



## بررسی آشکارسازی حرکت مذاب و حباب در فرآیند پالتروژن مواد گرمانرم

امیرحسین دادو<sup>1</sup>، محمدگلزار<sup>2\*</sup>، داود اکبری<sup>3</sup>، محمدحسین محمدی پور<sup>4</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115-143، m.golzar@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 95/11/04

پذیرش: 96/01/21

### کلیدواژگان:

پالتروژن

آشکارسازی

جبهه جریان مذاب

ضریب آغشتگی

گرمانرم

### چکیده

فرآیند پالتروژن یکی از روش‌های پیوسته تولید پروفیل‌هایی با سطح مقطع ثابت است. کنترل پارامترها و شرایط در این فرآیند، به‌طور مستقیم بر کیفیت محصول تولیدی اثر داشته و از این رو ایجاد روشی برای مشاهده جریان در قالب می‌تواند بسیار مفید باشد. در این پژوهش فرآیند پالتروژن از یک ماده گرمانرم در قالب، با روش مستقیم مشاهده شد و اطلاعات مهمی از حرکت مذاب و شکل‌گیری حباب در حین فرآیند به دست آمد. برای این آشکارسازی از یک قالب پالتروژن تخت (همگرا- موازی) با طرفین شیشه‌ای استفاده گردید. برای حرارت دهی قالب در حین انجام فرآیند از یک منبع مادون قرمز استفاده شد تا علاوه بر تأمین حرارت پیوسته در تمامی قالب، فضای کافی برای نصب تجهیزات آشکارسازی فراهم شود. همچنین از موادی نظیر گرانول و الیاف رنگی جهت آشکارسازی بهتر جریان مذاب و مشاهده حرکت مذاب نسبت به الیاف استفاده شد. جهت مشاهده درون قالب و ثبت تصاویر از جریان مذاب، از دوربین تصویر برداری استفاده گردید. سرعت متوسط ذره در جریان مذاب در جهت طولی 0.43 سانتی‌متر بر ثانیه و در جهت عرضی 0.05 سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. همچنین سرعت متوسط طولی مذاب نسبت به سرعت کشنده در ابتدای قالب بیست درصد کمتر محاسبه شد که این سرعت رفته رفته تا انتهای قالب به سرعت کشنده نزدیک گردید، در حالی که سرعت عرضی در انتهای قالب به صفر رسید. برای حباب‌های تشکیل شده درون جریان مذاب در انتهای قالب نسبت به ابتدای قالب حدود 17 درصد کاهش حجم اندازه‌گیری گردید. مقدار فشار درون قالب 7 بار اندازه‌گیری شد و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت اندازه‌گیری شده، مقدار ضریب نفوذ با استفاده از رابطه داریسی  $10^{-8} \times 5$  متر مربع محاسبه شد.

## Visualization of flow and void in pultrusion process of thermoplastic composites

Amir-Hossein Dadou, Mohammad Golzar\*, Davood Akbari, Mohammad-Hossein Mohamadipour

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, m.golzar@modares.ac.ir

### Keywords

Pultrusion

Visualization

Liquid flow front

Impregnation ratio

Thermoplastic

### Abstract

Pultrusion is a continuous method for producing profiles with a constant cross section. Because mechanical properties of pultruded composite are related to process parameters, developing a method for flow visualization is essential. In this study pultrusion of thermoplastic polymers was visualized and useful data about polymer flow and void formation during process was obtained. In this regard a straight (converging-parallel) pultrusion die with glass walls has been used for direct observation of process during pultrusion. Glass die has been heated using IR radiation for continuous heat supply and providing enough space to install visualization equipment. Also colored pellets and fibers were used for better visualization. Average velocity of a specific particle was measured in axial and lateral directions  $V_x=0.43\text{cm/s}$  and  $V_y=0.05\text{cm/s}$ . The average axial velocity in the entrance part of the die was measured twenty percent lower than puller speed and it gradually converged to puller speed at the end of the die. Volume of voids among the die has been reduced about 0.17 compared with first voids volume in die entrance. By using darcy law, average velocity and 7 bar measured pressure inside die, the axial permeability was calculated  $5 \times 10^{-8} \text{m}^2$ .

### Please cite this article using:

Dadou, A.H. Golzar, M. Akbari, D. and Mohamadipour, M.H., "Visualization of flow and void in pultrusion process of thermoplastic composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 4, pp. 453-463, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

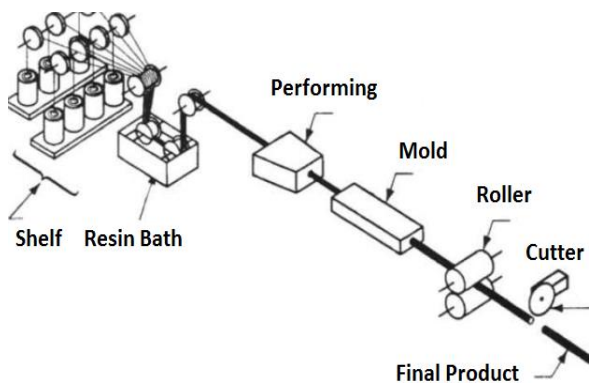


Fig. 1 Schematic of Pultrusion Process [1]

شکل 1 نمایی از فرایند پالتروژن [1]

در این قالب موقعیت دریاچه با توجه به محدودیت طراحی قالب در باز و بسته کردن آن، از یک گوشه بود. در این مطالعه با استفاده از یک دوربین معمولی، تعدادی تصویر از نحوه پر شدن قالب به دست آمد و بررسی کمی خاصی روی آن‌ها انجام نشد. این مطالعه یک مشاهده کیفی بود که ادامه پیدا نکرد. سایتو و همکارانش در سال 2000 به مطالعه نحوه شکل‌گیری برخی عیوب پرداختند. روش انجام این پژوهش استفاده از تابش پرتوهای لیزر روی سطح قالب در حال پر شدن از طریق پنجره باریک شیشه‌ای بود. در این پژوهش با روش ترموگرافی به مطالعه چگونگی تشکیل خط جوش پرداخته شد که در آن از درجه حرارت مذاب برای انتقال اطلاعات جریان استفاده گردید [7]. در همین زمینه یامادا و همکارانش در سال 2004 مطالعاتی را روی رفتار جریان در خط جوش با استفاده از تزریق‌های ناقص انجام دادند که هدف از آن یافتن ارتباط رفتار جریان با خواص مکانیکی خط جوش بود [8]. فتنی در سال 2008 به بررسی کیفی جریان دو بعدی در یک حفره مستطیلی (از سطح بزرگتر آن) با استفاده از دوربین سرعت بالا پرداخت. با توجه به اینکه تا آن زمان آشکارسازی وارد حوزه بررسی انقباض داخل قالب نشده بود این پژوهش منجر به یک درک کیفی و کمی کاربردی از رفتار ماده، در دوره سرد شدن قطعه در داخل قالب گردید [9]. در سال 2008 به روش و فتنی با استفاده از یک بلوک شیشه‌ای و دوربین سرعت بالا به بررسی تجربی جبهه جریان، رگه‌های نقره‌ای، انقباض و شکل‌گیری خط جوش [10, 11] پرداختند. این دو پژوهش به بررسی کمی جبهه جریان، سرعت‌سنجی یک نقطه در جبهه جریان، تغییرات لحظه‌ای نرخ حجمی جریان و برخی دیگر از پدیده‌ها معطوف بود. احمدزی در سال 2014 به آشکارسازی جریان مذاب در قالب‌گیری تزریق پلاستیک (با پین و بدون پین) به روش مشاهده مستقیم پرداخت [12]. وی در پژوهش خود تاثیر موقعیت دریاچه بر جبهه جریان را بررسی نمود. با استفاده از آشکارسازی، پروفیل جبهه جریان مشاهده گردید که در آن بخش پر شده حفره قالب با بخش پر نشده آن با تفاوت رنگ کاملا متمایز بود. در سال 2014 پنگ چنگ و همکاران به بررسی شرایط جریان مذاب در حین فرآیند تزریقی با مواد فوق شفاف و با سامانه نورپردازی ویژه پرداختند [13]. قربانی و همکاران در سال 2016 در پژوهشی با روش محاسباتی و مدل سازی فرآیند تولید پالتروژن به محاسبه تخمینی میزان ضریب آغشتگی پرداختند [14]. برای بررسی درستی نتایج قربانی و همکاران دادو به بررسی روش های آشکارسازی و مشاهده همزمان در قالب پالتروژن ترموپلاستیک پرداخت که سرعت های حرکت مذاب و حباب را مشاهده کرد [15]. در بررسی مراجع موجود تنها بررسی و اندازه گیری و در شرایطی درجه حرارت در جریان مذاب و قالب پالتروژن گزارش شده است [16].

[17]

فرآیند پالتروژن به عنوان یکی از روش‌های تولید سریع و پیوسته، به طور گسترده در تولید پروفیل‌های کامپوزیتی با سطح مقطع ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند که در شکل 1 به طور شماتیک نشان داده شده است، طی سه دهه گذشته توسط پژوهشگران زیادی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت درک نحوه انجام فرآیند، مشاهده پدیده‌های فیزیکی رخ داده در حین تولید محصول، کمک بسیاری به ارتقا محصول نهایی از نظر کمی و کیفی (مانند بهبود خواص مکانیکی و ظاهری، سرعت تولید، کاهش مصرف انرژی، مواد و هزینه‌ها) خواهد نمود. در برخی تحقیقات پیشین، شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های تئوری برای این فرآیند انجام شده است، اما از روش‌های شهودی با استفاده از آشکارسازی جهت مشاهده مستقیم قالب پالتروژن و بررسی پدیده‌هایی که حین فرآیند اتفاق می‌افتد استفاده نشده است.

