



## Designing and Manufacturing an Inexpensive Pinjet with Suitable Strength and Adhesion to Acrylic Resin

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Abbasi Khatoon Abadi M.<sup>1</sup>,  
Azizi Tafti R.<sup>1\*</sup>

#### How to cite this article

Abbasi Khatoon Abadi M, Azizi Tafti R, Designing and Manufacturing an Inexpensive Pinjet with Suitable Strength and Adhesion to Acrylic Resin. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23(02):139-149.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

#### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

azizitafti@yazd.ac.ir

#### Article History

Received: September 07, 2022

Accepted: December 11, 2022

ePublished: February 20, 2023

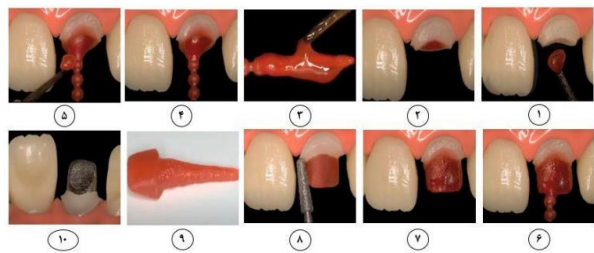
### ABSTRACT

During root canal treatment, whole or a part of the tooth crown may be lost. Post and core is a method of repairing a damaged crown, in which a pinjet dipped in acrylic resin is used to mold the tooth canal and make a cast post and core. The main goal of this research is to produce an inexpensive pinjet with required strength and proper adhesion to acrylic resin. Therefore, to determine a right material for pinjet, lap shear and tensile tests were performed on eight polymer materials to check the adhesion of pinjet to acrylic resin and its yield strength, respectively. To produce some pinjets, a plastic injection mold was built and Moldflow Insight software was used to determine the process parameters of the injection molding. The results showed that HIPS 7240 with the lowest price among the examined materials and sufficient adhesion to acrylic resin is a suitable material for the pinjet. Also, this material with a yield strength of 10.91 MPa had an appropriate strength to prevent plastic deformation during the post and core molding process. While the injection time, melt temperature, and mold temperature were considered to 1 s, 230 °C, and 25 °C, respectively in both simulation and experimental methods, the injection pressure was 19 and 18 MPa and the injection speed was obtained 0.3 and 0.27 cm/s respectively in the simulation and experiments. Producing a perfect pinjet shows the ability and accuracy of the simulation in proposing the process parameters of plastic injection molding.

**Keywords** Inexpensive Pinjet, Acrylic Resin Adhesion to Pinjet, Strength of Pinjet, High Impact Polystyrene

### CITATION LINKS

1- Influence of Crown Ferrule Heights and Dowel Material Selection on the Mechanical Behavior of Root-Filled Teeth: A Finite Element Analysis. 2- Influence of the endodontic treatment on mechanical properties of root dentin. 3- Pins and posts--why, when and how. 4- Additive manufacturing with soft TPU--adhesion strength in multimaterial flexible joints. 5- Low temperature tensile lap-shear testing of adhesively bonded polyethylene pipe. 6- Influence of surface microstructure on bonding strength of modified polypropylene/aluminum alloy direct adhesion. 7- Improving the adhesion of glass/polypropylene (glass-PP) and high-density polyethylene (HDPE) surfaces by open air plasma treatment. 8- Peel test experimentation on polycarbonate-based aluminium using fusion deposition modeling technique. 9- Optimization of injection molding cycle time using moldflow analysis. 10- Application of injection-compression molding to thin-walled polymeric parts. 11- Experimental and numerical study determining the warpage phenomenon of thin-wall injection molding. 12- Micro-injection molding using a polymer coated mold. 13- Standard test method for determining strength of adhesively bonded rigid plastic lap-shear joints in shear by tension loading. 14- Allergic effects of the residual monomer used in denture base acrylic resins. 15- A review of direct orthodontic bonding. 16- Standard test method for tensile properties of plastics. 17- Standard test method for melt flow rates thermoplastics by extrusion plastometer. 18- Autodesk Moldflow Insight 2019 Help. 19- Autodesk Moldflow Insight 2019 Material List. 20- Study on Chlorination of maleic anhydride grafted Polypropylene. 21- Moisture permeability of polymers. I. Role of crystallinity and orientation. 22- Adhesion of polymers. 23- New design feature of mold in injection molding for scrap reduction. 24- An abductive neural network approach to the design of runner dimensions for the minimization of warpage in injection mouldings. 25- Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products.



شکل ۱) مراحل فرآیند قالب‌گیری ریشه دندان برای ساخت پست‌وکور

## طراحی و ساخت یک پین‌جت ارزان قیمت با استحکام و چسبندگی مناسب به رزین آکرلیک

محمد عباسی خاتون‌آبادی<sup>۱</sup>، روح‌اله عزیز تفتی<sup>۱\*</sup>  
<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### چکیده

در حین انجام درمان ریشه دندان (عصب‌کشی) ممکن است همه یا بخشی از تاج دندان از بین برود. پست‌وکور یکی از روش‌های ترمیم تاج آسیب‌دیده است که در آن، از یک پین‌جت آغشته به رزین آکرلیک جهت قالب‌گیری از کانال دندان و ساخت پست‌وکور ریخته‌گری استفاده می‌شود. هدف اصلی در این مقاله تولید پین‌جتی ارزان قیمت با استحکام مورد نیاز و چسبندگی مناسب به رزین آکرلیک است. در این راستا، تعیین جنس مناسب برای پین‌جت اهمیت بالایی دارد که در نتیجه، آزمون‌های برشی لب‌روی هم و کشش بر روی هشت ماده پلیمری انجام شد تا به ترتیب، چسبندگی پین‌جت به رزین آکرلیک و استحکام تسلیم آن بررسی شود. برای ساخت پین‌جت، یک قالب تزریق پلاستیک ساخته شد و برای تعیین عوامل فرآیند تزریق، از نرم‌افزار مولد فلو اینسایت برای شبیه‌سازی استفاده گردید. نتایج نشان داد که ماده پلی‌استایرن مقاوم به ضربه (HIPS 7240) با کم‌ترین قیمت در بین مواد بررسی شده و چسبندگی کافی به رزین آکرلیک برای جنس پین‌جت مناسب است. همچنین، این ماده با استحکام تسلیم ۱۰/۹۱ مگاپاسکال، از استحکام مناسب به منظور جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک حین فرآیند قالب‌گیری پست‌وکور برخوردار بود. در حالی که زمان تزریق، دمای مذاب و دمای قالب در دو روش شبیه‌سازی و تجربی برابر و به ترتیب ۱ ثانیه، ۲۳۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد، فشار تزریق در روش شبیه‌سازی و تجربی به ترتیب ۱۹ و ۱۸ مگاپاسکال و سرعت تزریق به ترتیب ۰/۳ و ۰/۲۷ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد. تولید بدون عیب پین‌جت نشان از دقت شبیه‌سازی در پیشنهاد عوامل فرآیندی تزریق پلاستیک است.

**کلیدواژه‌ها:** پین‌جت ارزان قیمت، چسبندگی رزین آکرلیک به پین‌جت، استحکام پین‌جت، پلی‌استایرن مقاوم به ضربه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰

\*نویسنده مسئول: aziztafti@yazd.ac.ir

### ۱- مقدمه

فرآیند درمان ریشه دندان (عصب‌کشی) ممکن است باعث تغییراتی در معماری دندان و خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ساختار آن شود [1-2]. بسیاری از دندان‌هایی که عصب‌کشی می‌شوند به قرارگیری پست‌وکور (Post and Core) به عنوان جایگزینی برای ساختار از دست‌رفته دندان نیاز دارند [3]. در فرآیند ساخت پست‌وکور ریخته‌گری، برای قالب‌گیری از ریشه دندان، از پین‌جت به عنوان قالب ریشه (پست) و از رزین آکرلیک به عنوان تاج (کور یا هسته) استفاده می‌شود تا بر اساس الگوی ایجاد شده، پست‌وکور در لابراتوار ریخته‌گری شود. شکل ۱ مراحل فرآیند قالب‌گیری ریشه دندان را برای ساخت پست‌وکور نشان می‌دهد.

