

مدل سازی سیستم کنترل دستگاه قالب گیری تزریقی مواد پلاستیک

حمیدرضا حقیقت پژوه ، دکتری پلیمر ،

دانشکده فنی دانشگاه تهران ،

تهران ، صندوق پستی ۳۵۱-۱۷۶۶۵ ، تلفن :

۰۹۱۳۲۱۱۲۹۶۶ و ۲۰۵۹۵۵۲

چکیده

در این مقاله، مدل سازی چرخه معمولی ماشین قالبگیری تزریقی (*IMM*)، بررسی می گردد. هر دو مرحله پر کردن قالب و تزریق، مد نظر قرار گرفته است. آنچه در این مدل سازی جدید به نظر می رسد، این است که در مدل غیر خطی مذکور، مشخصه های جریان پلیمر و فعال کننده هیدرولیکی ماشین تزریق به تفصیل مورد بررسی قرار میگیرد. مدل حاصل، توانمندی های شبیه سازی جهت تسهیل طراحی کنترل کننده ماشین را تأمین کرده و مبتنی بر سه عامل می باشد: (a) مشخصه های شیرهای الکترو هیدرولیکی با کنترل دیجیتالی (b) دینامیک سیستم کوبه فعال کننده هیدرولیکی و (c) رفتار توده مذاب پلیمری که از طریق مدل های ساده مهندسی پلیمر تعیین می شود. شبیه سازی مدل با داده های تجربی تایید شده و مدل مذکور برای کنترل چرخه سیستم الکترو هیدرولیکی از سیستم هیدرولیکی نسبتاً دقیقی برخوردار است.

واژه های کلیدی: فرایند تزریق، مواد پلاستیک، سیستم کنترل .

۱. مقدمه:

قالبگیری تزریقی یک فرایند تولید اجزای پلاستیکی با هدایت مذاب پلیمری بدون محفظه قالب می باشد. این فرایند معمولاً شامل نظارت و کنترل مراحل مختلف مانند تنظیم دما در مرحله شکل دهی مذاب پلیمری، ردیابی سرعت تزریق در طی مرحله پر کردن قالب و تنظیم فشار قالب می باشد. تمام این مراحل، در کیفیت قطعه نهایی

تاثیرگذار خواهند بود. لذا در طی هر مرحله از فرایند تزریق به کنترل مناسب پارامترهای سیستم، شدیداً نیاز می باشد. در این پژوهش، دینامیک حرکت و فشار در طی کل چرخه تزریق، از عناوین عمده مورد بررسی می باشد.

کاربرد وسیع سیستم الکترو هیدرولیکی کامپیوتری در دستگاه تزریق، امکان دستیابی به پروفیل های دینامیکی پیچیده سرعت پر کردن و فشار نگهداری را جهت بهبود کیفیت محصول تا حدی زیادی فراهم می آورد. برای

استفاده مناسب از این موقعیت به یک مدل سازی بسیار جامع از سیستم پیچیده دستگاه تزریق نیاز می باشد تا هر نوع طراحی کنترل کننده پیشرفته را تایید نماید. یک مدل مناسب چرخه تزریق باید با توجه به مشخصه های مکانیکی

ماشین تزریق و نیز رفتار مذاب پلیمری تهیه شود. در ابتدایی ترین تحقیقات، مدل سازی فرایند قالبگیری تزریقی، عمدتاً هم بر روی رفتار فرایندی مواد و هم دینامیک دستگاه تزریق، متمرکز شده است. برای نمونه *Ehret* (۱۹۹۴)

تغییر دانسیته و حجم قطعه را بر حسب تغییرات فشار و *Brincat* (۱۹۹۸) خواص ویسکوزی ماده پلیمری را در طول فرایند قالبگیری تزریق مطالعه نمود. در این بررسی های ابتدایی دینامیک دستگاه تزریق کمتر مورد

توجه قرار گرفته بود. در بررسی های *Havliscek & Alleye* (۱۹۹۹)، خصوصیات ماشین تزریق مورد مطالعه قرار گرفت و با مطابقت اندک نسبت به مشخصه های ماده فرایندی مدل سازی گردید. حتی فعالیت های اولیه مدل سازی

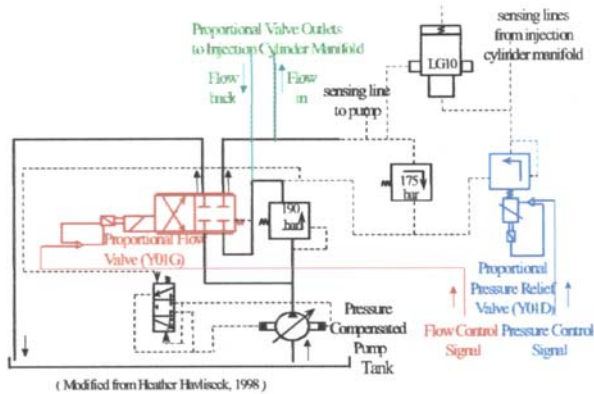
برای جهت دهی مناسب و بهینه سازی طراحی کنترل کننده برای پارامترهای مربوطه نسبتاً کافی است. هنگامی که یک وضعیت نظیر تزریق مطرح می گردد، یک مدل جامع تر که در آن به دو مرحله فرایند توجه شده باشد. عاملی مهم در طراحی مناسب کنترل کننده انتقال به حساب می آید.

برخی مقاله ها، علاوه بر دینامیک حرارتی و سیالاتی مذاب پلیمری، به منظور توجه به دینامیک دستگاه تزریق، یک سیستم کوبه هیدرولیکی نیز به مدل فرایند پلیمر

سیستم هیدرولیکی که ماردون را به جلو می‌راند، از یک پمپ هیدرولیکی تشکیل شده است. این پمپ، خود از یک شیر تناسبی برقی و یک شیر اطمینان تشکیل یافته که این شیر، سیلندرهاى هیدرولیکی مربوط به حرکت ماردون را کنترل می‌کند (شکل ۲).