اولین مطالعات مربوط به آشکارسازی جریان، توسط رینولدز در سال 1883 انجام شد [2]. در این پژوهش پدیده عبور جریان از حالت آرام به مغشوش با کمک تزریق مقداری رنگ به داخل لوله افقی بلندی که جریان آب از درون آن عبور می‌کرد، مطالعه شد. نتیجه این پژوهش منجر به ثبت عدد رینولدز گردید. پرندهتل در سال 1904، با روش آشکارسازی جریان، پدیده لایه مرزی را کشف کرد [2]. بسیاری از یافته‌های مهم علمی در زمینه جریان‌های سیال، با به کار بردن برخی روش‌های ساده آشکارسازی به ثمر رسیده‌اند.

اشمیت در سال 1974، برای اولین بار به مطالعه تجربی جریان در فرآیند قالب‌گیری تزریقی پرداخت. وی از مواد رنگی در تزریق به مغز قطعه قالب‌گیری استفاده کرد تا جریان چشمه‌ای را در قطعه پس از خروج از قالب مورد بررسی قرار دهد [3]. اولین استفاده از آشکارسازی در حین فرآیند قالب‌گیری توسط یوکویی و همکارانش، در سال 1988 انجام شد [4]. در این پژوهش از یک بلوک شیشه‌ای به عنوان یک جداره قالب برای بررسی پدیده جهش در فشارهای تزریق بالا در لحظات اول ورود مذاب به قالب استفاده گردید. همچنین در این پژوهش با استفاده از آشکارسازی، به بررسی کیفی جبهه جریان از کناره یک قالب مستطیلی پرداخته شد که هدف از آن بررسی ناپایداری‌های جریان چشمه‌ای (از سطح کوچک کناره قالب) و شکل‌گیری برخی عیوب بود. بررسی نحوه شکل‌گیری اثر جریان و رگه‌های نقره‌ای از جمله نتایج این پژوهش بود. اولین بررسی دینامیکی جریان چشمه‌ای با استفاده از آشکارسازی توسط یوکویی در سال 2002 با ساخت مکانیزم تصویربرداری متحرک از جبهه جریان (از کناره یک قالب به ابعاد  $120 \times 50 \times 2$  میلی‌متر) انجام شد. در این پژوهش با استفاده از یک سنسور، موقعیت جبهه جریان چشمه‌ای از کناره شناسایی شد و با استفاده از یک دوربین سرعت بالا که روی یک ریل حرکت می‌کرد از جبهه جریان تصویربرداری گردید [5]. برای تصویربرداری سرعت حرکت دوربین برابر با سرعت جریان چشمه‌ای در نظر گرفته شد. در این مطالعه، بررسی جریان چشمه‌ای روی سطح کوچک مستطیلی ( $120 \times 2$  میلی‌متر) قالب انجام شد و می‌توان این پژوهش را جزء نخستین پژوهش‌ها در زمینه بررسی کمی پدیده‌های جبهه جریان دو بعدی دانست.

در سال 1998، دولینگ و برس، اولین مطالعات تجربی را بر روی جریان دوبعدی (سطحی) با استفاده از آشکارسازی انجام دادند [6]. این مطالعه روی سطح بزرگ یک قالب مستطیلی به ابعاد  $118 \times 73 \times 6.5$  میلی‌متر انجام شد که

در فرآیند تولید به روش پالتروژن تزریقی، جریانی از یک سیال غیرنیوتنی از داخل یک قالب با هندسه مشخص عبور می‌کند. وقوع همزمان پدیده‌های متنوع نظیر سرد شدن مذاب و انتقال به حالت جامد، کریستالیزه شدن‌های احتمالی، انتقال حرارت و تغییرات کرنشی و حرارتی در ویسکوزیته مذاب پلیمر موجب پیچیدگی مطالعه این فرآیند می‌شود. بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در تحقیقات گذشته در زمینه رفتار مذاب گرمانرم، اعوجاج پذیری در حین سرد شدن‌های اولیه و همچنین خواص مکانیکی غیریکنواخت قطعات قالب‌گیری تزریقی به خوبی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین مجموعه‌های نرم‌افزاری که در تحلیل رفتار مذاب و الیاف درون قالب مورد استفاده قرار می‌گیرند در پیش‌بینی مواردی رخ داده‌ها و پدیده‌های جریان، عیوب در محصولات تولیدی، بهبود فرآیندهای تولید، بررسی مواد اولیه مصرفی، بررسی شرایط مختلف فرآیند تولید و بررسی هندسه قالب مانند دارای نقایصی هستند.

## 2-1- آشکارسازی به روش مشاهده مستقیم

در آشکارسازی به روش مشاهده مستقیم از نور به عنوان یک ابزار انتقال اطلاعات و ثبت پدیده‌ها استفاده می‌شود. در شکل 3 سامانه آشکارسازی با این روش برای فرآیند پالتروژن به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این فرآیند، مذاب از طریق رابط استفاده شده وارد قالب می‌گردد. در قالب پالتروژن که شماتیک آن در شکل 4 نشان داده شده است، جریان مذاب از بین دیواره‌های قالب می‌گذرد و سرعت آن روی دیواره قالب به علت شرط عدم لغزش برابر با صفر است.

با توجه به اینکه بخشی که در آن مذاب پلیمر چسبیده به دیواره قالب است با بخشی که مذاب به آن نرسیده متفاوت است، با دیدن دیواره قالب می‌توان نفوذ و پیشروی جریان مذاب را آشکار کرد. این کار با استفاده از نور به عنوان ابزار انتقال اطلاعات بخش‌های ساکن و در حال حرکت انجام می‌شود. بنابراین آشکارسازی جریان با استفاده از بازتاب نوری که به سطح جریان مذاب تابانده شده است، انجام می‌شود. برای امکان‌پذیر کردن انتقال نور از جریان، دیواره قالب از جنس شیشه مقاوم در برابر حرارت و مقاوم به ضربه با سختی بالا ساخته شد. به این ترتیب امکان تاباندن نور به سطح مذاب و انعکاس آن برای آشکار ساختن پدیده‌ها فراهم گردید.

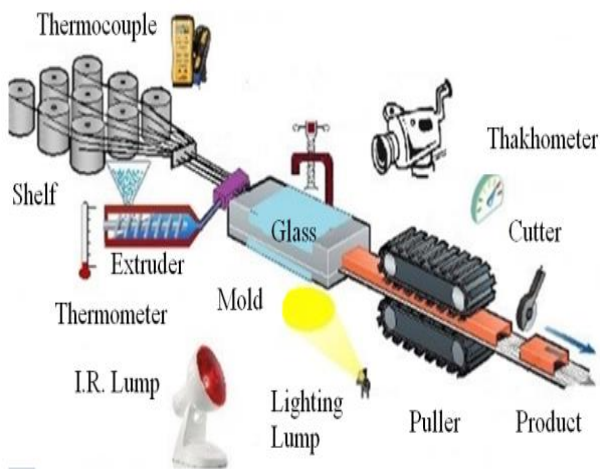


Fig. 3 General Schematic of Pultrusion Visualization System

شکل 3 نمای کلی شماتیک سامانه آشکارسازی پالتروژن

با توجه به اهمیت آشکارسازی، در پژوهش پیشرو آشکارسازی فرآیند پالتروژن برای اولین بار بوسیله مشاهده مستقیم درون قالب انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از روش عکس‌برداری به مطالعه سرعت و جبهه جریان مذاب و حرکت الیاف پرداخته شده و با بهره‌گیری از روش‌های نوین آشکارسازی، به مشاهده پدیده‌های رخ داده درون قالب، اقدام شده است. برای انجام این پژوهش قالب تخت پالتروژن طراحی و استفاده شده است و در طرفین قالب از شیشه مقاوم در برابر حرارت جهت امکان‌پذیر کردن مشاهده درون قالب استفاده گردیده است. برای تأمین حرارت مورد نیاز برای انجام فرآیند، از یک منبع حرارتی مادون قرمز استفاده شد. مزیت استفاده از این نوع منبع حرارتی، ایجاد فضای کافی جهت رصد فرآیند و همچنین تأمین یکنواخت و پیوسته حرارت در تمامی نواحی قالب است. برای مشاهده جریان و بررسی تغییرات و جابجایی الیاف و جریان مذاب، از مواد آشکارساز مانند گرانول و الیاف رنگی استفاده شد و از یک منبع نوری مناسب جهت مشاهده هرچه بهتر درون قالب و ثبت تصاویری باکیفیت استفاده گردید.