انتخاب نادرست جنس پین‌جت می‌تواند چسبندگی کم رزین آکرلیک به آن را موجب شود که در نتیجه، هسته قرارگرفته بر روی کلاهک پین‌جت در حین فرزکاری جدا شده و باعث اختلال در فرآیند قالب‌گیری می‌شود. همچنین، جنس پین‌جت تاثیر به‌سزایی بر استحکام و شکنندگی پین‌جت دارد. به دلیل گران قیمت بودن موادی مانند پلی‌کربنات (PC) که چسبندگی لازم و استحکام مناسب برای پین‌جت را دارد، در این پژوهش تلاش شد تا از ماده‌ای ارزان قیمت با چسبندگی لازم و استحکام مناسب برای تولید پین‌جت استفاده شود.

هریس و همکاران [4] به منظور بررسی استحکام چسبندگی دو ماده آکریلونیتریل‌استایرن آکریلات (ASA) و آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) با ماده منعطف پلی‌یورتان حرارتی (TPU) به عنوان چسب، از آزمون برشی لب‌روی هم (Lap Shear Test) استفاده کردند. نتایج نشان داد استحکام چسبندگی ASA-TPU و ABS-TPU، به ترتیب ۴/۷ و ۶/۴ مگاپاسکال به دست آمد. لبونو و همکاران [5] پژوهشی در مورد اثر دمای محیط آماده‌سازی نمونه‌ها بر استحکام چسبندگی لوله‌های پلی‌اتیلن با رزین آکرلیک انجام دادند. آن‌ها نمونه‌ها را دماهای ۱۰-، ۵-، ۰، ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد آماده کردند. پس از انجام آزمون برشی لب‌روی هم مطابق استاندارد ASTM D3163 نتیجه گرفتند، نمونه‌هایی که در دمای ۲۰ و ۱۰- درجه سانتی‌گراد آماده‌سازی شده، به ترتیب بیش‌ترین استحکام چسبندگی را با ۲/۷۲ و ۲/۷۲ مگاپاسکال و کم‌ترین استحکام چسبندگی را ۰/۱۰۵ مگاپاسکال دارند.

چن و همکاران [6] اثر ریزساختار سطحی را روی استحکام چسبندگی آلیاژ آلومینیوم عملیات سطحی‌شده و پرپیلن اصلاح‌شده با پیوند مالئیک‌انیدرید را بررسی کردند. آن‌ها با پرداخت سطح ورق‌های آلومینیومی و آنودایزکردن با اسیدازلیک سطحی با تخلخل‌های بسیار کوچک و با آنودایزکردن با اسیدفسفریک سطحی با تخلخل‌های بزرگ‌تر را بر روی نمونه‌ها ایجاد کردند. نتایج آزمون برشی نشان داد که استحکام برشی نمونه‌هایی که ورق آلومینیوم آن‌ها تنها پرداخت سطحی شده و بدون تخلخل و زبری بودند برابر با ۱/۷۶ مگاپاسکال و نمونه‌هایی که ورق آلومینیوم آن‌ها با اسیدازلیک و اسیدفسفریک آنودایز شدند به ترتیب ۶/۴۱ مگاپاسکال و ۱۰/۰۵ مگاپاسکال بودند. همچنین، تجزیه و تحلیل

مدت زمان ۱۰ ثانیه خنک شد و اعوجاج قطعه در راستای ضخامت ۱/۳ میلی‌متر بود.

هوانگ و همکاران [11] پژوهشی را برای بهینه‌سازی عوامل فرآیند قالب‌گیری تزریق پلاستیک یک قطعه دیواره‌نازک برای رسیدن به حداقل اعوجاج انجام دادند. آن‌ها با روش تاگوچی عوامل سرعت تزریق، فشار تزریق، دمای قالب، دمای ذوب و زمان نگهداری را تجزیه و تحلیل کردند. آن‌ها با ساخت قالب تزریق پلاستیک دو حفره‌ای و اعمال عوامل بهینه به ماشین تزریق، قطعه مورد نظر را تولید کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد عوامل بهینه شامل سرعت تزریق ۹۹ میلی‌متر بر ثانیه، فشار تزریق ۶۵ مگاپاسکال، دمای قالب ۶۰ درجه سانتی‌گراد، دمای مذاب ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری ۴ ثانیه بود. آن‌ها پس از اندازه‌گیری اعوجاج قطعات تولیدی با ماشین اندازه‌گیری مختصات (Coordinate Measuring Machine)، اختلاف اعوجاج بسیار ناچیزی را در روش‌های شبیه‌سازی و تجربی مشاهده کردند.

پلی‌کربنات علاوه بر این‌که قیمت بالایی دارد، به دلیل ویسکوزیته بالا و شرایط نگهداری دشوار (جذب رطوبت بالا که باعث ایجاد حباب‌های هوا در قطعه و صرف مدت زمان طولانی برای خشک‌کردن می‌شود [12])، فرآیند تزریق پلاستیک سختی دارد. بنابراین، تولید پین جت از پلی‌کربنات گران تمام خواهد شد. از سوی دیگر، استحکام و چسبندگی پین جت به رزین آکرلیک به‌عنوان دو معیار مهم برای خارج‌کردن بدون عیب الگوی قالب‌گیری شده از ریشه دندان بوده که توجه به آن‌ها در انتخاب جنس پین جت ضروری است. بنابراین، در این مقاله، سعی شده است تا جایگزینی مناسب برای پلی‌کربنات برای تولید پین جت معرفی شود که هم ارزان قیمت بوده، هم تزریق پلاستیک آن ساده‌تر باشد و هم دارای استحکام و چسبندگی لازم به رزین آکرلیک باشد. ابتدا، قیمت‌گزینه‌های مناسب برای تولید پین جت از بازار گرفته شد و آزمون برشی لب‌روی هم برای سنجش چسبندگی پلیمرهای اقتصادی انتخابی به رزین آکرلیک و آزمون کشش برای ارزیابی استحکام آن‌ها انجام پذیرفت. برای ساخت نمونه‌های اولیه از پین جت، یک قالب تزریق پلاستیک ساخته شد. به دلیل سوزنی و مخروطی بودن شکل پین جت و قطر کم آن، هم‌چنین به دلیل تفاوت در ویسکوزیته مواد مختلف، تعیین عوامل فرآیند تزریق بسیار مهم است. بنابراین، با استفاده از نرم‌افزار مولدفلو اینسایت (Moldflow Insight Software)، فرآیند تزریق تحلیل شد و طی آن، عوامل فرآیند به‌دست آمد.

## ۲- آزمون‌های تجربی

### ۲-۱- مواد

در این پژوهش، هشت نوع ماده ترموپلاستیک شامل آکریلونیتریل‌بوتادین‌استایرن (ABS) گرید SD0150، پلی‌کربنات (PC)، پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA)، پلی‌استایرن مقاوم به ضربه

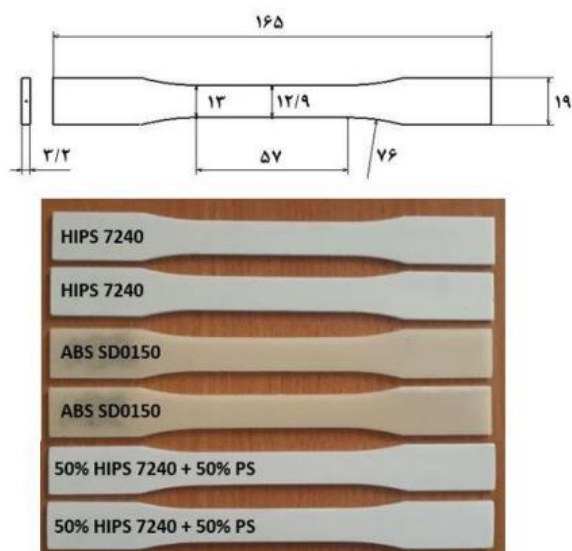
این آزمون نشان داد که استحکام چسبندگی به طور قابل‌توجهی به ریزساختار و زبری سطح بستگی دارد.