شکل ۲. سیستم حرکت الکترو هیدرولیکی کوبه یک

ماشین IMM



کل چرخه فرایند تزریق را می‌توان به صورت زیر تشریح نمود:

طی یک چرخه تزریق، گرانول‌های پلیمر از قیف، وارد سیلندر شده و با مذاب پلیمری موجود، مخلوط می‌گردند. سپس، با حرکت ماردون، مذاب پلیمری به داخل قالب تزریق میشود. زمانی که قالب پر شد، ماردون فشار نگهدارنده را بر روی پلیمر موجود در قالب اعمال کرده تا انقباضی که قطعات در طی خنک‌سازی قالب، بدان دچار می‌شوند را جبران نماید. در هر یک از مراحل زیر در چرخه IMM، کنترل‌های ویژه زیر مورد نیاز می‌باشند:

۱- مرحله پر کردن قالب: کنترل سرعت یا وضعیت

جهت تزریق حجم دقیق پلیمر به داخل قالب

۲- مرحله حفظ فشار: کنترل فشار، جهت حفظ وزن

قطعه و کیفیت سطح آن

۳- مرحله خنک‌سازی: کنترل فشار در یک فشار

کمتر، به منظور حفظ کیفیت قطعه بعد از مرحله قبل در این تحقیق، بررسی هر دو مرحله پر کردن و حفظ فشار و

افزوده اند. با این حال، مدل‌سازی انجام شده در مقاله Rafizadeh (۱۹۹۶) جهت تشریح دینامیک دستگاه تزریق، ساده و اجمالی به نظر می‌رسد، زیرا برخی دینامیک غیر خطی ماشین تزریق در نظر گرفته نشده است. در مقاله حاضر تلاش شده تا از نقطه نظر کنترل یافته، مدل عملی از هر دو سیستم پلیمر و ماشین ساخته شود. هدف از این کار آنستکه با تأمین یک ابزار شبیه‌سازی برای طراحی نهایی الگوریتم کنترل تزریق، سرعت پر کردن و فشار نگهداری و نیز فرآیند تزریق از دقت بهتری برخوردار شوند. مبنای این کار، مدل‌سازی دینامیک ماشین می‌باشد که نخستین بار توسط Havlicsek & Alleyne (۱۹۹۹)، ساخته شد.

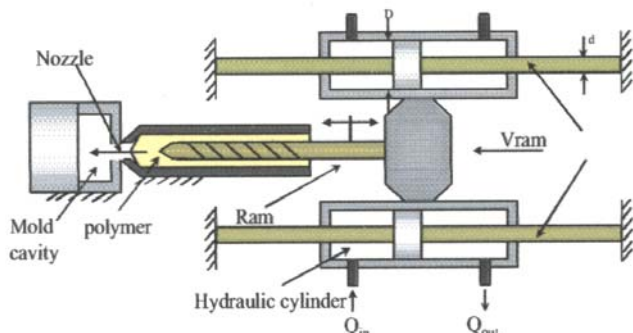
۲. شرح سیستم دستگاه IMM:

IMM مورد استفاده در این تحقیق، نمونه‌ای از یک

نوع *Reciprocation Screw* می‌باشد و از یک

قالب، سیلندر، ماریچ کوبه در داخل سیلندر و سیستم الکترو هیدرولیک که حرکت ماریچ در باز شدن قالب را کنترل می‌نماید تشکیل شده است. ماریچ کوبه، شکل‌دهی و تزریق ماده پلیمری در طول چرخه تزریق را انجام می‌دهد. شکل (۱) تصویری شماتیک از ساختار IMM را نشان می‌دهد.

شکل ۱. تصویری شماتیک از اجزاء مکانیکی ماشین تزریق



۵- فعال کننده هیدرولیکی که جهت تولید نیروی لازم برای حرکت ماردون از سیال پر فشار استفاده می کند.
۶- اینرسی ماردون که اصطکاک چسبندگی - لغزش، به عنوان یک ممانعت کننده از حرکت ماردون .
۷- ویسکوزیته مذاب پلیمری به عنوان منبع اصطکاک ویسکوز غیر نیوتنی.

۱-۳. دینامیک ماشین:

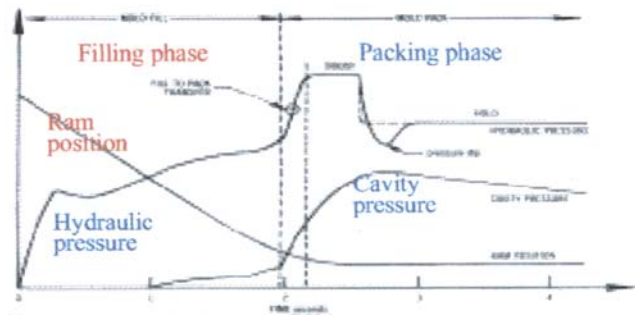
شیر تناسبی جریان، شیری است که از طریق یک سیم پیچ عمل می کند، این شیر توسط شرکت *Bosch* ساخته شده و جریان خروجی از آن متناسب با ولتاژ رانش می باشد. مشخصه های جریان خروجی از این نوع شیر، را تقریباً می توان با استفاده از معادله زیر که از معادله برنولی به دست آمده به دست آورد:

$$Q_1 = Q_{nom} \sqrt{\frac{\Delta P}{C}} \quad (1)$$

در این معادله، C ضریبی است که دانسته توده ای سیال و نیز ضریب تخلیه (Watton، ۱۹۸۹) در آن لحاظ شده اند. $\Delta P = (P_{sup} - P_L)$ ، اختلاف فشار بین ورودی (تأمین) و خروجی (حجم خط) شیر مذکور می باشد. فرض می شود که فشار تأمین شده از سوی پمپ (فشار ورودی به شیر)، P_{sup} ثابت است، زیرا که دینامیک پمپ آنقدر سریع بوده که می توان از آن صرف نظر نمود. Q_{nom} ضریب جریان پایدار می باشد که به عنوان تابعی از ولتاژ رانش اعمال شده از سوی آمپلی فایر می باشد. در بررسی های قبلی (۱۹۹۹)، *Havlicsek & Alleyne* چنین به دست آمد که عرض دامنه شیر مذکور باید بزرگتر از 10 Hz باشد. چنان که مشاهده خواهد شد، عرض دامنه مذکور، صرف نظر کردن از دینامیک شیر در توسعه مدل مورد بررسی را توجیه می کند و در نتیجه تنها از بهره حالت یکنواخت Q_{nom} استفاده گردد. برای یافتن مقدار Q_{nom} از داده های شرکت سازنده شیر، استفاده شد و

نیز مرحله بحرانی انتقال بین این دو مرحله مد نظر می باشد. یک نمای شماتیک از نمونه چرخه قالبگیری تزریقی، در شکل (۳) آمده است.