## 2-2- آشکارسازی فرآیند پالتروژن

آشکارسازی به درک بسیاری از رفتارهای مربوط به جریان و سرعت درون قالب کمک بسزایی می‌کند. در این بخش به معرفی این روش و کاربرد آن در فرآیند پالتروژن پرداخته شده است. همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است، مطالعه جریان هم به صورت نظری و هم به صورت تجربی امکان‌پذیر است. مطالعات نظری می‌تواند به دو روش تحلیلی و محاسبه‌ای انجام شود در حالی که مطالعات تجربی با دو روش اندازه‌گیری جریان و آشکارسازی جریان امکان‌پذیر است.

در این پژوهش منظور از آشکارسازی، آشکار ساختن جریان عبور مواد از درون قالب است. در حیطه بررسی تجربی جریان، روش آشکارسازی نسبت به روش اندازه‌گیری جریان سودمندتر است، چرا که پدیده فیزیکی در حال اتفاق را در کل حوزه جریان به نمایش درمی‌آورد. اما این روش به این علت که اطلاعات به دست آمده از آن به صورت کیفی است، به طور قابل ملاحظه‌ای مورد کم توجهی قرار گرفته است. در جدول 1 ویژگی‌های این دو روش با یکدیگر مقایسه شده است.

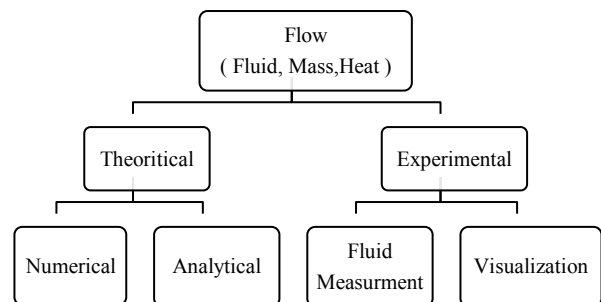


Fig. 2 Methods of flow Study [2]

شکل 2 روش‌های مطالعه جریان [2]

جدول 1 مقایسه روش‌های تجربی بررسی جریان [2]

Table. 1 Comparing of Experimental Method of Flow Study[2]

اندازه‌گیری جریان	آشکارسازی جریان	
موضعی	کل حوزه	گستره کاربرد
کمی	کیفی	خروجی اطلاعات

$$\frac{dl}{dt} = K \left( \frac{1}{m} \frac{\Delta p}{l} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

در رابطه (3) نشان دهنده طول قالب است. طبق این رابطه هرچه اختلاف فشار در دو طرف قالب و مقدار ضریب نفوذپذیری بیشتر باشد، زمان لازم برای عبور پلیمر از داخل لیاف و زمان آغشته‌سازی کاهش می‌یابد. واضح است چنانچه در روابط (1) و (2) و (3)  $n$  را برابر یک و  $m$  را برابر  $\eta$  قرار دهیم این روابط به روابط مربوط به جریان نیوتنی تبدیل می‌شوند.

#### 4- مواد و تجهیزات

##### 4-1- مواد اولیه مورد استفاده در فرآیند پالتروژن

در انتخاب مواد و تجهیزات مورد نیاز برای آشکارسازی، شرایط و سهولت انجام فرآیند و در دسترس بودن فضای مناسب و کافی برای تصویربرداری مد نظر بوده است. از جمله مهمترین شرایطی که برای انتخاب تجهیزات مورد توجه قرار گرفته است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- 1- امکان نفوذ مناسب نور به درون قالب
- 2- قابلیت تفکیک‌پذیری و تمایز بین لیاف و پلیمر مذاب شده
- 3- گرانروی مناسب مذاب درون قالب
- 4- نقطه‌ی ذوب مناسب با توجه محدودیت‌های دمایی حاکم به فرآیند
- 5- قطر مناسب لیاف جهت مشاهده آسان و امکان حرکت در قالب
- 6- امکان مشاهده حباب‌های احتمالی
- 7 امکان اضافه نمودن مواد پلیمری مذاب در حجم بالا در کوتاه‌ترین زمان

الیاف شیشه پیوسته رشته‌ای نوع E با تکس 2400 و با طول 50 تا 100 متر و همچنین پیش آغشته‌های گرمانرم تهیه شده در آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس با طول 15 متر استفاده گردید. مواد پیش آغشته‌های مورد استفاده در آزمایش تجربی از گرمانرم پلی اتیلن با چگالی بالا HDPE5620 و الیاف شیشه با تکس 2400 تهیه شدند. پیش آغشته‌ها در آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه تربیت مدرس و با درصد حجمی الیاف  $40 \pm 2$  تهیه شده‌اند.

##### 4-2- آشکارسازها

گرانول‌ها با رنگ‌های زرد، سبز و نارنجی جهت ایجاد کنتراست و مشاهده هر چه بهتر جریان مذاب درون قالب، در ابعاد  $1 \times 2 \times 1$  mm به صورت انبوه یا ذره‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. رنگی P.P (پلی پروپیلن) با تکس 100 و قطر 0.1 میلی‌متر جهت ایجاد تفاوت رنگی و تأمین مذاب لازم برای انجام فرآیند، مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به سرعت پایین انجام فرآیند و در نتیجه عدم نیاز به دوربین ثبت سرعت سریع، تصویربرداری با استفاده از دوربین‌های معمولی و حتی‌الامکان Full HD انجام شد. مشخصات فنی دوربین‌های مورد استفاده در جدول 2 بیان شده است.

در آزمایش‌ها اولیه از نور طبیعی که از محیط و نور لامپ‌های معمولی فلورسنت موجود در فضای اتاق آزمایش تأمین می‌شد، استفاده گردید. با توجه به اینکه کیفیت نوردهی اثر مستقیمی بر کیفیت نتایج حاصل داشت، در آزمایش‌هایی بعدی برای افزایش کیفیت تصاویر و مشاهده جزئیات، از لامپ هالوژن با قابلیت تنظیم شدت نوردهی استفاده گردید. به دلیل محدودیت فضا و به خاطر جلوگیری از برخورد نور مستقیم با دوربین، لامپ‌های هالوژن در پایین قالب قرار داده شد.

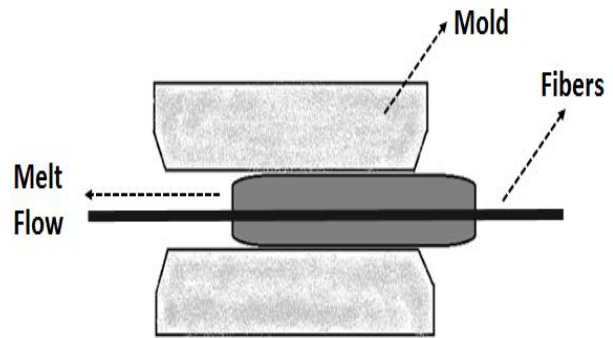


Fig. 4 Schematic View Of Pultrusion Mold [2]

شکل 4 شماتیکی از قالب پالتروژن [2]

باید توجه کرد که ایده شیشه‌ای ساختن دیواره قالب و استفاده از انعکاس نور برای مشاهده جریان، منحصر به انجام مطالعات تحقیقاتی است و نمی‌توان از آن در مقیاس‌های صنعتی استفاده نمود. ولی با این وجود، گستره کاربردهای تحقیقاتی این روش و امکان استفاده از آن در امور پژوهشی و آموزشی، آن را حائز اهمیت می‌کند. بدیهی است با این روش نمی‌توان عملکرد ریز ساختاری فرآیندها و پدیده‌های رخ داده را مورد بررسی قرار داد.

#### 3- تئوری حاکم

همان طور که قبلاً بیان شد در فرآیند پالتروژن که به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است، لیاف شیشه با مذاب پلیمر در داخل قالب آغشته می‌شوند. برای آغشته‌سازی مطلوب، درک ساز و کار نفوذ مذاب در داخل لیاف که محیطی متخلخل است، ضروری است. در این بخش روابط تئوری مربوط به جریان سیال در محیط متخلخل لیاف بیان خواهد شد. با استفاده از این روابط می‌توان با استفاده از مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده، به‌طور غیرمستقیم به محاسبه برخی ویژگی‌های محیط متخلخل پرداخت. در انتهای این پژوهش با استفاده از این روابط، به محاسبه مقدار نفوذپذیری پرداخته شده است. لازم به ذکر است مقدار گرانروی مذاب پلیمر برای انجام این محاسبات باید مشخص شود. در این پژوهش از مقادیر گزارش شده در پژوهش‌های گذشته [14] برای مقدار گرانروی استفاده شده است. جریان در داخل محیط متخلخل لیاف با استفاده از قانون داریسی تعریف می‌شود که این قانون برای سیالات غیر نیوتونی با رابطه (1) بیان می‌شود [13].

$$V_s = K \left( -\frac{1}{m} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

در این رابطه  $K$  و  $\frac{\partial p}{\partial x}$  به ترتیب نشان دهنده نفوذپذیری و گرادیان فشار و ضرایب  $m$  و  $n$  ثوابت مربوط به ویسکوزیته مذاب پلیمر هستند. در سیالات نیوتونی ویسکوزیته ثابت است ولی برای سیالات غیرنیوتونی مانند مذاب پلیمرها ویسکوزیته به نرخ برشی وابسته است. مدل‌های بسیاری برای تعیین ویسکوزیته ارائه شده‌اند که از رایج‌ترین آن‌ها می‌توان به قانون توان<sup>1</sup> اشاره نمود که توسط رابطه (2) بیان می‌شود.

$$\eta = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

که در این رابطه  $m$  و  $n$  به ترتیب ثابت توان و حساسیت است. در رابطه (1) با جایگزینی  $V_s = dl/dt$  و  $\Delta p$  (اختلاف بین فشار ورودی و خروجی قالب) به رابطه (3) تبدیل می‌شود.