مورتی و همکاران [7] بهبود چسبندگی بین سطوح ورق‌های از جنس پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه و پلی‌اتیلن چگالی بالا را با فرآیند پلاسمای هوای آزاد مورد بررسی قرار دادند. برای چسباندن ورق‌ها به یک‌دیگر از دو چسب آکرلیک و اپوکسی استفاده شد. نتایج نشان داد فرآیند پلاسمای در هوای آزاد، استحکام چسبندگی سطوح ورق‌ها را با بالابردن انرژی سطح آن‌ها افزایش داد. هم‌چنین، چسب آکرلیک نسبت به اپوکسی برای چسبندگی سطوح نمونه‌ها با کمک فرآیند پلاسمای مناسب‌تر بود. در نهایت، انرژی سطح پلی‌اتیلن چگالی بالا از ۰/۰۲۸ نیوتون بر متر به ۰/۰۷۲ نیوتون بر متر و برای پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه از ۰/۰۲۸ نیوتون بر متر به ۰/۰۵۸ نیوتون بر متر افزایش یافت.

چاندریکا و همکاران [8] پژوهشی در مورد قدرت چسبندگی بین پلی‌کربنات و آلومینیوم از طریق آزمون پیل (Peel Test) انجام دادند. استحکام چسبندگی با تغییر زاویه بین نمونه‌ها (زاویه پیل)، سرعت حرکت فک متحرک (سرعت پیل) و نیروی کششی واردشده بر نمونه (نیروی پیل) در آزمون پیل اندازه‌گیری شد و حداکثر استحکام چسبندگی و عوامل بهینه با استفاده از روش تاگوچی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آن‌ها گزارش دادند که حداکثر استحکام چسبندگی بین این دو ماده برابر ۳۷/۳۲ نیوتون بر میلی‌متر مربع بود که در زاویه ۹۰ درجه، سرعت پیل ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه و نیروی ۳۰ نیوتون حاصل شد.

ویشنووراتانان و همکاران [9] پژوهشی برای بهینه‌سازی عوامل فرآیند قالب‌گیری تزریق پلاستیک به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار مولدفلو اینسایت انجام دادند. آن‌ها از طریق طراحی آزمایش تاگوچی، اثر عوامل دمای مذاب، دمای قالب، زمان تزریق و زمان خنک‌کاری را بر روی کیفیت یک قطعه دیواره‌نازک از جنس ABS و زمان چرخه فرآیند بررسی کردند. نتایج نشان داد که زمان چرخه بهینه در این شبیه‌سازی ۲۴ ثانیه است و در دمای مذاب ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، دمای قالب ۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان تزریق ۱/۵ ثانیه به‌دست آمد.

کون و سانگ [10] پژوهشی در مورد شبیه‌سازی فرآیند قالب‌گیری تزریق پلاستیک یک قطعه دیواره‌نازک (ضخامت ۰/۳۱ میلی‌متر) از جنس مخلوط PC و ABS را با نرم‌افزار مولدکس 3D (Moldex3D) انجام دادند. آن‌ها بر روی سطح قطعه هشت دریچه سوزنی (Pin Gate) تعبیه کردند. نتایج نشان داد که فشار در محل تزریق ابتدا به دلیل حرکت جبهه مذاب در سیستم راهگامی به‌طور یکنواخت افزایش یافت و سپس با رسیدن مذاب به دریچه‌ها و دیواره‌ی نازک حفره، جهش کرده و به ۹۸/۵۲ مگاپاسکال رسید. از سوی دیگر، نیروی گیره‌بندی نیز به‌طور قابل‌توجهی تا ۲۱۰ تن افزایش یافت. قسمت‌های نازک‌تر قطعه در ۰/۶ ثانیه و در نهایت کل قطعه در



شکل ۳) نمونه‌های ساخته شده برای آزمون کشش و ابعاد هندسی آن

#### ۲-۴- آزمون نرخ جریان مذاب (Melt Flow Rate)

نرخ جریان مذاب جرم پلیمری است که از یک قالب با ابعاد مشخص، تحت فشار و دمای مشخص در مدت زمان ۱۰ دقیقه عبور می‌کند. این آزمون مطابق با استاندارد ASTM D1238 [17] برای ماده HIPS 7240 انجام شد. هدف از این آزمون، اعمال نتیجه آن در بخش خواص رئولوژیکی در نرم‌افزار مولدفلو اینسایت است. ابتدا دمای دستگاه برابر با ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. پس از ریختن ۶ گرم گرانول به داخل سیلندر، یک وزنه ۵ کیلوگرم بر روی پیستون دستگاه قرار گرفت. سپس طبق استاندارد آزمون، در فاصله زمانی ۱ دقیقه مواد اکستروود شده توسط تیغه دستگاه برش داده شد. به منظور اطمینان از تکرارپذیری نتایج، این فرآیند با ۶ مرتبه تکرار صورت پذیرفت. چگالی مذاب یکی از متغیرهای لازم برای محاسبه‌ی نرخ جریان مذاب است. بر روی پیستون دستگاه دو خط کالیبره به فاصله ۲/۵۴ سانتی‌متر برای محاسبه جرم مذاب اکستروود شده از دستگاه وجود دارد. با توجه به رابطه (۱)، چگالی مذاب (d) برای ماده HIPS 7240 محاسبه شد. M جرم پلیمر اکستروود شده است که در مدت زمان جابه‌جایی فاصله دو خط کالیبره روی پیستون از دستگاه نرخ جریان مذاب خارج می‌شود.

$$d = \frac{M}{1.804} \quad (1)$$

نرخ جریان مذاب برای ماده HIPS 7240 طبق رابطه (۲) محاسبه شد. L فاصله دو خط کالیبره است که از روی پیستون اندازه‌گیری شد و t مدت زمانی است که فاصله دو خط کالیبره روی پیستون طی می‌شود که توسط ثانیه‌شمار به دست آمد. با توجه به قیمت و نتایج آزمون‌های پیل و کشش، ماده HIPS 7240 به‌عنوان ماده نهایی انتخاب شد. برای به دست آوردن نرخ جریان مذاب ماده HIPS 7240، مواد به صورت رشته‌ای از دستگاه مربوطه اکستروود شدند.

$$MFR = \frac{426 \times L \times d}{t} \quad (2)$$

گرید ۷۲۴۰ (HIPS 7240)، پلی‌پروپیلن (PP) گرید Z30S، پلی‌پروپیلن گرافت شده با مالئیک‌انیدرید (PP-g-MA)، پلی‌اتیلن گرافت شده با مالئیک‌انیدرید (PE-g-MA) و مخلوط ۵۰ درصد پلی‌استایرن مقاوم به ضربه و ۵۰ درصد پلی‌استایرن (50% HIPS + 50% PS) بررسی شدند. دلیل استفاده از این مواد، تامین خواص مورد نظر پژوهش (استحکام و چسبندگی لازم)، در دسترس بودن و ارزان قیمت بودن آن‌ها نسبت به مواد دیگر است. هم‌چنین، این مواد رایج‌ترین مواد با کاربرد وسیعی در صنعت تزریق پلاستیک به‌شمار می‌آیند.

#### ۲-۲- آزمون برشی لبروی هم

هدف از این آزمون سنجش استحکام چسبندگی مواد با رزین آکرلیک بود. نمونه‌های آزمون مطابق استاندارد ASTM D3163 [13] و با فرآیند تزریق پلاستیک ساخته شدند. هر جفت از نمونه‌ها به‌وسیله رزین آکرلیک GC America Inc (ساخته شرکت GC در آمریکا) به یک‌دیگر چسبانده شدند. رزین آکرلیک از دو جز مایع و پودر ساخته می‌شود. در حالی که جزء مایع از مونومر بی‌رنگ متیل‌متاکریلات (MMA) با یک کاتالیزور برای انجام واکنش شیمیایی بین پودر و مایع تشکیل شده است، پودر از پلیمر متیل‌متاکریلات (PMMA) با جرم مولکولی بالا تشکیل شده که در ترکیب آن یک آغازگر و پایدارکننده افزوده شده است [14-15]. همه نمونه‌ها دارای ابعاد یکسان که مطابق استاندارد هر ورق دارای عرض ۲۵ میلی‌متر، ضخامت ۱/۶ میلی‌متر و طول ۹۸/۹ میلی‌متر بود. شکل ۲ هشت نمونه با جنس‌های متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۲) نمونه‌های تهیه شده برای آزمون برشی لبروی هم

#### ۲-۳- آزمون کشش

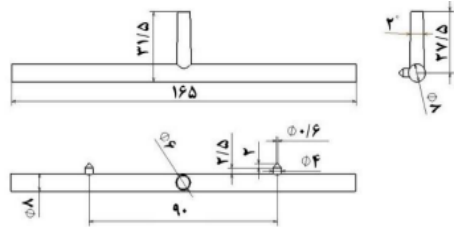
نمونه‌ها برای آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D638 [16] با ماشین‌کاری توسط فرز کنترل عددی (CNC) ساخته شد. هدف از این آزمون سنجش استحکام تسلیم سه ماده HIPS، ABS SD0150 و 7240 + 50% HIPS 7240 + 50% PS بود. این مواد به دلیل ارزان قیمت بودن و چسبندگی کافی به رزین آکرلیک تحت آزمون کشش قرار گرفتند. شکل ۳، نمونه‌های دمبلی شکل، ابعاد و مشخصات هندسی آن را نشان می‌دهد.