شکل ۳. مراحل سیکل تزریق (Thayer & Davis، ۱۹۸۰)



مدل مورد بررسی در این مقاله، در دو بخش جداگانه تشریح می شود: مرحله پر کردن و انتقال. از آنجا که دینامیک سیستم برای این دو مرحله نسبتاً متفاوت است، لذا دو مرحله مذکور به طور جداگانه تشریح می شود.

۳. مدل سازی مرحله پر کردن:

مرحله پر کردن چرخه تزریق، به صورت مدل تحت کنترل تزریق پلیمر به درون قالب خالی بررسی گردید. مدل مذکور، شامل ۷ جزء عمده بوده که این اجزاء با توجه به دینامیک ماشین و نیز پلیمر عمل می کنند. این هفت جزء عبارتند از:

۱- یک شیر تناسبی جریان که جریان سیال هیدرولیکی فشار بالای خروجی از پمپ را تنظیم می کند.
۲- مجرای با طول قابل ملاحظه که علاوه بر شیر اطمینان، عناصر محدود کننده دیگری را نیز شامل می گردد.

۳- دینامیک خط هیدرولیک از مرتبه ۲

۴- یک اریفیس کاهنده که جریان می بایست از طریق آن از خط هیدرولیک به فعال کننده عبور نماید.

مقدار جریان اسمی مربوط به مدل مورد بحث در زیر آمده است:

$$Q_{nom} = \begin{cases} \cdot & V_f \leq 1/71 \text{ (لیتر/ثانیه)} \\ (-2/50.07 - 8/2236 V_f + 6/2918 V_f^2 - 0.4137 V_f^3) \times 10^{-5} & 1/71 < V_f < 9/1 \text{ (لیتر/ثانیه)} \\ 0.001332 & V_f > 9/1 \text{ (لیتر/ثانیه)} \end{cases} \quad (2)$$

سیال هیدرولیکی طی حرکت آن از سوی پمپ به طرف عنصر فعال کننده را به دست می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از این محاسبات، تأثیرات شیر اطمینان و دینامیک خط، افزایش فشار سیستم هیدرولیکی در طی حرکت ماردون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این دینامیک مرکب در قالب یک سیستم مرتبه ۲ شامل یک بهره متغیر، مدل‌سازی می‌شود. در انتهای این بخش، یک مدل‌سازی جامع از این قسمت معرفی خواهد شد. همچنین چندین اتصالات و عناصر محدود کننده دیگر نظیر یک فیلتر موجود در خط هیدرولیک، وجود دارند که از تأثیر آنها در تعیین یک مدل دقیق، نمی‌توان چشم‌پوشی نمود. برای لحاظ نمودن تأثیرات عناصر محدود کننده موجود در خط هیدرولیک، در معادله فشار خط هیدرولیک، از عبارت *Alleyne Aavli sek* (تاخیر زمانی نیز استفاده می‌شود). (1999، & دارای عبارت تأخیر زمانی بوده و عبارت است از:

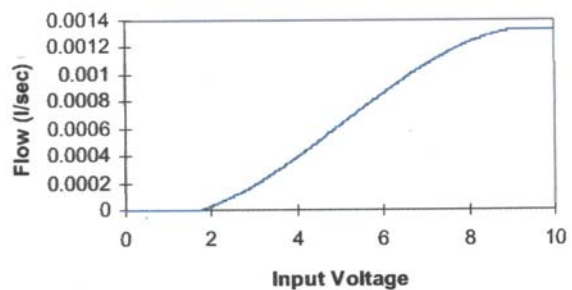
$$Q = \left[Q_{nom} \times V_f \times \sqrt{\frac{P_{sup} - P_L}{C}} \right] (\tau - \tau_d) \quad (4)$$

فشار موجود در خط هیدرولیک (P_L) را می‌توان از محاسبه جریان خالص ورودی به حجم کنترل به دست آورد. این حجم کنترل، همان خط هیدرولیک و عناصر مربوط به آن می‌باشد که این عناصر، روی هم رفته، حجم مؤثر V_L را دارا می‌باشند. مقدار جریان را می‌توان به سادگی با استفاده از جریان ورودی پمپ به خط هیدرولیک (Q_1) و جریان خروجی از خط هیدرولیک بوی فعال کننده (Q_2) تعیین نمود. معادله پیوستگی مذکور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Q_1 - Q_2 = \frac{dV_L}{dt} + \frac{V_L}{\beta} \cdot \frac{dP_L}{dt} \quad (5)$$

در معادله بالا، V_f ، ولتاژ ورودی برای شیر کنترل جریان می‌باشد. بررسی داده‌های شرکت سازنده نشان داد که در حالی که شیر، تقریباً با گستره عملیاتی اعمال شده (V_f بین ۳ تا ۸) متناسب بود، اما عملاً، رفتار جریان نسبت به ولتاژ ورودی، به صورت منحنی غیر خطی بوده و در ضمن برای ولتاژ ورودی کمتر از ۲ ولت، گستره قابل ملاحظه‌ای از منطقه مرده جریان، به چشم می‌خورد. منحنی کالیبره شده جریان بر حسب ولتاژ، در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴. تابع رفتار شیر تناسبی جریان



معادله نهایی برای این شیر جریان، (که خطوط گذر یا تبدیل را شامل نمی‌باشد)، به صورت زیر درمی‌آید:

$$Q_1 = \left[Q_{nom} \times V_f \times \sqrt{\frac{P_{sup} - P_L}{C}} \right] \quad (3)$$