<sup>1</sup>Power law

جدول 2 مشخصات فنی دوربین‌های مورد استفاده

Table 2 Specification of Used Camera

مشخصات دوربین	دوربین 1	دوربین 2
برند / مدل	سونی DCS-WX7	اپل 6SERIES
نوع سامانه	Full HD	Full HD
رزولوشن	16.2 M.Pix	M.Pix8
سامانه لرزگیر	لرزش‌گیر اپتیکال - SteadyShot	دستی
زوم	Optical-5X & Dig	Dig.
تعداد فریم	1080p@24FPS	1080p@60FPS
فاصله کانونی	125-25 میلی‌متر	

شکل 5 قالب نهایی مورد استفاده جهت آشکارسازی فرآیند پالتروژن را نشان می‌دهد. در این آزمایش از قالبی متقارن و از جنس فولاد زنگ نزن با ابعادی به طول 17 سانتی‌متر و عرض 5 سانتی‌متر و ضخامت‌های 1 الی 5 سانتی‌متر استفاده شده است که ضخامت‌ها با توجه به شرایط تولید و مواد اولیه، تغییر می‌کند. شکل 6 نمای قالب و ابعاد آن را نمایش می‌دهد.

کشنده مورد استفاده برای آزمایش‌های تجربی، یک الکتروموتور 1500 وات با گیربکس کاهنده و با قابلیت کنترل سرعت کشش به کمک اینورتر فرکانس است و سرعت کشش روی نمایشگر کنترل کننده آن قابل مشاهده و تنظیم است.

از سامانه تزریق مذاب جهت تأمین مذاب مورد نیاز در برخی آزمایش‌ها استفاده گردید. در این سامانه دمای تزریق مذاب قابل تنظیم و اندازه‌گیری است. این سامانه از طریق فیلترهای گرم کن که به دور ماردون پیچیده شده است فرآیند ذوب گرانول‌ها را انجام داده و مذاب حاصل از طریق رابط تعبیه شده در خروجی اکسترودر، به درون قالب آشکارساز پالتروژن هدایت می‌شود. میزان مذاب خارج شده حدود 30 گرم در هر دقیقه است که با فشاری معادل فشار محیط به درون قالب انتقال می‌یابد. میزان مذاب خارج شده حدود 30 گرم در هر دقیقه است که با فشاری معادل فشار محیط به درون قالب انتقال می‌یابد. شکل 7 شماتیک دستگاه انتقال مذاب قالب آشکارساز را به همراه اجزا آن نمایش می‌دهد.



Fig. 5 View of Mold of Pultrusion

شکل 5 نمای از قالب آشکارساز پالتروژن قالب

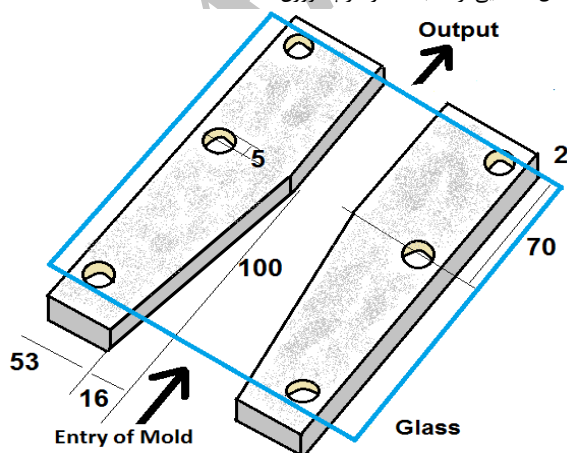


Fig. 6 3D View of visualization pultrusion Mold (As Per mm)

شکل 6 نمای سه بعدی قالب آشکارساز پالتروژن (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

هرچند استفاده از طلق‌های رنگی در کیفیت تصاویر ثبت شده تفاوتی ایجاد نمی‌کند، اما وجود نورهای مزاحم قرمز در تصاویر که از لامپ‌های مادون قرمز ناشی شده بود، استفاده از فیلتر برای تهیه تصاویر را ضروری می‌نمود. فیلتر کردن در دو مرحله و به شرح زیر انجام گردید:

الف: فیلتر کردن با استفاده از امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری موجود در دوربین با کنترل شدت نور.

ب: فیلتر کردن نرم‌افزاری نهایی که پس از ضبط تصاویر، توسط رایانه و نرم‌افزار انجام گردید و هدف آن افزایش حداکثری میزان تفکیک‌پذیری و سهولت مشاهده فرآیند بود.

توجه به هدف اصلی آزمایش که بررسی و آشکارسازی فرآیند پالتروژن است، در تجهیزات عمومی فرآیند پالتروژن تغییراتی ایجاد گردید که مهمترین آن‌ها به شرح زیر است:

در این آزمایش از سامانه گرمایش غیر تماسی استفاده شد تا محدودیت فضایی به حداقل برسد و امکان تصویربرداری فراهم گردد. این روش حرارت‌دهی تفاوتی در ماهیت فرآیند ایجاد نمی‌کند و هدف از آن تأمین انرژی حرارتی کافی جهت ذوب نمودن پلیمر است. برای تأمین حرارت، از 8 عدد لامپ قرمز با توان 250 وات استفاده گردیده است. با توجه به تمرکز آزمایش بر آشکارسازی فرآیند جهت مشاهده اتفاقات درون قالب، بجای استفاده از دیواره‌های فلزی در قالب پالتروژن، از دیواره‌های شیشه‌ای مستحکم استفاده گردید. با توجه به فرض صفر بودن سرعت سیال در دیواره قالب، جنس شیشه دیواره قالب تأثیری بر روند آزمایش نخواهد داشت. استفاده از شیشه از مهم‌ترین تفاوت‌های قالب‌های معمول پالتروژن با قالب مورد استفاده برای فرآیند آشکارسازی است. این شیشه که جزئی از بدنه قالب است، از لحاظ نوع، ابعاد، ضخامت، جنس و رنگ می‌تواند بسیار متفاوت باشد. مشخصات اصلی که در انتخاب نهایی شیشه مد نظر قرار گرفت مانند:

- استحکام کافی (تحمل در برابر تنش‌های ناشی از فرآیند پالتروژن مانند فشار گیره‌های نگه‌دارنده قالب و غیره).
- تحمل حرارتی بالا (تا محدوده دمایی ذوب پلیمر).
- تحمل ضربه (ناشی از تنش احتمالی مانند کشش کشنده).
- انبساط حرارتی متناسب با انبساط حرارتی ورق‌های فلزی طرفین قالب.
- ضخامت مناسب و عدم شکست نور جهت امکان‌پذیر کردن مشاهده مناسب.
- شفافیت کامل (عدم امکان استفاده از طلق‌های محافظ کدر).
- قیمت پایین و دسترسی آسان.
- چسبندگی پایین سطح جهت سهولت تمیزکاری برای استفاده‌های مجدد بعدی.

سنسور اندازه‌گیری فشار: محل قرارگیری سنسور در بخش زیرین قالب خارج از محل تشعشع مستقیم حرارتی در نظر گرفته شد. سامانه اندازه‌گیری سرعت کشنده: با توجه به اهمیت اندازه‌گیری سرعت در فرآیند، کنترل لحظه‌ای سرعت کشنده و اعمال سرعتی یکسان بدون تغییر ضروری است. لذا کشنده به یک سامانه کنترل دور موتور متصل گردید که از طریق تنظیمات موجود در آن بتوان به کنترل سرعت پرداخت.

### 5- آزمون‌های تجربی

برای آشکارسازی فرآیند پالترژن، قالب و تجهیزات آشکارساز در کنار یکدیگر قرار گرفتند و بهینه‌سازی موقعیت آن‌ها نسبت به هم، با در نظر گرفتن موارد زیر انجام شد.

- 1- نزدیکی کافی لامپ‌های حرارتی به قالب جهت تامین حرارت مورد نیاز
- 2- قرارگیری قالب در راستای محور کشنده الیاف.
- 3- امکان تصویربرداری مناسب و آسیب ندیدن دوربین.
- 4- امکان قرار دادن لامپ‌های تامین کننده نور در پایین قالب.
- 5- محل قرارگیری مناسب سنسور دمایی در قالب.

با توجه به پیچ و مهره‌ای بودن سازه که امکان تغییر موقعیت اجزا نسبت به هم را فراهم می‌کرد، موقعیتی که در آن بهترین بازدهی حرارتی و بیش‌ترین یکنواختی دمایی توسط سنسورهای حرارتی ثبت گردید به عنوان موقعیت نهایی قالب نسبت به هیتر انتخاب گردید.