آزمون کشش توسط دستگاهی انجام شد که برای آزمون برشی لبروی هم استفاده شده بود. این آزمون با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید و هر آزمون برای هر نمونه سه مرتبه تکرار شد.



### ۳-۲- سیستم راهگاهی

در طراحی قالب تزریق به دلیل هزینه ماشین‌کاری کم‌تر نسبت به قالب با حفره‌های بیش‌تر از قالبی با دو حفره استفاده شد. شکل ۵، مشخصات هندسی و ابعادی راهگاه اصلی و فرعی، دریچه و اسپرو تزریق را نشان می‌دهد.



شکل ۵) مشخصات هندسی و ابعادی سیستم راهگاهی قالب تزریق دو حفره‌ای پین جت

### ۳-۳- دریچه تزریق

برای تعیین دریچه تزریق از تحلیل موقعیت دریچه استفاده شد. گره ۲۱۷۴۶۵ که در قسمت بزرگ‌ترین قطر پین جت است به عنوان موقعیت دریچه تزریق تعیین شد. اگر موقعیت دریچه در قسمت با قطر کم پین جت انتخاب شود، سرد شدن باعث تشدید افت فشار مذاب شده و ممکن است تا حفره به طور کامل پر نشود. در این پژوهش، برای هر دو حفره از دریچه سوزنی به دلیل شکل هندسی پین جت، کاهش اثر باقی‌مانده از دریچه بر روی پین جت، راحت‌تر پر شدن حفره‌ها با افزایش سرعت برشی و کاهش ویسکوزیته مذاب هنگام عبور از دریچه و جدا شدن راحت‌تر سیستم راهگاهی از پین جت استفاده شد.

### ۳-۴- تحلیل‌های پرکردن و تراکم

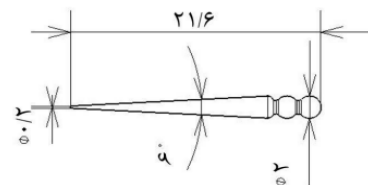
پس از انتخاب نوع و موقعیت دریچه تزریق، برای به دست آوردن عوامل فرآیند تزریق (فشار، سرعت، زمان و دمای تزریق) و هم‌چنین بررسی عیوب احتمالی ناقص پر شدن، حبس هوا و خطوط جوش، تحلیل‌های پرکردن و تراکم انجام شد. پس از اعمال این عوامل پارامترها به ماشین تزریق در روش تجربی، پین جت بدون عیب و با کیفیت مطلوب تولید گردید.

### ۳-۵- تعیین جنس پلیمر

هر چند پس از انجام آزمون‌های برشی لب‌روی هم و کشش و البته توجه به قیمت، HIPS 7240 به عنوان جنس مناسب برای پین جت انتخاب شد، این ماده برای انجام شبیه‌سازی تزریق پلاستیک در کتابخانه مواد نرم‌افزار مولدفلو اینسایت وجود نداشت. پس از تعیین نرخ جریان مذاب برای HIPS 7240، ماده‌ای مشابه با نام HIPS 60HR انتخاب شد که نرخ جریان مذابی نزدیک به HIPS 7240 دارد. جدول ۱، خواص مهم و تاثیرگذار HIPS 7240 بر عوامل فرآیند تزریق را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، برخی از خواص ماده HIPS 7240 از جمله دمای انتقال شیشه‌ای، تنش برشی و

### ۳- شبیه‌سازی در مولدفلو اینسایت

مخروطی بودن شکل پین جت و مقدار قطر آن که در قسمت انتهایی ۰/۲ میلی‌متر است می‌تواند باعث افت ناگهانی فشار و دمای تزریق و در نتیجه، پر نشدن کامل قالب شود. از سوی دیگر، به دلیل تفاوت ویسکوزیته مواد مختلف، تعیین پارامترهای تزریق مانند فشار، سرعت و زمان تزریق بسیار مهم است. بنابراین، فرآیند تزریق با استفاده از نرم‌افزار مولدفلو اینسایت تحلیل شد و عوامل فرآیند مشخص گردید. به کمک این نرم‌افزار می‌توان تحلیل‌های پیشرفته‌ای از جمله پر شدن، تراکم، خنک‌کاری، تعیین موقعیت دریچه و اعوجاج را بر روی قطعه و قالب انجام داد. پین جت، پس از طراحی در نرم‌افزار کتیا، با پسوند STL ذخیره و به نرم‌افزار مولدفلو اینسایت وارد شد. شکل ۴ مشخصات هندسی و ابعادی پین جت طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴) مشخصات هندسی و ابعادی پین جت مدل‌سازی شده

### ۳-۱- شبکه‌بندی

در نرم‌افزار مولدفلو اینسایت سه نوع شبکه‌ی میان‌صفحه‌ای (Midplane)، دوبعدی و سه‌بعدی وجود دارد [9]. به دلیل کم بودن نسبت قطر به طول پین جت و متقارن محوری بودن هندسه آن، از شبکه سه‌بعدی استفاده شد. شبکه‌های میان‌صفحه‌ای و دوبعدی باعث نامنظم شدن شبکه‌بندی پین جت می‌شود. در این دو شبکه، تطابق اجزا (رو به رو بودن دو جزء) امری حیاتی است که بر اساس شبیه‌سازی انجام شده با این دو نوع شبکه‌بندی، به دلیل متقارن محوری بودن پین جت و مخروطی بودن آن، تطابق اجزا از مقدار مجازش (۸۰ درصد [18]) کم‌تر بود. شبکه سه‌بعدی، اجزای توپر چهاروجهی با وجوه سه‌ضلعی دارد. در شبکه‌ی سه‌بعدی ایجاد شده برای پین جت، نسبت اندازه که نسبت عرض و ارتفاع یک جزء است برابر با ۲۰/۵ بود که مطابق راهنمای نرم‌افزار مولدفلو اینسایت [18] این عدد باید کم‌تر از ۳۰ باشد. طول لبه اجزا ۰/۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد و تراکم شبکه برابر با ۱۲۰۷۸۰۶ اجزا در حجم ۰/۰۳ سانتی‌متر مکعب بود که باعث افزایش دقت محاسبات نرم‌افزار مولدفلو اینسایت می‌شود. در یک شبکه‌بندی کم‌تراکم، برخی از پدیده‌ها از جمله خطوط جوش و نقاط حبس هوا به خوبی پیش‌بینی نشده و تطابق اجزا نیز از مقدار مجازش کم‌تر می‌گردد. هم‌چنین، افزایش بیش‌ازحد تراکم شبکه زمان شبیه‌سازی را به شدت افزایش می‌دهد.

نرخ برش بیشینه به دلیل تاثیر کم [18] بر نتایج تحلیل‌های پرشدن و تراکم با ماده HIPS 60HR برابر در نظر گرفته شد.

**جدول ۱)** برخی از خواص مهم و تاثیرگذار ماده انتخابی در شبیه‌سازی مولدفلو اینسایت [19]

HIPS 7240 - TPC	HIPS 60HR - LG Chemical	خواص
آمورف	آمورف	ساختار مکانیکی
۲۳۰	۲۳۰	دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)
۲۵	۵۰	دمای قالب (درجه سانتی‌گراد)
۰/۳۰	۰/۳۰	تنش برشی بیشینه (مگاپاسکال)
۴۰۰۰	۴۰۰۰	نرخ برش بیشینه (یک بر ثانیه)
۹۲	۹۲	دمای انتقال شیشه‌ای (درجه سانتی‌گراد)
۵/۷۵	۶	نرخ جریان مذاب (گرم بر ۱۰ دقیقه)

### ۳-۶- تنظیمات فرآیند

در انتهای آماده‌سازی شبیه‌سازی در نرم‌افزار، عوامل فرآیند تزریق (سرعت، دما تزریق و قالب و زمان تزریق) به‌عنوان ورودی‌های پنجره مربوط به عوامل تنظیم شد. جدول ۲ تنظیمات فرآیند در مولدفلو اینسایت را نشان می‌دهد.