بین پمپ و سیلندر هیدرولیکی ماردون، حدود ۵ متر از خطوط هیدرولیکی از جنس و اندازه‌های مختلف، وجود دارد. از تئوری خط گذر (Watton, 1989) در تعیین تابع انتقالی استفاده گردید که این تابع انتقال، رفتار

$$Q_r = A_A \frac{dx_{ram}}{dt} + \frac{V_A(x_{ram})}{\beta} \cdot \frac{dP_A}{dt} + C_L P_A \quad (9)$$

A_A ، مساحت سیلندر فعال کننده است، x_{ram} ، موقعیت ماردون می‌باشد. V_A حجم سیلندر فعال کننده بوده و تابع وضعیت ماردون می‌باشد. β ، مدول بالک و C_L ، ضریب نشست می‌باشد. C_L ، به صورت تجربی با بررسی افت فشار به عنوان تابعی از زمان در هنگامی که جریان خروجی از پمپ ناگهان قطع شود، تعیین می‌گردد. با مرتب نمودن مجدد معادله ۹، دینامیک فشار عنصر فعال کننده (P_A) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{dP_A}{dt} = \frac{\beta}{V_A(x_{ram})} \left[Q - A_A \frac{dx_{ram}}{dt} - C_L P_A \right] \quad (10)$$

یک موازنه ساده نیرو، دینامیک حرکت ماردون را به دست می‌دهد:

$$m \frac{d^2 x_{ram}}{dt^2} = P_A A_A - P_n A_n - F_{stick} - F_v \quad (11)$$

عبارت اصطکاک در سمت راست معادله ۱۱، نیروی F_{stick} که یک پدیده چسبندگی لغزش حاصله از وجود درزگیرها در فعال کننده‌هاست و نیز یک عبارت اصطکاک ویسکوز (F_v) که از طریق ویسکوزیته پلیمر تزریق شده و نیز سرعت ماردون مقدار آن به دست می‌آید، را شامل می‌باشد. P_n و A_n به ترتیب فشار داخلی و سطح داخلی نازل تزریق می‌باشند.

در دینامیک *IMM* مورد بحث، شیر اطمینان وجود دارد که فشار عملیاتی در دسترس را محدود کرده و کنترل فشار در طی مرحله پر کردن را بر عهده دارد. این شیر، یک شیر تناسبی، عمل کننده توسط سیم‌پیچ و با پس‌خور جبرانی بوده که با فرستادن سیگنال ورودی ۰ تا ۱۰ ولت به یک آمپلی فایر *PWM* کنترل می‌شود. کالیبراسیون بین این سیگنال ورودی به کارت آمپلی فایر

فرض شد که حجم عناصر موجود در خطوط هیدرولیک ثابت است، لذا $\frac{dV_L}{dt} = 0$ است. ظرفیت

سیال، $\frac{V_L}{\beta}$ ، نشان دهنده میزان انرژی است که ذخیره خواهد نمود. با مرتب نمودن مجدد و انتگرال‌گیری، معادله مربوط به فشار خط هیدرولیک به صورت زیر می‌آید:

$$P_L = \int \frac{\beta}{V_L} (Q_1 - Q_r) dt \quad (6)$$

در سیستم *IMM* مورد بحث، یک شیر اطمینان نیز در خط هیدرولیک، نصب شده که به عنوان ورودی کنترل فشار از آن استفاده می‌شود. این شیر به عنوان یک حد اشباع از فشار خط هیدرولیک، مدل‌سازی می‌شود.

$$P_L = \begin{cases} P_{\max} & P_L \geq P_{\max} \\ \int \frac{\beta}{V_L} (Q_1 - Q_r) dt & 0 < P_L < P_{\max} \\ 0 & P_L \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

بین حجم خط هیدرولیک و عنصر فعال کننده، یک اتصال دهنده کوچک (به عنوان یک عنصر محدود کننده) وجود دارد که افت فشاری بین فشار خط هیدرولیک و فشار داخل فعال کننده را به وجود می‌آورد. این عنصر محدود کننده به عنوان یک اریفیس ساده مدل‌سازی می‌شود:

$$Q_r = C_V \sqrt{P_L - P_A} \quad (8)$$

که در آن C_V ، یعنی ضریب اریفیس، به طور تجربی تعیین می‌شود. نیروی اعمال شده بر روی فعال کننده، در نتیجه فشار داخل فعال کننده به وجود می‌آید که این فشار، خود با استفاده از موازنه جریان تعیین می‌شود. کل جریان وارده به سیلندر، با تغییر حجم سیلندر، تراکم سیال و هر نوع نشست سیال از آب‌بندها معادل می‌باشد.

رفتار می کند. (Abu Fara, ۱۹۸۳) در مدل مورد بحث در این مقاله، مشابه با روش Raficadeh (۱۹۹۶)، رفتار مذاب پلیمری، در هنگام کشیده شدن آن از فضای حلقه‌ای مابین استوانه‌های هم محور بررسی گردید. ماردون در حکم سیلندر داخلی است که حرکت می کند، در حالی که سیلندر در حکم سیلندر خارجی ساکن عمل می کند. در محاسبه اصطکاک ویسکوز از یک موازنه مومنت و مدل ویسکوزیته قانون توانی استفاده شد.

$$F_r = \pi \eta_0 K_n^{1-n} (L_0 + z) \left(\frac{V_z}{K_r^n - 1} \right)^n \quad (13)$$

$\eta_0 =$ ویسکوزیته پلیمر در سرعت برشی $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$

$R_n =$ شعاع نازل = شعاع سیلندر قبل از همگرا شدن

نازل

$K_r =$ نسبت شعاع ماریپچه به شعاع نازل

$n =$ اندیس پلیمر (برای HDPE، $n = 0.6$)

$$\frac{dz}{dt} = V_z = \text{سرعت ماردون}$$

$z =$ جابجایی ماردون

در این مقاله، در بررسی رفتار مذاب پلیمری از فرضیات زیر استفاده شده است:

۱- جریان مذاب پلیمری در فضای بین دو سیلندر، جریانی یکنواخت می باشد.

۲- جریان، محوری و ایزوترمال بوده و هیچ لغزشی در دیواره‌های سیلندر وجود ندارد.