### 5-1- آزمایش‌های اولیه

در مرحله اول جهت ثبت تصاویر با کیفیت بالا از الیاف پیش آغشته سبز رنگ (جهت دریافت کنتراست مناسب) با تکس 2400 و مذاب گرمانرم پلی‌پروپیلن استفاده شد. شکل 9 که نحوه قرارگیری الیاف رنگی در حین انجام فرآیند را نشان می‌دهد، عدم هم‌راستایی الیاف را در قسمت علامت زده شده (ورودی قالب) می‌توان مشاهده نمود. با توجه به اینکه این پدیده در نزدیکی دیواره قالب رخ می‌دهد می‌توان دلیل آن را در صفر بودن سرعت جریان مذاب و بالا بودن چسبندگی الیاف به دیواره قالب دانست. شکل 9 نشان می‌دهد که رفته رفته الیاف هم راستایی خود را با طی ادامه مسیر قالب بدست می‌آورند. در ادامه گرانول‌های رنگی به صورت یکسان و عمود بر رشته‌های پیش آغشته قرار داده شد (شکل 10) و با عبور دادن این الیاف از قالب پالترژن و با ذوب گرانول‌ها پروفیل سرعت جریان مذاب درون قالب مشاهده گردید که نتایج آن در شکل 11 نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، سرعت مذاب در دیواره قالب بسیار پایین و نزدیک به صفر و در وسط قالب و با پیشروی مذاب رنگی، حداکثر است. توزیع رنگدانه‌های زرد، منحنی سهمی گونه‌ای را برای پروفیل سرعت حرکت مذاب در شرایط سرعت ثابت و خطی کشش الیاف نشان می‌دهد.

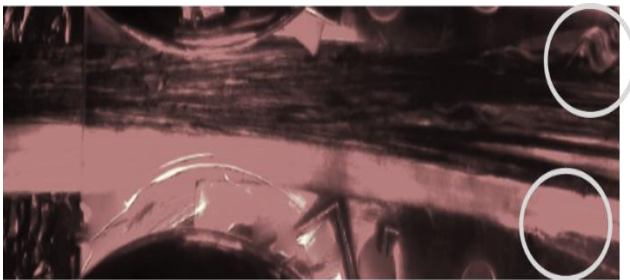


Fig. 9 Fiber Orientation in Mold and Their Separation

شکل 9 جهت‌گیری الیاف درون قالب و جدایش آن‌ها

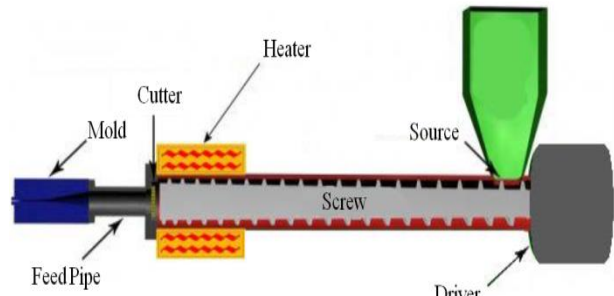


Fig. 7 Schematic View of Parts of Extruder

شکل 7 نمای شماتیک از اجزای دستگاه اکسترودر

هدف از ساخت سامانه عبور مذاب و الیاف به عنوان پین آغشته‌سازی است و در شکل 8 نیز به طور شماتیک نشان داده شده است، انتقال و هدایت مذاب با جهت یکسان و به صورت یکنواخت به ابتدای قالب پالترژن است.

این تجهیز ظریف به انتهای اکسترودر متصل شده و در انتهای آن یک کانال نازک با ورق‌هایی ظریف به ضخامت 0.3 میلی‌متر تعبیه شده است. در طرف دیگر این پین، 9 عدد سوراخ با قطر 2 میلی‌متر و با فاصله 2.5 میلی‌متر از یکدیگر تعبیه شده است که امکان عبور 9 رشته الیاف از درون آن فراهم می‌شود. جهت جلوگیری از آسیب‌دیدگی الیاف و حفظ انسجام آن‌ها، سوراخ‌های ورودی لبه‌دار گردید. طراحی جهت جلوگیری از انبساط غیر یکنواخت قطعات، جنس این قطعه متناسب با سایر اجزا انتخاب شد و با توجه به ظرافت تجهیز از جوش آرگون جهت اتصال قطعات استفاده گردید.

برای اطمینان از دقت نتایج، تجهیزات به دقت کالیبره شده و از وسایل اندازه‌گیری موازی استفاده گردید. همچنین محل قرارگیری سنسورها و کلیه سامانه‌های ثبت‌کننده، در چند مرحله بررسی و کالیبره شد. از جمله تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

دستگاه اندازه‌گیری و تنظیم دما: جهت ثبت دمای درون قالب از یک ترموکوپل آتونیکس<sup>1</sup> مدل TC4Y که محدوده اندازه‌گیری دمایی تا 800 سانتی‌گراد را با دقت 1 درجه سانتی‌گراد دارا است، استفاده گردید. این ترموکوپل دارای یک سامانه جهت اندازه‌گیری دما به صورت تماسی در منطقه مورد نظر است و با توجه به هم مدار شدن آن با منبع تامین حرارت، حصول دمای یکنواخت امکان‌پذیر است. جهت کنترل دمای مذاب ورودی به درون قالب پالترژن، از یک سنسور در محل اکسترودر و پس از هیترها استفاده گردید تا دمای مذاب ورودی کنترل گردد. جزئیات بیشتر در مرجع 15 آمده است.

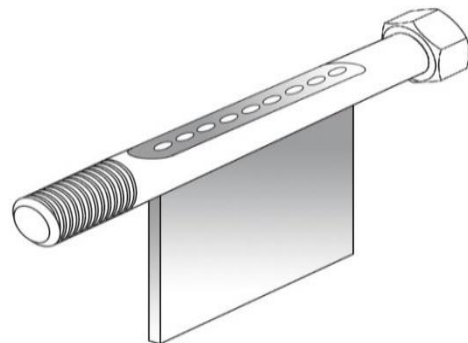


Fig. 8 Schematic View of Melt & Fibers transferring System

شکل 8 نمای شماتیک دستگاه انتقال مذاب و الیاف به طور همزمان

<sup>1</sup> Autonics



Fig. 13 Velocity Profile Due to Pulling

شکل 13 پروفیل سرعت ناشی از کشش الیاف



Fig. 14 Velocity Profile Due to Pressure Gradient

شکل 14 پروفیل سرعت ناشی از گرادیان فشار

با مقایسه پروفیل سرعت تجربی (شکل 11) با پروفیل‌های سرعت نشان داده شده در شکل‌های 13 و 14 می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که علاوه بر کشش الیاف، گرادیان فشار نیز عامل حرکت مذاب در قالب است و از آنجا که پروفیل سرعت تجربی به شکل 14 شباهت بیشتری دارد می‌توان به وجود گرادیان فشار بالا درون قالب پی‌برد.

### 5-2- آشکارسازی با اکسترودر و سامانه هدایت مذاب با قالب بهینه

با توجه به نیاز به حضور مذاب در قالب و برای اطمینان از پر شدن قالب، از سامانه عبور مذاب و الیاف (بین آغشته‌سازی) استفاده گردید. در این سامانه که به‌طور شماتیک در شکل 8 نشان داده شد، یک ورودی اصلی جهت هدایت مذاب به قالب پالتروژن تعبیه گردید. در راستای استوانه‌ای شکل این سامانه، سوراخ‌هایی با قطر 2 میلی‌متر در نظر گرفته شد تا الیاف از آن عبور نمایند و درون قالب اصلی بلافاصله پس از ورود آغشته‌گی لازم رخ دهد. تعداد سوراخ‌های ایجاد شده جهت عبور الیاف 9 عدد و فاصله بین هر یک از ورودی‌های الیاف نیز یکسان (2.5 میلی‌متر) در نظر گرفته شد. همچنین یک راهگاه به عرض 2.5 سانتی‌متر و طول 3 سانتی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر برای انتقال همزمان مذاب تولیدی و الیاف به درون قالب اصلی در نظر گرفته شد. برای انجام فرآیند از پلی‌پروپیلن گرید Z30S به دلیل داشتن شفافیت لازم و دمای ذوب پایین استفاده گردید. سایر شرایط آزمایش در جدول 3 خلاصه شده است.

همانطور که در شکل 15 نشان داده شده است، با استفاده از سامانه عبور مذاب و الیاف، حضور جریان مذاب به طور کامل در قالب در کنار الیاف حاصل گردید. در ادامه از گرانول‌های رنگی جهت مشاهده بهتر جریان مذاب استفاده شد و سرعت مذاب با حضور الیاف رصد گردید. همچنین تشکیل برخی حباب‌ها در حین فرآیند به طور واضح مشخص و مشاهده شدند. علاوه بر آن یک ذره رنگی وارد قالب شده و مسیر حرکت آن مشاهده و ثبت گردید.