**جدول ۲)** پارامترهای ورودی فرآیند تزریق در شبیه‌سازی مولدفلو اینسایت

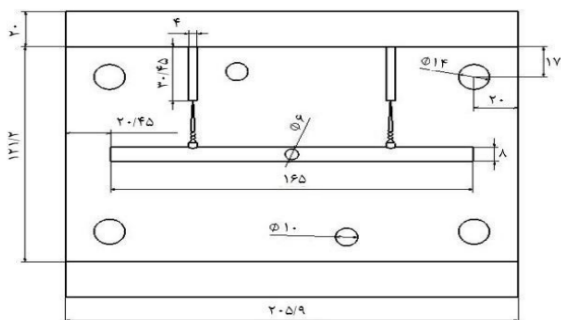
۱	زمان تزریق (ثانیه)
۲۳۰	دمای تزریق (درجه سانتی‌گراد)
۲۵	دمای قالب (درجه سانتی‌گراد)
۰/۳۰	سرعت تزریق (سانتی‌متر بر ثانیه)

### ۴- ساخت قالب تزریق پلاستیک پین‌جت دوحفره‌ای

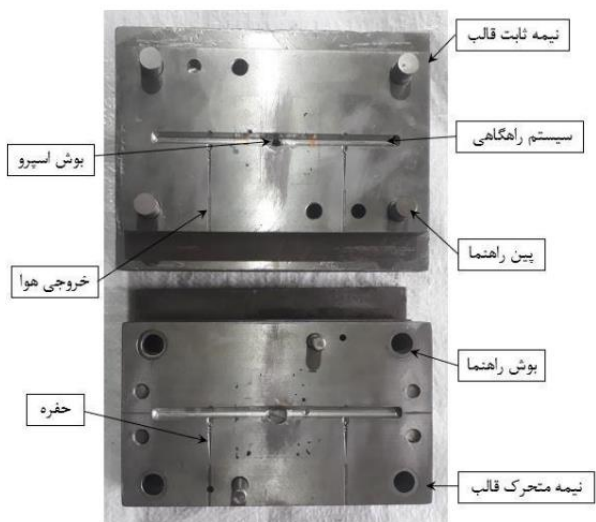
به منظور بررسی دقت و صحت شبیه‌سازی در نرم‌افزار مولدفلو اینسایت، مشابه با مدلی که مورد شبیه‌سازی قرار گرفت، یک قالب تزریق پین‌جت دوحفره‌ای ساخته شد که شکل ۶-الف نقشه نیمه ثابت آن را نشان می‌دهد. در شکل ۶-ب، نمایی از دو نیمه ثابت و متحرک قالب نشان داده شده و اجزای آن‌ها مشخص شده‌اند. پس از ماشین‌کاری سیستم راهگامی و حفره‌ها، سوراخ‌های بوش، خروجی هوا و سایر اجزای قالب با استفاده از فرز CNC، فرم نهایی و قسمت مخروطی‌شکل حفره‌ها توسط ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی ایجاد شد.

### ۵- نتایج و بحث

هدف از این پژوهش، طراحی و ساخت یک پین‌جت ارزان‌قیمت با استحکام مناسب و هم‌چنین چسبندگی لازم به رزین آکرلیک با انتخاب درست جنس ماده است.



(الف)

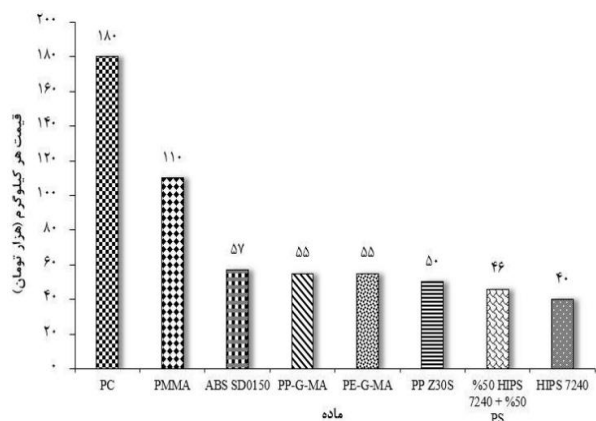


(ب)

**شکل ۶)** الف) نقشه نیمه‌ی ثابت قالب (ب) نمایی از دو نیمه‌ی ثابت و متحرک قالب و اجزای آن‌ها

### ۵-۱- مقایسه قیمت مواد

در این مقاله، هشت ماده پلیمری مورد بررسی قرار گرفتند که از رایج‌ترین و در دسترس‌ترین مواد و همچنین دارای قیمت مناسب بودند. شکل ۷ مقایسه قیمت این مواد را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که PC و PMMA نسبت به بقیه مواد بررسی شده از قیمت بالاتری برخوردار هستند.



**شکل ۷)** نمودار قیمت مواد پلیمری مقاله برای تعیین جنس پین‌جت (۱۴۰۱/۰۲/۰۱)

### ۳-۵- استحکام کششی مناسب

پس از بررسی قیمت و چسبندگی مواد، PC و PMMA به دلیل گران قیمت بودن و PP-G-MA، PP Z30S و PE-G-MA به دلیل عدم چسبندگی لازم به رزین آکرلیک برای جنس پین جت مطلوب نیستند. از آنجا که الگوی قالبگیری شده در فرآیند پست وکور نباید در حین خروج از کانال ریشه دندان تغییر شکل پلاستیک دهد، هدف دیگر در این پژوهش رسیدن به استحکام تسلیم مناسب است. پس از انجام آزمون کشش، نتایج به صورت نمودار تنش و کرنش مهندسی به دست آمد. جدول ۳ استحکام تسلیم، استحکام کششی و استحکام شکست سه ماده ABS SD0150، HIPS 7240 و 50% PS + 7240 HIPS را نشان می‌دهد که این سه ماده هر دو ویژگی ارزان بودن و چسبندگی مناسب را داشتند.

جدول ۳) اطلاعات به دست آمده از نمودار تنش و کرنش مهندسی

ماده	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	استحکام شکست (MPa)
ABS SD0150	۳۸/۵۵	۴۰/۰۳	۳۷/۴۸
HIPS 7240	۱۰/۹۱	۱۱/۰۳	۸/۰۹
50% PS + 7240 HIPS	۸/۰۱	۸/۴۱	۸/۴۰

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که خواص مکانیکی SD0150 ABS بسیار بالاتر از دو ماده دیگر است و HIPS 7240 خواص مکانیکی بالاتری نسبت به 50% PS + 7240 HIPS دارد. این در حالی است که همه این مواد دارای استحکام تسلیم مناسب برای جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک در حین خارج کردن الگوی قالبگیری شده هستند. بنابراین، با توجه به قیمت مواد (شکل ۷)، HIPS 7240 به عنوان ماده نهایی برای پین جت پیشنهاد شد.

### ۴-۵- نرخ جریان مذاب HIPS 7240

پس از انجام آزمون، نرخ جریان مذاب با توجه به رابطه (۲)  $5/750$  گرم بر ۱۰ دقیقه به دست آمد که در بخش مواد نرم افزار مولدفلو اینسایت برای انتخاب ماده مورد استفاده قرار گرفت. جرم میانگین رشته‌های اکستروژده شده برابر با  $0/015 \pm 0/576$  گرم بود که نشان‌دهنده تکرارپذیری نتایج آزمون نرخ جریان مذاب است. در محاسبه نرخ جریان مذاب برای ماده HIPS 7240، جرم پلیمر اکستروژده شده برابر با  $1/644$  گرم و مدت زمان جابه‌جایی پیستون بین فاصله دو خط کالیبره شده  $170/8$  ثانیه بود.