۳- جریان بر مبنای مدل قانون توانی، یعنی

$$\eta = \eta_0 \dot{\gamma}^{n-1}$$

مدلسازی شده است.

۴- هیچگونه نشتی، انقباض یا تراکم قطعه در مورد پلیمر وجود ندارد.

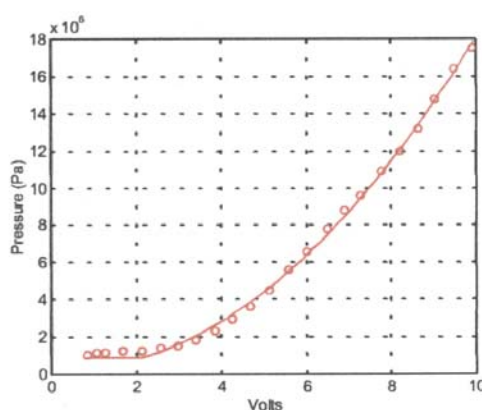
با افزایش مقاومت، در نتیجه اصطکاک ویسکوز جریان پلیمر به لحاظ عبور پلیمر از درون نازل، افزایش

و فشار هیدرولیکی حالت یکنواخت ایجاد شده به طور تجربی انجام گرفت. (Havlicsek در ۱۹۹۸) رابطه حالت یکنواخت میان فشار و ولتاژ به گونه زیر تعیین شد:

$$P = \begin{cases} 9 \times 10^5 & \text{پاسکال} & V_p < 2 \\ \left(\frac{3}{35} - \frac{1}{44} V_p + \frac{1}{92} V_p^2 \right) \times 10^5 & \text{پاسکال} & V_p \geq 2 \end{cases} \quad (12)$$

شکل ۵، داده‌های تجربی به دست آمده را در قالب یک منحنی از معادله ۱۲ نشان می دهد:

شکل ۵. رابطه ولتاژ - فشار، برای شیر اطمینان



رفتار گذرای شیر فشار مذکور، از طریق تابع انتقال درجه دوم و بررسی تجربی رفتارهای فشار در حوزه زمان، تعیین شد. با این وجود، دینامیک این شیر، به قدر کافی سریع می باشد. به گونه‌ای که دینامیک تعیین کننده، همان دینامیک فشار داخل مجرای هیدرولیکی می باشد. لذا، دینامیک اشباع فشار هیدرولیکی از طریق شکل ۵ و دینامیک خط درجه ۲ تعیین می گردد. برای مرحله پر کردن چرخه IMM شیر جریان در شکل ۴ دینامیک سیستم را کنترل می کند.

۲-۳. دینامیک مذاب پلیمری:

جریان مذاب پلیمری، یک جریان نیوتنی نیست و در هنگام محاسبه مقاومت ویسکوز مذاب پلیمری حاصله به دلیل حرکت آن از درون نازل و سیلندر، می توان در نظر گرفت که جریان پلیمر به صورت یک جریان محوری

گردیده است. ΔP_n ، اختلاف فشار بین دو طرف نازل می‌باشد.

در شروع مرحلهٔ پر کردن قالب، فشار داخل محفظهٔ قالب، صفر می‌باشد. ورود پلیمر به درون قالب، تنها دلیل افزایش فشار داخل محفظهٔ قالب می‌باشد. در نتیجه اگر فرض شود که پلیمر، ایزوترمال و محفظه، مستحکم باشد، آنگاه فشار داخل محفظه (P_{cavity}) بنا بر تابع موازنه جرم زیر از مقدار صفر افزایش می‌یابد:

$$\frac{V_{cavity}}{\beta_p} \cdot \frac{dP_{cavity}}{dt} = q_p \quad (17)$$

۴. مدل‌سازی مرحله تزریق و مرحلهٔ پر کردن:

بررسی‌های قبلی روی مدل‌سازی چرخهٔ *IMM*، معمولاً بیشتر به مرحله پر کردن یا مرحلهٔ پر کردن از این چرخه پرداخته‌اند. از آنجا که دینامیک سیستم، به خصوص مشخصه‌های پلیمر، قبل و بعد از مرحله تبدیل، کاملاً متفاوت می‌باشند. لذا این انتقال یکی از مهم‌ترین مواردی است که در مدل‌سازی سیستم *IMM* باید به آن توجه نمود. زمانی که قالب، کاملاً از مذاب پلیمری پر شود، فشار داخل قالب و داخل نازل، به سرعت افزایش خواهد یافت. همزمان، سرعت ماردون به حد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و تقریباً به صفر می‌رسد. پس از مرحلهٔ تبدیل، رفتار پلیمر و نیز رفتار ماشین، به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کنند. در مورد روشی که این تغییر قابل ملاحظه را به صورت دینامیکی تشریح نماید. به ندرت می‌توان مطالبی را در نوشته‌ها یافت. بنابراین مدل مناسبی که ترکیبی از هر دو مرحلهٔ چرخه *IMM* در آن لحاظ شده باشد. در طراحی نهایی کنترل *IMM* بسیار ارزشمند جلوه خواهد نمود. تغییرات مدل در طی مرحلهٔ پر کردن طبق موارد زیر صورت می‌گیرند:

فشار تدریجی در نازل، پدید می‌آید. چنین به نظر می‌آید که پدیدهٔ مذکور، عامل اصلی موثر در افزایش سریع فشار در خطوط هیدرولیک در طی مرحله پر کردن باشد. این افزایش فشار که مقاومت در برابر حرکت ماردون را به همراه دارد، از طریق یک قانون بقای جرم، مدل‌سازی می‌شود:

$$\frac{V_n}{\beta_p} \cdot \frac{dP_n}{dt} = A_n \frac{dz}{dt} - q_p \quad (14)$$

$$V_n = V_{n0} - A_n z \quad (15)$$

n = اندیس نازل یا مدل قانون توانی

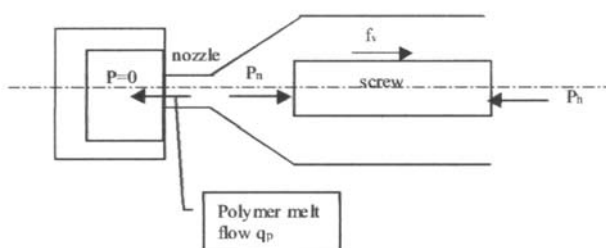
P = پلیمر A_n = سطح نازل V_n = حجم پلیمر

