع به آن ۴۲

شکل ۲-۸ نمونه تست با درزبندی نامناسب ۴۲

شکل ۲-۹ نمونه تست با درزبندی مناسب ۴۳

شکل ۳-۱ الیاف بافته شده با چگالی‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۶۰۰ گرم بر متر مربع ۴۵

شکل ۳-۲ تجهیزات به کار رفته برای ساخت قطعات ۵۰

شکل ۳-۳ نمونه‌های آماده برای تست کشش ۵۱
شکل ۳-۴ شماتیک تست کششی نمونه‌ها ۵۲
شکل ۳-۵ نمونه‌های تست کششی پس از گسیختگی ۵۲
شکل ۳-۶ شماتیک تست خمشی نمونه‌ها ۵۴
شکل ۳-۷ نمونه‌ها پس از خمش ۵۴
شکل ۳-۸ فلوچارت استفاده از استانداردها ۵۶
شکل ۳-۹ نمونه‌های حرارت داده شده جهت درصد وزنی و حجمی الیاف ۵۶
شکل ۳-۱۰ اندازه گیری درصد حجمی الیاف و درصد حباب ۵۷
شکل ۳-۱۱ لایه توزیع استفاده شده در آزمایشها ۵۹
شکل ۳-۱۲ قطعات ساخته شده در ضخامت ۲.۶ و ۱۰ میلیمتر ۵۹
شکل ۳-۱۳ لوله‌ها تزریق در قطرهای مختلف ۶۰
شکل ۳-۱۴ اندازه گیری سرعت حرکت رزین ۶۱
شکل ۴-۱ نتایج مسافت - زمان حرکت رزین حاصل از آزمایش در اثر تغییر تراکم الیاف ۶۷
شکل ۴-۲ نتایج سرعت – مسافت حرکت رزین حاصل از تئوری و آزمایش در اثر تغییر تراکم الیاف..... ۶۸
شکل ۴-۳ تاثیر درصد حجمی الیاف در سرعت حرکت رزین در فاصله۰.۱،۰.۲۵،۰.۴۵ متری ۶۸
شکل ۴-۴ نتایج مسافت - زمان حرکت رزین حاصل از آزمایش در اثر تغییر ضخامت لایه توزیع در الیاف ۱۰۰ گرمی ۶۹
شکل ۴-۵ نتایج سرعت - مسافت حرکت رزین حاصل از تئوری و آزمایش در اثر تغییر ضخامت لایه توزیع در الیاف ۱۰۰ گرمی ۷۰

شکل ۴-۶ نتایج مسافت - زمان حرکت رزین حاصل از آزمایش در اثر تغییر ضخامت لایه توزیع در الیاف ۲۰۰ گرمی ۷۱
شکل ۴-۷ نتایج سرعت - مسافت حرکت رزین حاصل از تئوری و آزمایش در اثر تغییر ضخامت لایه توزیع در الیاف ۲۰۰ گرمی ۷۱
شکل ۴-۸ زمان پر شدن قالب برحسب ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه پریفرم ۷۲
شکل ۴-۹ تاثیر نسبت ضخامت لایه توزیع به لایه پریفرم در طول جبهه جریان در نمونه ۲۰۰ گرمی..... ۷۳
شکل ۴-۱۰ ضریب نفوذپذیرری کلی در جهت جریان برحسب نسبت ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه پریفرم (بدست آورده شده از معادله ۲-۱۷) ۷۴
شکل ۴-۱۱ تاثیر نسبت ضخامت لایه توزیع به لایه پریفرم در ضریب نفوذپذیری ضخامت لایه..... ۷۵
شکل ۴-۱۲ تاثیر ضخامت لایه پریفرم در سرعت حرکت رزین در فاصله ۰.۱ ، ۰.۲۵ ، ۰.۴۵ متری در نمونه ۲۰۰ گرمی با ضخامت لایه توزیع ۰.۰۰۱۴ متر ۷۶
شکل ۴-۱۳ تاثیر ویسکزیته رزین در سرعت حرکت رزین در فاصله ۰.۱ ، ۰.۲۵ ، ۰.۴۵ متری در نمونه ۲۰۰ گرمی با ضخامت لایه توزیع ۰.۰۰۱۴ متر ۷۷
شکل ۴-۱۴ تاثیر قطر لوله تزریق در سرعت حرکت ۷۸
شکل ۴-۱۵ مقایسه ضریب نفوذپذیری برحسب نسبت ضخامت لایه توزیع به ضخامت لایه پریفرم (بدست آورده شده از معادله ۲-۱۷ و ۲-۱۸) ۷۸
شکل ۴-۱۶مقایسه درصد حجمی الیاف نمونه‌های ساخته شده به روش مکشی و دستی ۷۹
شکل ۴-۱۷مقایسه درصد حباب نمونه‌های ساخته شده به روش مکشی و دستی ۸۰
شکل ۵-۱ قالب سمند سریر ۸۶