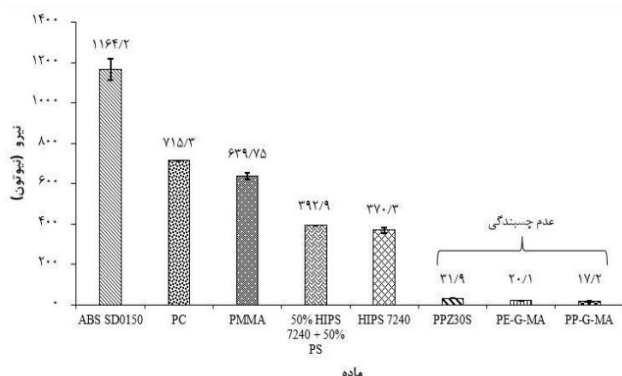
### ۵-۵- مقایسه عوامل فرآیند تزریق پین جت در روش شبیه‌سازی و

#### تجربی

با انجام شبیه‌سازی در نرم افزار مولدفلو اینسایت، عوامل مورد نیاز برای تنظیم ماشین تزریق پلاستیک به دست آمد. این داده‌ها که در جدول ۴ ارائه شده‌اند مناسب‌ترین مقادیری هستند که به منظور پرشدن کامل حفره‌ها در قالب تزریق پین جت توسط شبیه‌سازی مشخص شدند. نزدیک بودن عوامل فرآیندی در آزمایش‌های تجربی نسبت به مقادیر حاصل از شبیه‌سازی از دستاوردهای این پژوهش

### ۲-۵- چسبندگی ورق‌های پلیمری به رزین آکرلیک

چسبندگی پین جت به رزین آکرلیک در فرآیند پست وکور یک امر حائز اهمیت است که شکل ۸ چسبندگی جنس‌های بررسی شده به رزین آکرلیک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مواد PP-G-MA، PE-G-MA و PP Z30S چسبندگی بسیار کمی به رزین آکرلیک داشته و می‌توان گفت که چسبندگی ندارند. ماده PP Z30S یک پلیمر غیرقطبی است که اجازه برهم‌کنش شیمیایی را با رزین آکرلیک نمی‌دهد [20] و از سوی دیگر، PP Z30S یک پلیمر نیمه‌کریستالی است که به دلیل خاصیت بلورینگی، دارای زنجیره‌های مولکولی منظم بوده که نفوذپذیری را کاهش می‌دهد [21]. هر چند مواد PP-G-MA و PE-G-MA به دلیل پیوند با ۲ درصد مالیک‌انیدرید تا حدی قطبی هستند [20] ولی درصد پایین آن تاثیر چندانی بر چسبندگی این مواد نمی‌گذارد. این چسبندگی بسیار ضعیف باعث جدا شدن ورق‌ها از یک‌دیگر در ناحیه آغشته شده به رزین آکرلیک در آزمون برشی لب‌روی هم شد. در نتیجه، استفاده آن‌ها به عنوان جنس پین جت باعث تخریب الگوی قالبگیری شده در فرآیند پست وکور می‌شود. پنج ماده دیگر مطابق نمودار شکل ۸، دارای چسبندگی لازم به رزین آکرلیک بودند. چسبندگی مناسب HIPS 7240 به رزین آکرلیک نیز به دلیل حضور ذرات بوتادین در ساختار آن است، این ذرات یک الاستومر انعطاف‌پذیر با دمای انتقال شیشه‌ای پایین هستند و اجازه نفوذ اتم‌های موجود در مولکول‌های رزین آکرلیک را به HIPS 7240 می‌دهد [22]. پلیمر PMMA با بخش پودر رزین آکرلیک ترکیب شیمیایی یکسانی دارند که جاذبه بین مولکولی قوی با آن ایجاد می‌کند [22]. PC دارای ساختار شیمیایی قطبی است که با ایجاد برهم‌کنش شیمیایی چسبندگی مناسب را به رزین آکرلیک دارد [22]. ABS SD0150 دارای یک قسمت آکرلونیتریل است که این عامل قطبی یک برهم‌کنش شیمیایی با رزین آکرلیک ایجاد می‌کند. همچنین، بوتادین موجود در ساختار آن، اجازه نفوذ رزین آکرلیک را به ABS SD0150 می‌دهد و باعث ایجاد یک برهم‌کنش فیزیکی (گره خوردن زنجیره‌های مولکولی) می‌شود [22].



شکل ۸) نمودار چسبندگی مواد پلیمری به رزین آکرلیک

۵-۶- یکنواختی زمان پرشدن حفره‌ها در شبیه‌سازی

مطابق شکل ۱۰- الف، مذاب در زمان‌های متفاوت به صورت یکنواخت راهگاه و حفره‌ها را پر کرده است که این امر نشان‌دهنده متوازن بودن سامانه راهگاهی و حفره‌ها است. متوازن بودن سامانه راهگاهی و یکنواختی زمان پرشدن باعث جلوگیری از ایجاد پلیسه، سوختگی سطح قطعه، ناقص پرشدن حفره‌ها و کاهش اعوجاج می‌شود [23-24]. شکل ۱۰-ب، سامانه راهگاهی و حفره‌های پین‌جت تولیدشده با روش تزریق پلاستیک نشان می‌دهد. در روش تجربی نیز مانند شبیه‌سازی، پرشدن حفره‌ها به صورت متوازن و یکنواخت و بدون عیوب پلیسه، ناقص پرشدن، سوختگی سطح و فرورفتگی بود. نتایج شکل ۱۰-الف نشان داد که قالب پین‌جت دو حفره‌ای با چیدمان و سامانه راهگاهی مناسب در مدت زمان ۱ ثانیه پر می‌شود.

۵-۷- نمودار فشار مذاب در محل تزریق

فشار تزریق در محل ورودی مذاب به قالب در هر نقطه از موقعیت جبهه مذاب دارای مقدار مختلف است. مطابق شکل ۱۱، در شروع چرخه، فشار تا زمان ۰/۹۳ ثانیه به طور یکنواخت افزایش می‌یابد که به دلیل یکنواختی قطر اسپرو و سامانه راهگاهی اصلی است. در ورودی دریاچه (زمان ۰/۹۳ ثانیه)، فشار تزریق جهش کرده است که نشان دهنده عدم توازن جریان و سرعت گرفتن جبهه مذاب به دلیل کاهش قابل ملاحظه سطح مقطع است. این افزایش فشار با شیب تندی تا ۱۹ مگاپاسکال ادامه می‌یابد و در پایان، منحنی به حالت افقی تبدیل می‌شود که شروع مرحله تراکم را نشان می‌دهد.

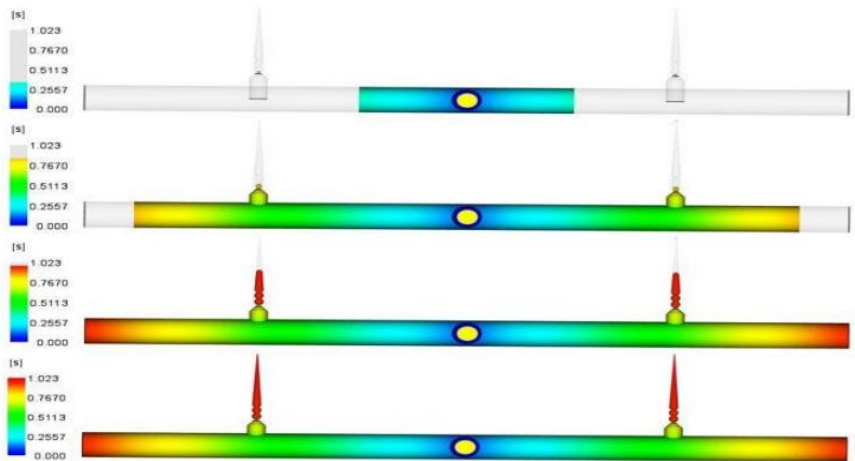
است که باعث تولید پین‌جت‌هایی بدون نقص شد. شکل ۹ نمایی نزدیک از یک پین‌جت تولیدشده از جنس HIPS 7240 در آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جزییات پین‌جت به صورت کامل در حین فرآیند تزریق ایجاد شده‌اند. در عین حال، اختلاف ناچیزی که بین فشارها و سرعت‌های تزریق تجربی و شبیه‌سازی دیده می‌شود به دلیل پلیسه‌کردن قسمت انتهایی پین‌جت در حین تولید بود که با کاهش فشار و سرعت تزریق در آزمایش‌های تجربی به ترتیب به اندازه‌ی ۱ مگاپاسکال و ۰/۰۳ سانتی‌متر بر ثانیه نسبت به مقادیر پیشنهادی توسط شبیه‌سازی، این عیب حذف شد.