در نازل q_p = جریان خروجی از نازل

در حالت واقعی، فرض شده که نازل، سخت و ایزوترمال باشد و طی گذر از نازل دانسیتهٔ پلیمر در همه جای نازل یکنواخت است. در معادلهٔ ۱۴، دبی مذاب پلیمری (q_p) از درون نازل با استفاده از معادلهٔ برنولی و بررسی منطقهٔ بین نازل و موقعیت جلوتر مذاب پلیمری محاسبه می‌گردد (*Rafizadeh*، ۱۹۹۶):

$$q_p = \left(\frac{\Delta P_n}{K_n} \right)^{\frac{1}{n}}$$

شکل ۶. جریان پلیمر در درون نازل در طی مرحلهٔ پر کردن



فرض می‌شود که جریان غیر نیوتنی پلیمر، آرام، یک بعدی و ایزوترمال است. با محاسبهٔ پارامتر k_n که مجموع ضرایب جریان برای تمام قسمت‌های قالب، در آن لحاظ شده، تأثیر شکل پیچیدهٔ قالب در محاسبات فوق، منظور

۴-۱. تغییرات دینامیک ماشین:

در مورد ماشین، در طی مرحله تراکم پذیری سیال هیدرولیکی، مهم ترین فاکتور موثر بر عملکرد ماشین می باشد. با این وجود، این عامل به خودی خود، قادر نیست دینامیک ماشین را عملاً تغییر دهد. بنابراین مدل ارائه شده در بخش ۳ هنوز معتبر و قابل استفاده می باشد. با این حال، به جای شیر کنترل دبی در شکل ۴، شیر اطمینان در شکل ۵ به عنوان ورودی کنترل کننده سیستم محسوب می گردد.

۴-۲. تغییرات صورت گرفته در دینامیک مذاب پلیمری:

در مورد دینامیک جریان مذاب پلیمری، موازنه جرم و دینامیک جریان برگرفته از معادلات ۱۴ تا ۱۶ هنوز معتبر می باشند. با این وجود دیگر فرض نمی شود که پلیمر تراکم ناپذیر و ایزوترمال باشد. در طی مرحله پر کردن به خاطر انتقال حرارت از پلیمر به جداره قالب، پلیمر دچار انقباض می گردد. همچنین به خاطر فشار بالای نگهداری پلیمر شروع به متراکم شدن می کند. بنابراین طبق یک موازنه نیرو ماردون به آرامی به سمت جلو حرکت خواهد نمود تا ماده بیشتری را تزریق نماید و افت فشار به وجود آمده را جبران نماید. برای ساخت مدل این مقاله فرض می شود که تراکم پلیمر، به صورت یک فرایند نسبتاً پایدار می باشد. زیرا حرکت ماردون، نسبتاً کند است. بنابراین، انقباض را با استفاده از یک جریان نشتی و توسط رابطه توانی برای فشار نازل مدلسازی نمود:

$$q_{leak-cavity} = K_{leak-cavity} \cdot (p_n)^{n_1} \quad (18)$$

فاکتورهای تجربی $K_{leak-cavity}$ و n_1 از داده های آزمایشگاهی به دست می آیند و برای مواد پلیمری مختلف، کاملاً متفاوتند، طی مرحله پر کردن، معادله موازنه جرمی محفظه قالب (معادله ۱۷) هنوز معتبر می باشد. با این وجود به لحاظ انقباض و مدل تراکم در

مرحله پر کردن، جریان پلیمر ورودی به محفظه قالب،

معادل با جریان نشتی این محفظه می باشد.

$$q_{nozzle} = q_{leak-cavity} \quad (19)$$

آزمون های تجربی نشان داده اند که جابجایی ماردون بیشتر از آن چه است که تنها با ملاحظه سرعت تراکم و انقباض پلیمر انتظار می رفت. با توجه به ساختار مجموعه ماردون - سیلندر، گمان می شود که ۲ پدیده دیگر نیز وجود دارند که تاثیری قوی بر دینامیک سیستم دارند. پدیده اول، عبارتست از نشت رو به عقب پلیمر در راستای ماریچه و به سمت بخش پلیمر جامد تغییر حجم کنترل موثر مربوط به نازل، پدیده دوم می باشد. در طی مرحله پر کردن، منطقه دقیقاً واقع در جلوی ماریچه را می توان در حکم حجم کنترل نازل در نظر گرفت. در ابتدای مرحله پر کردن این حجم کنترل، به حجم کل راستای ماریچه تبدیل می شود. در این حالت، حجم کنترل مؤثر، ۱۰ تا ۳۰ برابر افزایش می یابد. به طور کلی می توان این دو مورد را به صورت تغییر نشتی و حجم در تابع موازنه جرمی معادله ۱۴ مدلسازی نمود. همچنین مدل نشت از محفظه قالب از طریق داده های تجربی به یک رابطه توانی میان فشار نازل و جریانی که در راستای ماردون به سمت عقب برمی گردد، می توان دست یافت:

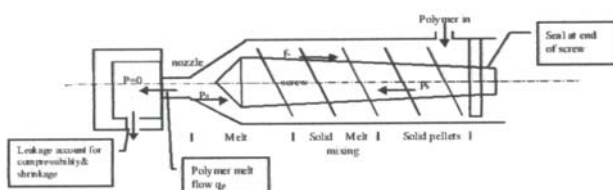
$$q_{leak-screw} = k_{leak-screw} \cdot (p_n)^{n_2} \quad (20)$$

پارامترهای $k_{leak-screw}$ و n_2 از طریق تجربی

به دست می آید (شکل ۷).