جدول 3 شرایط انجام آزمایش با سامانه اکسترودر

Table 3 Conditions of Test With Extruder System

مقدار/مشخصات	واحد	شرح
7-8	عدد	تعداد لامپ‌های فعال
قرینه در بالا و پایین قالب /	درجه	نحوه قرارگیری
90-100		لامپ‌ها / زاویه
220	سانتی‌گراد	دمای فرآیند
5.7-6	متر بر دقیقه	سرعت کشش الیاف
7	دقیقه	زمان انجام فرآیند

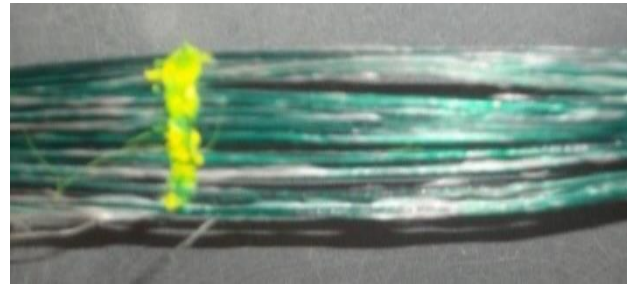


Fig. 10 Positioning Of Colored Granule in Preimpregnated Fibers

شکل 10 وضعیت قرار دهی گرانول‌های رنگی در بین الیاف پیش آغشته



Fig. 11 Status of Colored Particle in Preimpregnated Fiber After Exiting from Mold

شکل 11 وضعیت گرانول رنگی در الیاف پیش آغشته پس از خروج از قالب

حرکت مذاب درون قالب پالتروژن به دو علت ایجاد می‌شود.

1. کشش الیاف

2. گرادیان فشار در طول قالب (راستای کشش الیاف)

هر یک از این دو عامل به تنهایی پروفیل سرعتی ایجاد می‌کند و پروفیل سرعت نهایی از جمع پروفیل سرعت ناشی از هر یک از این دو عامل به دست می‌آید.

در شکل 12 به طور شماتیک سطح مقطع قالب و موقعیت الیاف نشان داده شده است. پروفیل سرعت تجربی نشان داده شده در شکل 11، پروفیل سرعت مذاب موجود در ناحیه بین الیاف و دیواره قالب است که در شکل 12 با رنگ تیره نشان داده شده است. از لحاظ تئوری، پروفیل سرعت در این ناحیه، بسته به اینکه تاثیر هر یک از دو عامل ذکر شده در فوق (کشش الیاف و گرادیان فشار) چقدر باشد، می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد. البته این پروفیل سرعت در هر صورت سهمی شکل است و میزان تاثیر هر یک از دو عامل فوق بر نوع این سهمی اثرگذار است. به این معنی که هرچه تاثیر کشش الیاف بیشتر باشد شکل پروفیل سرعت تخت تر (مشابه با شکل 13) و هرچه تاثیر گرادیان فشار بیشتر باشد شکل پروفیل سرعت تیز تر (مشابه با شکل 14) خواهد بود.

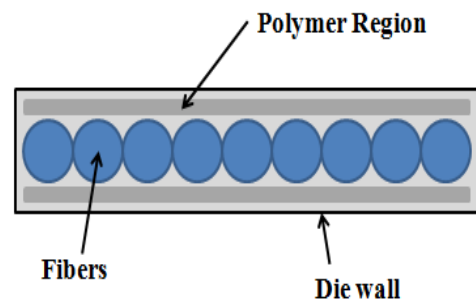


Fig. 12 Cross Section of Pultrusion Die

شکل 12 مقطع عرضی قالب پالتروژن



Fig. 16 Progress of Melt Flow in 3 Zone of Mold (in different colors)  
 شکل 16 پیشروی جریان در سه ناحیه قالب (به رنگ سبز، زرد و سبز روشن)

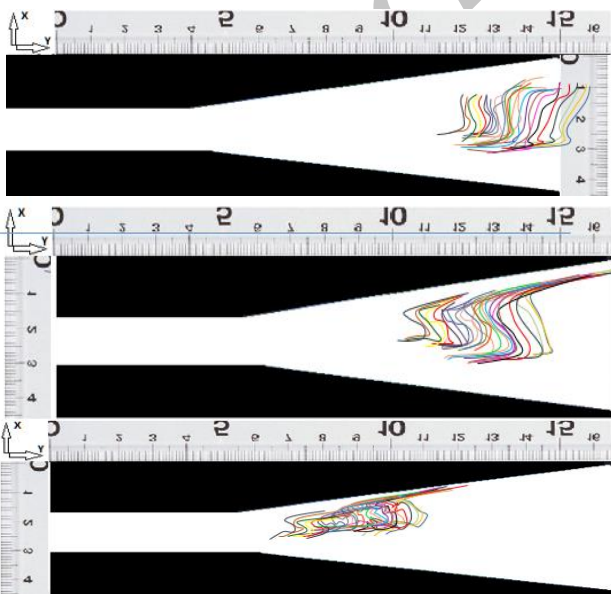


Fig. 17 Front Flow Progress in 3 Zone of Mold (in different colors)  
 شکل 17 پیشرفت جبهه جریان مذاب در سه ناحیه مختلف قالب



Fig. 15 View of Melt & Fiber in visualization Pultrusion Mold  
 شکل 15 حضور مذاب و الیاف درون قالب آشکارساز پالتروژن

### 6- مشاهده و بررسی نتایج

#### 1-6 آشکارسازی جبهه جریان

برای بررسی کمی تصاویر به دست آمده، جبهه جریان با علامت‌گذاری یک سری نقاط آشکارسازی شد و از کنار هم قرار دادن این تصاویر، کانتور پیشروی جبهه جریان در قالب به دست آمد. این کار با سه رنگ متفاوت (سبز، زرد و سبز روشن) و در سه ناحیه مختلف قالب انجام شد. شکل کانتور جریان مذاب به دست آمده درون قالب (بدون استفاده از بین آغشته‌سازی) در شکل 16 نشان داده شده است.

به منظور اندازه‌گیری فواصل، از مش‌بندی مربعی به ابعاد  $0.5 \times 0.5$  سانتی‌متر استفاده شد. با این روش سطح در حال پیشروی جبهه جریان و تغییرات آن در فاصله زمانی ثابت بین دو تصویر اندازه‌گیری شد. همچنین با این روش امکان اندازه‌گیری نرخ ورودی جریان با اندازه‌گیری طول جبهه جریان در فاصله بین تصاویر میسر گردید. اهمیت اندازه‌گیری نرخ ورودی جریان در این است که پایداری آن، عامل مهمی در تعیین کیفیت قطعه تولید شده است. بنابراین دستیابی به نرخ جریان ثابت به عنوان یک هدف در کنترل شرایط فرآیند محسوب می‌گردد. در اکثر موارد با استفاده از سرعت حرکت ماردون اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه با روش اندازه‌گیری با سرعت حرکت ماردون، تأثیر پدیده‌هایی همچون فشرده شدن مذاب در اثر فشار تزریق و اصطکاک بین سطح قالب و مذاب پلیمر حین جریان در نظر گرفته نمی‌شود، استفاده از آشکارسازی جبهه جریان به نتایج دقیق‌تری از نرخ جریان ورودی منجر می‌شود.

در شکل 17 نحوه پیشروی جریان مذاب در سه ناحیه مختلف قالب (ابتدای ورود به قالب، میانه قالب، خروجی قالب) نشان داده شده است. همانطور که در شکل 17 دیده می‌شود، جبهه جریان درست پس از ورود مذاب به قالب، دچار ناپایداری‌هایی می‌شود ولی پس از برخورد مذاب ورودی با دیواره قالب و با توسعه جریان از شدت این ناپایداری کاسته شده تا اینکه نهایتاً در بخش انتهایی قالب، این ناپایداری‌ها تقریباً از بین می‌رود. با توجه به شکل 17، در ورودی قالب سطح جبهه جریان تا رسیدن به یک اوج افزایش می‌یابد و سپس با مقداری کاهش، تقریباً ثابت می‌شود (شکل الف). همچنین مذاب، پس از ورود به قالب، به صورت شعاعی از کناره قالب به مرکز قالب توسعه می‌یابد و به این ترتیب سطح جبهه جریان افزایش یافته تا اینکه به دیواره‌های کناری قالب برخورد کند. پس از آن جبهه جریان با کاهش ناگهانی سطح مواجه می‌شود (شکل ب)) و با تغییرات اندکی تا انتهای پر شدن قالب (شکل ج))، تقریباً پایدار می‌ماند.



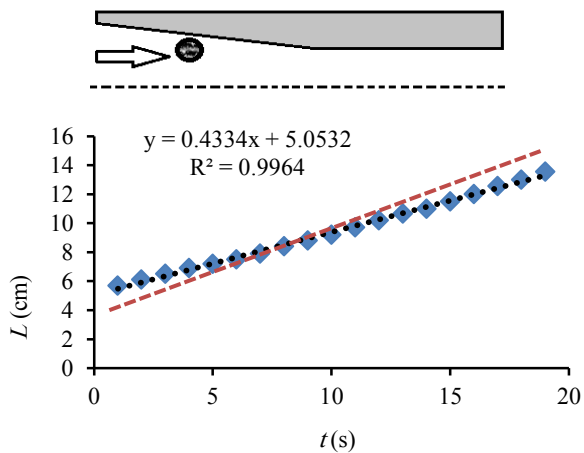


Fig. 20 Average Velocity of Particle in X Direction of Flow  
 شکل 20 سرعت متوسط ذره در راستای طولی جریان