جدول ۴) پارامترهای فرآیند تزریق پین‌جت در روش شبیه‌سازی و تجربی

پارامترهای فرآیند	شبیه‌سازی	تجربی
فشار تزریق (مگاپاسکال)	۱۹	۱۸
سرعت تزریق (سانتی‌متر بر ثانیه)	۰/۳۰	۰/۲۷
زمان تزریق (ثانیه)	۱	۱
دمای مذاب (درجه سانتی‌گراد)	۲۳۰	۲۳۰
دمای قالب (درجه سانتی‌گراد)	۲۵	۲۵



شکل ۹) نمایی از پین‌جت تولیدشده از جنس HIPS 7240



(الف)



(ب)

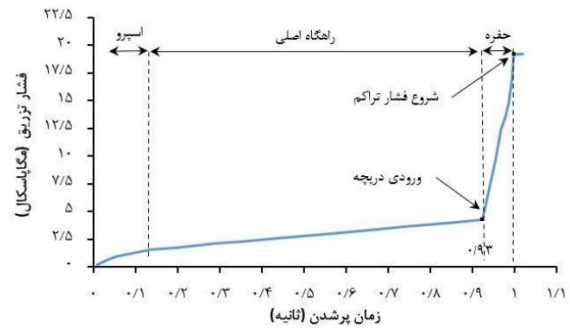
شکل ۱۰) الف) یکنواختی زمان پرشدن راهگاهی و حفره‌های پین‌جت در شبیه‌سازی ب) سیستم راهگاهی و پین‌جت تولیدشده در روش تجربی



روی منحنی این نمودار، فشار مذاب با افت یکنواخت و شیب ملایم رو به رو است. این ناحیه سامانه راهگهی قالب تزریق تا دریاچه است. از شماره ۶ به بعد، فشار مذاب افت شدیدی کرده است که به دلیل ورود مذاب از دریاچه تزریق به حفرهها است. شکل ۱۲- الف یکنواختی دمای جبهه مذاب در حفرهها و سامانه راهگهی را نشان می‌دهد. از شماره ۱ تا ۹ روی منحنی این نمودار، دمای مذاب با شیب ملایم رو به افزایش است. این ناحیه از انتهای اسپرو در سامانه راهگهی قالب تزریق تا ابتدای حفره است (شکل ۱۲- الف). از شماره ۹ به بعد، دمای مذاب جهش کرده که به دلیل ورود مذاب به قسمت های با قطر کم (دریاچه و حفرهها) است. همچنین، با کاهش قطر حفره، اختلاف دمای مذاب نسبت به ناحیه ۱ تا ۹، ۲ درجه سانتی‌گراد بود.

**۵-۹- یکنواختی انقباض حجمی در حفرهها و سامانه راهگهی**

انقباض حجمی در سر مخروطی پین جت بیشتر از مناطق دیگر سامانه راهگهی و حفرهها و مقدار آن ۲/۶ درصد است. دلیل این انقباض حجمی بالا با توجه به شکل ۱۲- ب، افت فشار مذاب در این ناحیه است که باعث کاهش تراکم پلیمر مذاب شده [25] و انقباض حجمی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با توجه به شکل ۱۲- الف، افزایش دمای مذاب، در ناحیه سر پین جت به بیشترین مقدار خود رسیده است که این امر باعث افزایش انقباض می‌شود.

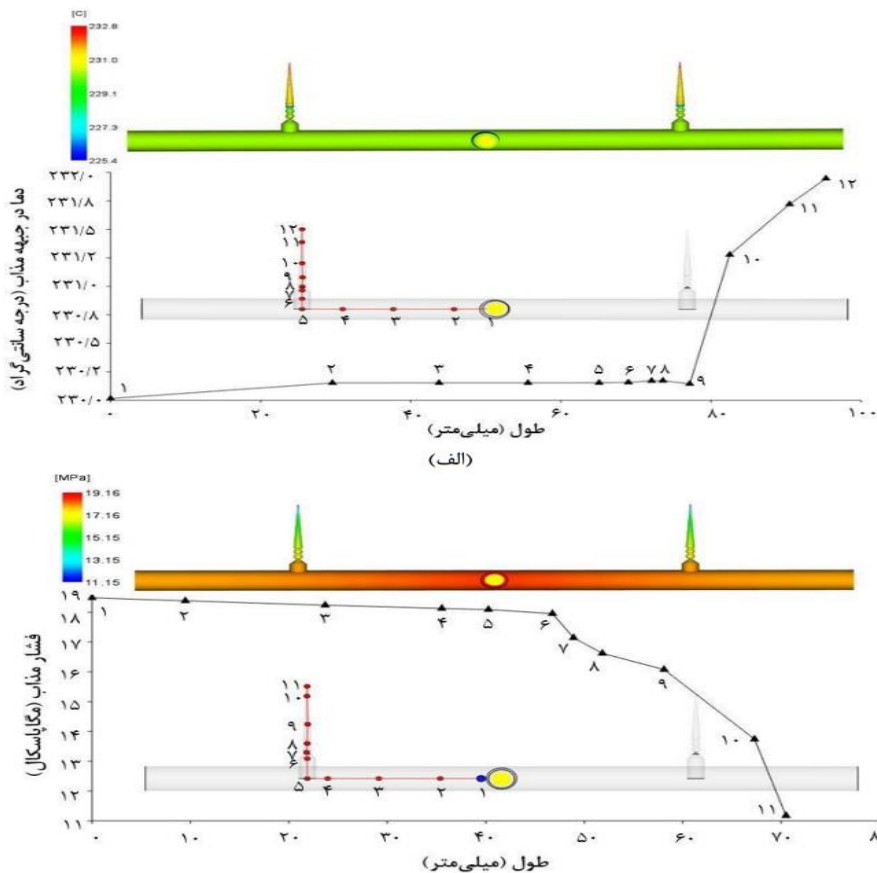


شکل ۱۱) نمودار فشار تزریق در محل تزری

**۵-۸- یکنواختی دمای جبهه مذاب و فشار در پایان پرشدن حفرهها و سامانه راهگهی**

شکل ۱۲- الف یکنواختی دمای جبهه مذاب در حفرهها و سیستم راهگهی را نشان می‌دهد. از شماره ۱ تا ۹ روی منحنی این نمودار، دمای مذاب با شیب ملایم رو به افزایش است. این ناحیه از انتهای اسپرو در سامانه راهگهی قالب تزریق تا ابتدای حفره است (شکل ۱۲- الف). از شماره ۹ به بعد، دمای مذاب جهش کرده که به دلیل ورود مذاب به قسمت های با قطر کم (دریاچه و حفرهها) است. همچنین، با کاهش قطر حفره، اختلاف دمای مذاب نسبت به ناحیه ۱ تا ۹، ۲ درجه سانتی‌گراد بود.

شکل ۱۲- ب، نمودار یکنواختی فشار مذاب در پایان تحلیل پرشدن را نشان می‌دهد. از شماره ۱ تا ۶ (از انتهای اسپرو تا ابتدای حفره)



شکل ۱۲) الف- نمودار یکنواختی دمای جبهه مذاب در حفرهها و سامانه راهگهی ب- نمودار یکنواختی فشار در پایان پرشدن حفرهها و سامانه راهگهی

در قسمت انتهایی حفره‌ها به دلیل امکان حبس هوا و ایجاد عیوب ناقص پرشدن و سوختگی سطح پین‌جت، خروجی هوا تعبیه شد.

#### ۵-۱۰- خطوط جوش

خطوط جوش در قسمت ابتدایی حفره‌ها ایجاد شده که دلیل این امر می‌توان کم‌بودن قطر دریچه (۰/۶ میلی‌متر) باشد. این موضوع باعث تلاطم و ایجاد دو جبهه‌ی مذاب می‌شود که زاویه برخورد آن‌ها به یکدیگر کم‌تر از ۱۳۵° بوده است. این خطوط جوش پس از تولید در پین‌جت دیده نشد.