شکل ۷. نمای سیستم نازل - ماردون، در طول مرحله

پر کردن



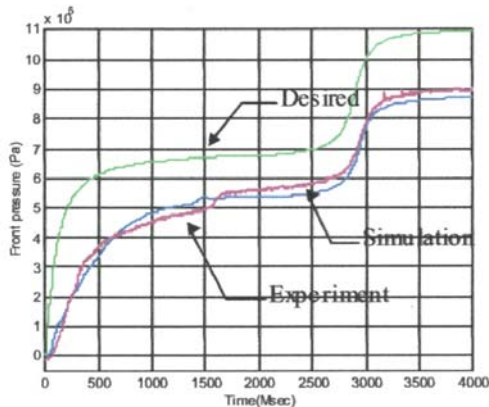
۵. تایید مدل:

لذا از سیستم شبیه‌سازی شده مذکور که با دقت نسبتاً کافی، دینامیک سیستم را به دست می‌دهد می‌توان به عنوان راهنمای مناسبی جهت توسعه کنترل کننده استفاده نمود. برای انجام آزمون جداگانه در مورد صحت مدل در مرحله تزریق، قالب پر شد و سپس شیر اطمینان تنظیم گردید. فشار مطلوب، به صورت زیر تعیین گشت:

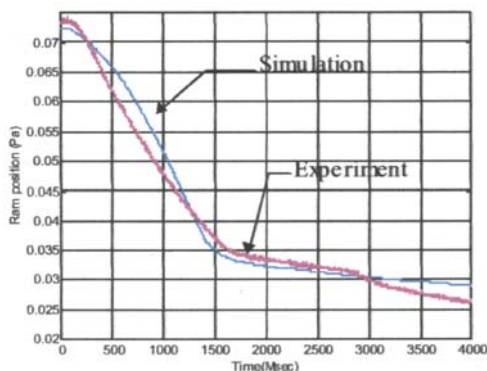
$$P_{des} = \begin{cases} \gamma \times 1.6 \times \left[\frac{2}{\pi} \text{Arc}\left(\frac{t}{g/1}\right) \right] & t < 2 \\ \gamma \times 1.6 + 3 \times 1.6 \times \left[\frac{1.5}{\pi} \text{Arc}\left(\frac{t-2/9}{.1}\right) \right] + 1.62 & t \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

شکل‌های ۱۰ و ۱۱، رفتاری شبیه‌سازی شده و تجربی را برای مرحله تزریق نشان می‌دهند.

شکل ۱۰. مقایسه میان فشار شبیه‌سازی شده و تجربی، فقط کنترل فشار



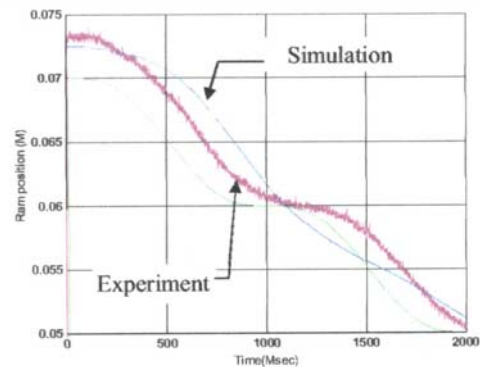
شکل ۱۱. مقایسه میان فشار شبیه‌سازی شده و تجربی، فقط کنترل وضعیت



جهت کنترل مراحل پر کردن و تزریق، از دو کنترل کننده جداگانه از نوع PID و همچنین برای بررسی مرحله تبدیل میان پر کردن و تزریق، از یک کنترل کننده حلقه باز استفاده می‌شود. شکل‌های (۸) و (۹) مقایسه فشار و وضعیت مدل‌سازی انجام شده و داده‌های تجربی را برای کنترل مرحله تزریق نشان می‌دهند. طی این مرحله پر کردن، شیر اطمینان روی وضعیت ثابتی تنظیم گردید.

شکل ۸. فشار شبیه‌سازی شده و فشار تجربی. فقط

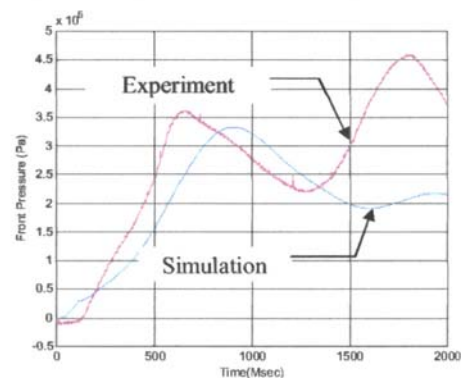
کنترل وضعیت



ورودی به هر دو IMM مدل و IMM تجربی به صورت یک سیگنال ترکیبی از ۲ بخش تابع $arctan$ بود. این عمل، روی چرخه واقعی تزریق و توسط پلیمر واقع در سیلندر دستگاه انجام شد.

شکل ۹. فشار شبیه‌سازی شده و فشار تجربی. فقط

کنترل وضعیت



صرفاً اجزاء مکانیکی دستگاه، بدون توجه به مشخصه‌های تاثیرگذار پلیمر، مورد بررسی قرار گرفته بود. نتایج تجربی، دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده از مدل جدید را تصدیق نمودند. در مقایسه مدل جدید با مدل *Havliseck* و *Alleyne* (۱۹۹۹) چنین به دست می‌آید که مدل جدید، مشکل فقدان تعیین مقدار دقیق اصطکاک ویسکوز پلیمر را مرتفع می‌کند. در ضمن در مدل قبلی به خاطر عدم توجه به دینامیک جریان پلیمر از درون نازل، مقدار فشار، کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌شد. در حالی که در مدل جدید، این مشکل نیز رفع می‌گردد. در نهایت این که مرحله تزریق و موازنه نیرو در طی مرحله پر کردن، به گونه‌ای بررسی گردید که صحت بالای مدل را در پی داشت. مجموع این بهبودهای صورت گرفته در مدلسازی *IMM* یک شبیه‌سازی با قابلیت پیش‌بینی بسیار دقیق برای نتایج تجربی واقعی را به دست می‌دهد. برای طراحی بهینه سیستم کنترل تزریق در آینده با این مدل جدید راهنمای خوبی برای این کار خواهد بود.