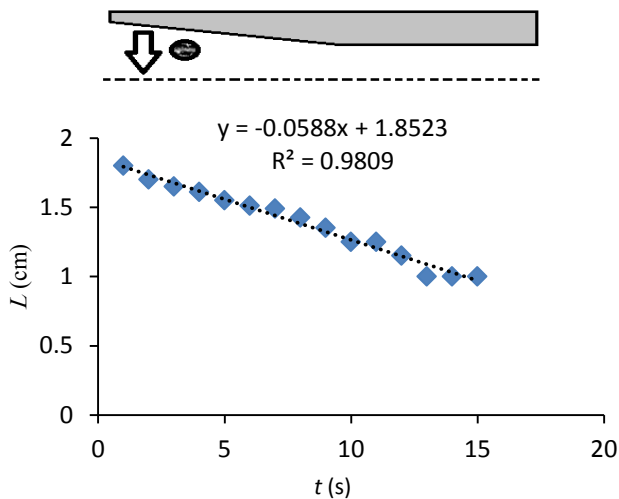


Fig. 21 Average Velocity of Particle in Y Direction of Flow  
 شکل 21 سرعت متوسط ذره در راستای عرضی جریان

شکل 20 همچنین سرعت طولی ذره را نسبت به سرعت کشنده نشان می‌دهد (خط قرمز در شکل 20 نمایش دهنده سرعت ثابت کشنده است). از این شکل می‌توان چنین برداشت کرد که در ابتدای مسیر حرکت، سرعت ذره در جهت طولی (0.43 سانتی‌متر بر ثانیه) نسبت به سرعت کشنده در حدود 0.15 سانتی‌متر بر ثانیه (حدود 20 درصد) کمتر است که این سرعت، رفته رفته با نزدیک شدن ذره به مرکز قالب و در نزدیکی الیاف در حال رسیدن به سرعت کشنده است. سرعت عرضی ذره هم با رسیدن به بخش موازی قالب به صفر نزدیک شده است.

در بخش مخروطی قالب سرعت عرضی ذره حدود یک دهم سرعت طولی آن است. هرچه نرخ کاهش سطح مقطع قالب در بخش همگرای قالب کمتر باشد، سرعت عرضی نسبت به سرعت طولی مقادیر کمتری خواهد داشت. در بخش موازی قالب که سطح مقطع هیچ تغییری ندارد، سرعت عرضی ذره برابر با صفر و سرعت طولی آن برابر با سرعت کشش الیاف اندازه‌گیری گردید. دو تصویر انتهایی نشان داده شده در شکل 18، حرکت طولی ذره (حرکت طولی در راستای کشش الیاف و بدون سرعت عرضی) را در قسمت موازی قالب به روشنی نشان می‌دهد.

2-6- آشکارسازی موقعیت و سرعت یک ذره در جریان مذاب

سرعت‌سنجی یک ذره در جبهه جریان، با استفاده از آشکارسازی حرکت یک گرانول در جبهه جریان انجام گرفت. در این آزمایش از قالب پالترژن با پین آغشته‌سازی استفاده شد. تصاویر ثبت شده از حرکت گرانول رنگی توسط نرم‌افزار مناسب مش‌بندی و موقعیت مرکز گرانول در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. در این بخش همچنین از مش‌بندی نور لیزر به صورت فیزیکی نیز استفاده گردید. بررسی حرکت گرانول در جبهه جریان حین حرکت درون قالب، نشان داد که گرانول گردشی نسبت به مذاب چسبیده شده به آن ندارد. با اندازه‌گیری موقعیت ذره در دو بعد طولی و عرضی که در شکل 18 نشان داده شده است، مسیر حرکت آن استخراج شد که نتیجه آن در شکل 19 نشان داده شده است. با استفاده از شکل 19 و موقعیت استخراجی بر حسب زمان، سرعت متوسط ذره در راستای طولی مقدار 0.43 سانتی‌متر بر ثانیه (شکل 20) و سرعت متوسط ذره در راستای عرضی 0.05 سانتی‌متر بر ثانیه (شکل 21) اندازه‌گیری شد.

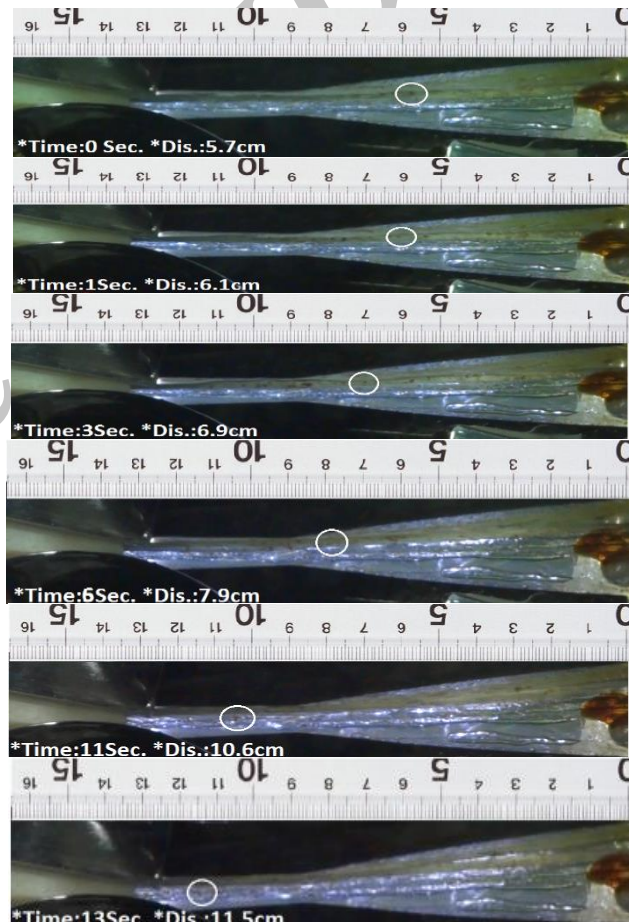


Fig. 18 Position of Particle in Melt Flow  
 شکل 18 موقعیت ذره در جریان مذاب



Fig. 19 2D Position of Particle in X & Y Direction of Melt Flow  
 شکل 19 موقعیت دو بعدی ذره در دو راستای افقی و عمودی در جریان مذاب

### 3-6- آشکارسازی حباب در جریان

در این قسمت بررسی نحوه شکل‌گیری و حرکت حباب در حین فرآیند بررسی شد. همانطور که شکل 22 مشاهده می‌شود، بیشترین شکل‌گیری حباب در قسمت ورود به مقطع یکنواخت قالب روی می‌دهد. با در نظر گرفتن شرایط یک حباب از ابتدای شکل‌گیری درون قالب تا خروج از آن و با استفاده از نرم افزار مناسب، نحوه تغییر مساحت حباب استخراج گردید که نتایج آن در شکل 23 نمایش داده شده است.

درصد کاهش حجم حباب در حدود 17 درصد نسبت به حجم اولیه آن اندازه‌گیری شد. دلیل کاهش حجم حباب را می‌توان در افزایش فشار ناشی از کاهش سطح مقطع قالب دانست. در بخش میانی قالب همانطور که در شکل 20 مشاهده می‌شود به دلیل روشن شدن لامپها و افزایش دمای قالب، حباب دچار انبساط و افزایش حجم می‌گردد. اگرچه زمان حرکت ذره از ابتدا تا انتهای قالب با توجه به سرعت کُشنده و حرکت مذاب حدود 25 ثانیه است، حباب پس از رسیدن به انتهای قسمت همگرای قالب متوقف می‌گردد ولی از بین نمی‌رود. لذا در محور افقی شکل 23 زمان‌های بالاتر از 25 ثانیه گزارش شده است. این بدین معناست که چنین حباب‌هایی اصولاً وارد منطقه انتهای قالب که دارای طرفین موازی است نمی‌شوند ولی در صورت ورود به این قسمت با خروج هوا از انتهای قالب، حباب از بین می‌رود.