شکل ۵-۲ قالب آماده شده برای تزریق نمونه شبیه سازی شده ۸۷
شکل ۵-۳ قالب آماده شده برای تزریق نمونه اصلی ۸۸
شکل ۵-۴ ساخت قطعات پیچیده در ابعاد متوسط ۸۹
شکل ۵-۵ شماتیک نمونه‌ها با مغزی فوم دار ۸۹
شکل ۵-۶ نمونه‌های فوم دار با لایه توزیع در یک طرف و دو طرف فوم ۹۱
شکل ۵-۷ نمونه‌های فوم دار در حال تزریق ۹۱
شکل ۵-۸ نمونه‌های فوم دار ساخته شده با یک طرف و دو طرف فوم ۹۲
شکل ۵-۹ نمونه فوم دار با یک طرف لایه توزیع و یک طرف شیار ۹۳
شکل ۵-۱۰ نمونه فوم دار با لایه توزیع متغیر ۹۳
شکل ۵-۱۱ شماتیک بال هواپیمای ۹ متری ۹۶
شکل ۵-۱۲ شستوشوی قالب ۹۷
شکل ۵-۱۳ ایجاد لایه جداکننده در قالب ۹۷
شکل ۵-۱۴ برش فوم ۹۸
شکل ۵-۱۵ لایه چینی الیاف ۹۹
شکل ۵-۱۶ لایه چینی لایه توزیع ۹۹
شکل ۵-۱۷ جاسازی لوله‌های تزریق ۱۰۱
شکل ۵-۱۸ درز بندی و ایجاد خلاء اولیه ۱۰۲
شکل ۵-۱۹ تزریق رزین ۱۰۲
شکل ۵-۲۰ برداشتن وکیوم بگ و لوله‌های تزریق و لایه توزیع ۱۰۳
شکل ۵-۲۱ پوسته ۹ متری ساخته شده به روش مکشی ۱۰۳

شکل ۶-۱ اتمام رزین تهیه شده برای تزریق ۱۱۲
شکل ۶-۲ وکیوم رزینهای داخل شبکه‌ها به نقاط دیگر قالب ۱۱۳
شکل ۶-۳ نمونه‌های ساخته شده با ساختار هانی‌کم ۱۱۳
شکل ۶-۴ قطعات ساخته شده با ضخامتهای زیاد با نسبت لایه توزیع به لایه پریفرم کم ۱۱۵

فهرست علائم و نشانه‌ها

انگلیسی

طول ناحیه اشباع- ناحیه بدون جریان عرضی	D
طول جبهه جریان- ناحیه با جریان عرضی	d
مدول کششی	E
مدول برشی	G
ضخامت	h
ضخامت لایه توزیع	h_1
ضخامت پریفرم	h_2
ضریب نفوذپذیری	K
ضریب نفوذپذیری در جهت جریان در لایه توزیع	K_{1xx}
ضریب نفوذپذیری در جهت جریان در لایه پریفرم	K_{2xx}
ضریب نفوذپذیری در جهت عمود بر جریان (جهت ضخامت)	K_{2yy}
ثابت کازنی-کارمن	k
طول نمونه	L
ممان	M
چگالی عملی نمونه‌ها	M_d
نیرو	N
فشار وکیوم	P_0
ماتریس سفتی	Q
مقاومت برشی	S
چگالی تئوری نمونه‌ها	T_d
ضخامت لمینیت	t
سرعت رزین در لایه توزیع ناحیه اشباع	U_1
سرعت رزین در لایه پریفرم ناحیه اشباع	U_2
سرعت جبهه جریان	U_F
سرعت دارسی	u
سرعت عرضی رزین از لایه توزیع به لایه پریفرم	u_{12y}

سرعت افقی در ناحیه جبهه جریان در لایه توزیع	u_{1x}
حجم	V
وزن نمونه‌ها	W
عرض نمونه	w
مقاومت فشاری طولی	X_c
مقاومت کششی طولی	X_t
مسافت حرکت رزین	x
مقاومت فشاری عرضی	Y_c
مقاومت کششی عرضی	Y_t
ضخامت لایه	z

یونانی

ویسکوزیته رزین	μ
ضریب تخلخل در لایه توزیع	ϕ_1
ضریب تخلخل در پریفرم	ϕ_2
کرنش	ε
ضریب پواسون	ν
چگالی	ρ
تنش	σ
تنش برشی	τ
اختلاف فشار	ΔP