#### ۵-۱۱- نرخ برش پیشینه و تنش برشی پیشینه در دیواره

نرخ برش پیشینه و تنش برشی پیشینه در دیواره پین‌جت به ترتیب ۳۴۰۰۰ یک بر ثانیه و ۰/۲۱۰ مگاپاسکال به دست آمد که از مقدار مجاز آن برای ماده استفاده شده کم‌تر بود. افزایش نرخ برش و تنش برشی پیشینه از مقدار مجاز ماده باعث بالارفتن دما و سوختگی سطح پین‌جت می‌شود و ضمن کاهش خواص مکانیکی، بر روی صافی سطح قطعه اثر می‌گذارد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی و ساخت پین‌جت ارزان‌قیمت با انتخاب جنس مناسب دارای استحکام لازم و چسبندگی مناسب به رزین آکریلیک مورد بررسی و بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد ماده HIPS 7240 ارزان‌قیمت‌ترین ماده از بین هشت ماده پلیمری این مقاله با قیمت ۴۰ هزار تومان که اولین معیار برای رسیدن به جنس مورد انتظار در این مقاله بود. پس از انجام آزمون‌های کشش و برشی لبروی هم، ماده HIPS 7240 با مقدار ۱۰/۹۱ مگاپاسکال، استحکام تسلیم لازم برای خارج کردن الگوی قالب‌گیری شده در فرآیند پست‌وکور و هم‌چنین چسبندگی مناسب پین‌جت ساخته شده از این ماده به رزین آکریلیک را داشت. این نتایج ثابت کرد این ماده برای انتخاب جنس پین‌جت مناسب بوده است. در حالی که زمان تزریق، دمای مذاب و دمای قالب در دو روش شبیه‌سازی و تجربی برابر و به ترتیب ۱ ثانیه، ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. فشار تزریق در روش شبیه‌سازی و تجربی به ترتیب ۱۹ مگاپاسکال و ۱۸ مگاپاسکال و سرعت تزریق به ترتیب ۰/۳ سانتی‌متر بر ثانیه و ۰/۲۷ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد که این امر توانایی و دقت شبیه‌سازی را در پیش‌بینی دو کمیت فشار و سرعت تزریق نشان می‌دهد. در این مقاله، به دلیل طرز قرارگیری حفره‌ها و توازن میان آن‌ها، هر دو حفره در مدت زمان ۱ ثانیه به صورت کامل و یکنواخت پر شد. از سوی دیگر، اختلاف دمای جبهه مذاب از ناحیه اسپرو تا حفره‌ها ۲ درجه سانتی‌گراد که باعث جلوگیری از انقباض نا متعادل و در نهایت اعوجاج می‌شود. فشار مذاب در پایان تحلیل پرشدن از ناحیه اسپرو تا انتهای حفره‌ها، ۸ مگاپاسکال و بیش‌ترین افت فشار در انتهای حفره‌ها به دلیل کاهش زیاد قطر نسبت به دیگر نواحی سیستم راهگامی و حفره‌ها بود. با توجه به اختلاف دما و فشار مذاب کم

در سامانه راهگامی و حفره‌ها، یکنواختی انقباض حجمی با اختلاف ۲/۶ درصد حاصل گردید. تنش برشی پیشینه و نرخ برش پیشینه در حفره‌ها به ترتیب ۰/۲۱ مگاپاسکال و ۳۴۰۰۰ یک بر ثانیه بود که از مقدار مجاز ماده HIPS 7240 کم‌تر است. نرخ برش بیش‌ازحد در حفره‌ها باعث بالارفتن دما در آن ناحیه و افزایش احتمال سوختگی سطح پین‌جت می‌شود. تنش برشی پیشینه غیر مجاز در دیواره باعث شکست زنجیره‌های مولکولی سطح پین‌جت شده و ضمن کاهش خواص مکانیکی، صافی سطح محصول را کاهش می‌دهد. خطوط جوش ایجاد شده در نتایج شبیه‌سازی مشکلی در عملکرد پین‌جت پس تولید آن نداشت.

**تائیدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافی ندارد.

**منابع مالی:** هزینه‌های این پژوهش توسط نویسندگان تأمین شده است.

#### مراجع

- 1- Watanabe MU, Anchieta RB, Rocha EP, Kina S, Almeida EO, Junior AC, Basting RT. Influence of crown ferrule heights and dowel material selection on the mechanical behavior of root-filled teeth: a finite element analysis. *Journal of Prosthodontics: Implant, Esthetic and Reconstructive Dentistry*. 2012; 21(4):304-11.
- 2- Soares CJ, Santana FR, Silva NR, Preira JC, Pereira CA. Influence of the endodontic treatment on mechanical properties of root dentin. *Journal of Endodontics*. 2007; 33(5):603-6.
- 3- Caputo AA, Standlee JP. Pins and posts--why, when and how. *Dental clinics of North America*. 1976; 20(2):299-311.
- 4- Harris CG, Jursik NJ, Rochefort WE, Walker TW. Additive manufacturing with soft TPU-adhesion strength in multimaterial flexible joints. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2019; 5:37.
- 5- LeBono J, Barton L, Birkett M. Low temperature tensile lap-shear testing of adhesively bonded polyethylene pipe. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017; 74:57-63.
- 6- Chen J, Du K, Chen X, Li Y, Huang J, Wu Y, Yang C, Xia X. Influence of surface microstructure on bonding strength of modified polypropylene/aluminum alloy direct adhesion. *Applied Surface Science*. 2019; 489:392-402.
- 7- Murthy VS, Vaidya U. Improving the adhesion of glass/polypropylene (glass-PP) and high-density polyethylene (HDPE) surfaces by open air plasma treatment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2019; 95:102435.
- 8- Chandrika KN, Karthikeyan K, Bharath N, Muthukumaran S, Stalin B. Peel test experimentation on polycarbonate-based aluminium using fusion

- deposition modeling technique. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 45:1983-6.
- 9- Vishnuvarthanan M, Panda R, Ilangovan S. Optimization of injection molding cycle time using moldflow analysis. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013;13(7):944-6.
- 10- Kwon YI, Song YS. Application of injection-compression molding to thin-walled polymeric parts. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2018; 30:161-7.
- 11- Huang YT, Huang CF, Peng BY, Chang CW, Cheng HC, Lin Y, Shen YK, Wang H. Experimental and numerical study determining the warpage phenomenon of thin-wall injection molding. *Advances in Polymer Technology*. 2020; 2020:1-3.
- 12- Kim DH, Song YS. Micro-injection molding using a polymer coated mold. *Microsystem Technologies*. 2019; 25:4011-7.
- 13- ASTM D. 1388-14. Standard Test Method for Stiffness of Fabric. United States: American Society for Testing and Materials. 2014.
- 15- Reynolds IR. A review of direct orthodontic bonding. *British journal of orthodontics*. 1975; 2(3):171-8.
- 16- ASTM International. ASTM D638-10-Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- 17- ASTM D. 1238-10. Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer. ICS number code. 2010; 83:20.
- 18- Autodesk Moldflow Insight 2019 Help
- 19- Autodesk Moldflow Insight 2019 Material List
- 20- Fu H, Yan C, Wei X, Deng W, Wang L. Study on Chlorination of maleic anhydride grafted Polypropylene. *Polymers and Polymer Composites*. 2013; 21(2):123-8.
- 21- Lasoski Jr SW, Cobbs Jr WH. Moisture permeability of polymers. I. Role of crystallinity and orientation. *Journal of Polymer Science*. 1959 Apr;36(130):21-33.
- 22- Awaja F, Gilbert M, Kelly G, Fox B, Pigram PJ. Adhesion of polymers. *Progress in polymer science*. 2009; 34(9):948-68.
- 23- Moayyedian M, Abhary K, Marian R. New design feature of mold in injection molding for scrap reduction. *Procedia manufacturing*. 2015; 2:241-5.
- 24- Yen C, Lin JC, Li W, Huang MF. An abductive neural network approach to the design of runner dimensions for the minimization of warpage in injection mouldings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;174(1-3):22-8.
- 25- Kurt M, Kamber OS, Kaynak Y, Atakok G, Girit O. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Materials & Design*. 2009;30(8):3217-24.