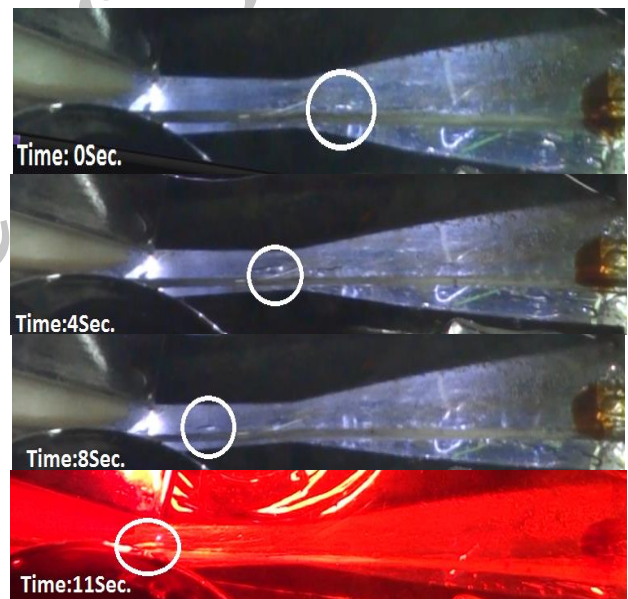


Fig. 22 Void Formation in Parallel Section of Mold

شکل 22 شکل‌گیری حباب در قسمت ورودی مقطع یکنواخت

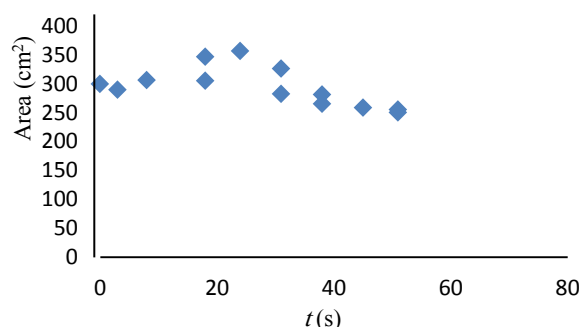


Fig. 23 Change of Void Area in The Mold

شکل 23 نمودار تغییرات سطح حباب رصد شده در قالب

### 4-6- محاسبه ضریب آغشتگی الیاف

ضریب آغشتگی K یکی از عوامل تعیین کننده در مقدار آغشتگی الیاف توسط مذاب است که مستقیماً بر کیفیت محصول تولید شده اثر می‌گذارد. با استفاده از رابطه داری که در بخش سوم معرفی گردید، می‌توان در صورت مشخص بودن ضرایب m و n (ثوابت مربوط به ویسکوزیته مذاب پلیمر) و مقادیر گرادیان فشار و سرعت در یک جهت، به محاسبه ضریب آغشتگی در آن جهت پرداخت. در آزمایش‌های تجربی انجام شده در این پژوهش مقدار فشار درون قالب حدود 7 بار اندازه‌گیری شد. لذا با توجه به مشخص بودن فشار در انتهای قالب (که برابر با فشار اتمسفر است) و با استفاده از طول قالب، مقدار گرادیان فشار در راستای طولی قالب قابل اندازه‌گیری است. با توجه به اینکه مقدار سرعت مذاب در جهت طولی نیز اندازه‌گیری شد، و با استفاده از مقادیر گزارش شده در مراجع برای ضرایب m و n برای مذاب پلی‌پروپیلن، مقدار ضریب آغشتگی در جهت طولی قالب قابل اندازه‌گیری است.

سرعت طولی ذره در مذاب که برابر با 0.43 سانتیمتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد، و با در نظر گرفتن طول 17 سانتی‌متر برای قالب و فشار 7 بار و با جایگذاری در معادله داری، مقدار ضریب آغشتگی طولی  $10^{-8} \times 5$  متر مربع به دست می‌آید. باید توجه کرد که میزان آغشتگی محاسبه شده مقدراری تقریبی است. محاسبه دقیق مقدار آغشتگی نیازمند تحقیق و مطالعه‌ای جامع جهت بدست آوردن میزان دقیق گرادیان فشار و ضرایب m و n مربوط به مذاب است. در مورد فشار اندازه‌گیری شده درون قالب ذکر این نکته حائز اهمیت است که بدون افزایش فشار آغشته شدن الیاف به‌طور کامل امکان پذیر نیست. لذا اهمیت رسیدن به فشارهای بالا جهت حصول حداکثر میزان آغشتگی بدیهی است. هرچند بخشی از افزایش فشار می‌تواند توسط اکسترودر تامین شود، ولی بخش عمده آن ناشی از هندسه همگرای قالب و کاهش سطح مقطع در جهت طولی قالب است.

### 7- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش با بهره‌گیری از یک قالب مخصوص (با دیواره شیشه‌ای) و سامانه گرمایشی غیرتماسی و با استفاده از یک سامانه آشکارساز، به بررسی فرآیند پالترژن و مشاهده رفتار جریان مذاب به روش مشاهده مستقیم پرداخته شد. با مشاهده جریان مذاب درون قالب و بررسی جبهه جریان مذاب، مرز جریان در سه ناحیه ابتدا، میانه و انتهای قالب ترسیم شد و نحوه حرکت آن در ناحیه همگرا و موازی قالب مشاهده شد. با ردگیری حرکت یک ذره درون مذاب، موقعیت آن در جهت طولی و عرضی اندازه‌گیری شد و با استفاده از آن سرعت طولی و عرضی ذره محاسبه گردید. همچنین با توجه به جهت گیری بردار سرعت ذره، مسیر حرکت آن ترسیم گردید. سرعت متوسط ذره در راستای طولی در ابتدای مسیر حرکت 0.43 سانتی‌متر بر ثانیه (20 درصد کمتر از سرعت کشش الیاف) اندازه‌گیری شد و رفته رفته با نزدیک شدن ذره به مرکز قالب بر این سرعت افزوده شد تا اینکه در مرکز قالب سرعت ذره برابر با سرعت کشش الیاف گردید. سرعت عرضی متوسط در ابتدای مسیر حرکت 0.05 سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد که این سرعت در مرکز قالب به صفر رسید. نحوه شکل‌گیری حباب‌ها در ورودی قالب مشاهده و با ردیابی حباب، مسیر حرکت آن مشخص گردید. با بررسی ابعادی حباب‌ها در جریان مذاب و اندازه‌گیری سطح حباب در زمان‌های مختلف،

- Vol. 47, No. 5, pp. 750-756, 2007.
- [12] Ahmadzai, A.Z. Behraves, A.H. "A new method to reduce weight density by considering the mold design in injection molding process of thermoplastic structural foam", In Persian, *modares mechanical engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 203-209, 2014.
- [13] Cheng, P. Gong, X.-J. Aivazzadeh, S. Xiao, X. "Experimental observation of tensile behavior of patch repaired composites", *Polymer Testing*, No. 34, pp. 146-154, 2014
- [14] Ghorbani, H. Golzar, M. Behraves, A. H. "Modeling of impregnation in the pultrusion of thermoplastic composites", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 1, pp. 31-42, 2016.
- [15] Dadou, A. "Visualization of pultrusion process parameters of thermoplastic composites", In Persian, Master Thesis, Tarbiat Modares university, 2016.
- [16] Arthur Babeau, Sébastien Comas-Cardona, Christophe Binetruy, Gilles Orange, "Modeling of heat transfer and unsaturated flow in woven fiber reinforcements during direct injection-pultrusion process of thermoplastic composites", *Composite part A: applied science and manufacturing*, Vol. 77, No. 1, pp. 310-318, 2015.
- [17] P.J. Novo, J.F. Silva, J.P. Nunes, A.T. Marques, "Pultrusion of fibre reinforced thermoplastic pre-impregnated materials, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 89, No.1, pp. 328-339, 2016.

امکان بررسی و محاسبه ابعادی حباب فراهم گردید. با بررسی میزان تغییرات ابعاد حباب در مسیر ورود تا خروج قالب، کاهش 17 درصدی سطح حباب اندازه‌گیری شد که نشان دهنده انقباض حباب با حرکت در طول قالب است. وضعیت الیاف در قالب با حضور جریان مذاب مشاهده گردید و در بخشی از قالب، خصوصاً منطقه ایجاد جریان برگشتی، جدایش الیاف و عدم همراستایی آن‌ها مشاهده شد. با استفاده از معادله داریسی، و با استفاده از فشار و سرعت اندازه‌گیری شده، میزان ضریب آغشتگی طولی  $5 \times 10^{-8}$  متر مربع محاسبه گردید.

#### 8- فهرست علائم

$V$	سرعت
$P$	فشار درون قالب
$t$	زمان
$A$	سطح مقطع قالب
$K$	ضریب آغشتگی
$Ll$	طول قالب پالتروژن
$Q$	دبی حجمی قالب
$m, n$	ثوابت ویسکوزیته مذاب
$T$	دمای محیط
	علائم یونانی
$\eta$	ویسکوزیته مذاب پلیمر
$\rho$	دانسیته

#### 9- مراجع

- [1] Campbell, Jr. "Manufacturing processes for advanced composites", Elsevier, 2003.
- [2] Yang, W. J. "Handbook of Flow Visualization", Taylor & Francis, 2nd ed. CRC Press, 2001.
- [3] Schmidt, L.R. "A special mold and tracer technique for studying shear and extensional flows in a mold cavity during injection molding", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 14, No. 1, pp. 797-800, 1974.
- [4] Yokoi, H., Hayashi, T., Toda, K., Morikita, N. "Direct observation of jetting phenomena under a high injection pressure by using a prismatic-glass inserted mold", *SPE ANTEC*, Atlanta, GA, 1988.
- [5] Yokoi, H., Masuda, N., Mitsuhashi, H. "Visualization analysis of flow front behavior during filling process of injection mold cavity by two-axis tracking system", *Journal of materials processing technology*, Vol. 130, No. 1, pp. 328-333, 2002.
- [6] Bress, T. J., Dowling, D. R. "Visualization of injection molding", *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 17, No. 15, pp. 1374-1381, 1998
- [7] Saito, T. Satoh, I. Kurosaki, I. "Quantitative Visualization on Time-dependent Surface Profile of Polymer Injection Molding using He-Ne Laser Interference", *Proceedings of 9th. International symposium on flow visualization*, pp. 260, 2000.
- [8] Yamada, K., Tomari, K., Harada, T., Hamada, H. "Evaluation of weldline strength of injection molded polystyrene by surface milling", *Plastics Engineers*, pp. 708-712, 2004.
- [9] Fathi, S., Behraves, A. H. "Visualization analysis of flow behavior during weld-line formation in injection molding process", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 47, No. 7, pp. 666-672, 2008.
- [10] Fathi, S., Behraves, A. H. "Real-time measurement of flow front kinematics using quantitative visualization in injection molding process", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 48, No. 3, pp. 598-605, 2008.
- [11] Fathi, S., Behraves, A. H. "Visualization of in-mold shrinkage in injection molding process", *Polymer Engineering & Science*,