پیوست:

$$A_A = \text{مساحت سیلندر فعال کننده} = 0.02 m^2$$

$$b = \text{میرایی ویسکوز} = \frac{Ns}{m} = 900$$

$$\beta = \text{مدول بالک موثر سیال هیدرولیکی} = 5/75 \times 10^7 \text{ pa}$$

$c = \text{ضریب ثابتی که دانسیته سیال و ضریب تخلیه در آن لحاظ شده‌اند.}$

$$C_V = \text{ضریب اریفیس} = 6 \times 10^{-6} \text{ (پر کردن)} \\ \text{و } 1 \times 10^{-15}$$

$$C_L = \text{ضریب نشت} = 3 \times 10^{-11}$$

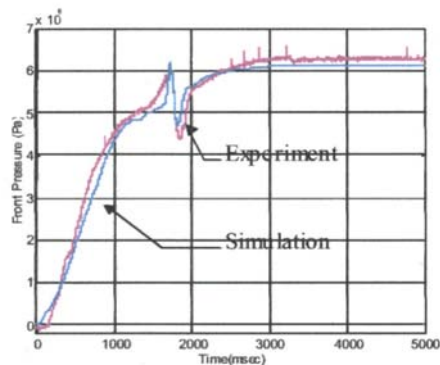
$$\Delta V = \text{ناحیه سرعت صفر} = \frac{m}{s} = 0.001$$

$$F_{stick} = \text{ماکزیم اصطکاک استاتیکی} = 400 N$$

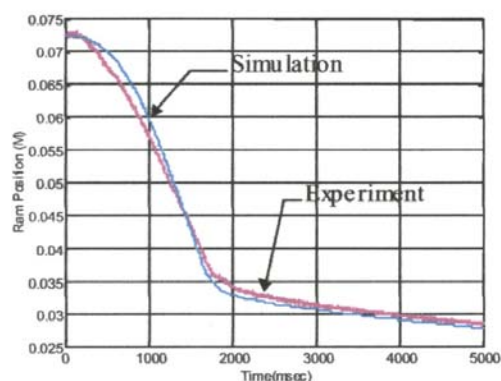
$$F_{slip} = \text{اصطکاک لغزش} = 350 N$$

شکل‌های ۱۲ و ۱۳، شبیه‌سازی با یک مدل کامل را شامل چرخه کامل تزریق را نشان می‌دهند. برای اتصال مراحل پر کردن و تزریق به یکدیگر، از تبدیل مدار باز استفاده شده است.

شکل ۱۲. مقایسه بین فشار شبیه‌سازی شده و تجربی برای کل چرخه تزریق



شکل ۱۳. مقایسه بین فشار شبیه‌سازی شده و تجربی برای کل چرخه تزریق شامل دو مرحله پر کردن



از شکل‌های فوق، می‌توان دریافت که شبیه‌سازی مذکور، رفتار سیستم را تا حد مطلوبی که بتوان از آن در توسعه کنترل کننده بهره برد، به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

نتایج:

در این مقاله، مدلی جامع از یک دستگاه تزریق بررسی گردید. در مدل حاضر، کلیه اجزاء سیستم مکانیکی و نیز مشخصه‌های پلیمر، مورد بررسی قرار گرفت. در مدل *Havliseck* و *Alleyne* (۱۹۹۹)،

Control-A Review.” *Polymer Engineering & Science*, Vol. 27, No. 18, pp. 1345-1356, 1987.

3. Brincat, P., Friedl, C., Talwar, K., “*Extensional Viscosity Modeling for Injection Molding Simulation.*” *Proceeding Annual Technical Conference-ANTEC, Conference proceedings, v 1 1998. Soc Plast Eng, Brookfield, CT, USA. p552-556.*

4. Ehret, P. Davidoff, A. Jacque, F. & Bung, H., “*Simulation of the Complete Injection Cycle,*” *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings, Publ by Soc of Plastics Engineers, Brookfield, CT, USA. pt 1, p 542-544.*

5. Havlicsek, H., *Iterative Learning Control of Injection Molding, M.S. Thesis, Dept. of Mechanical & Industrial Engineering, Univ. of Illinois Urbana-Champaign, May 1998.*

6. Havlicsek, H., & Alleyne, A., “*Nonlinear control of an Electrohydraulic IMM via Iterative Adaptive Learning.*” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. 3, pp.312-323, 1999.*

7. Karnopp, D., “*Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems.*” *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 107, pp. 100-103, 1985.*

8. Rafizadeh, M., Patterson, W. I., Kamal, “*Physically-Based Model of Thermoplastics injection Molding for Control Application.*” *Intern. Polymer processing, Vol. XI pp. 352-362, Apr.. 1996.*

9. Thayer, W.J., & Davis, M.A., “*Control for Injection Molding of Thermoplastics,*” *Moog Technical Bulletin No. 145., Moog Inc., East Aurora, NY, 1980.*

10. Watton, John, *Fluid Power Systems* University Press, Cambridge, 1989.

$$G_p = \text{بهرهٔ پس خور تناسبی} = \text{معادل } 500$$

$$G_d = \text{بهرهٔ پس خور مشتقی} = \text{معادل } 30$$

$$K_p = \text{بهرهٔ تناسبی در } Learning\ update = 500 \text{ (پر کردن) و } 0.12 \text{ (Pack)}$$

$$K_d = \text{بهرهٔ مشتقی در } Learning\ update = 30 \text{ (پر کردن) و } (Pack)$$

$$m = \text{جرم فعال کننده} = 80 \text{ kg}$$

$$P_{sup} = \text{فشار تامین پمپ} = \text{ماکزیمم } 2500 \text{ psi}$$

$$P_L = \text{فشار خط هیدرولیک}$$

$$P_A = \text{فشار فعال کننده}$$

$$P_{max} = \text{مقدار مقرر شیر اطمینان در طی مرحله پر کردن}$$

$$Q_1 = \text{جریان از سوی شیر کنترل جریان به خط}$$

$$Q_2 = \text{جریان از خط به فعال کننده}$$

$$Q_{nom} = \text{جریان اسمی کالیبره شده، به عنوان تابعی از}$$

ولتاژ کنترل جریان

$$\sigma = \text{انحراف استاندارد روی } Gaussian\ Kernel = 0.4$$

$$0.1 \text{ (پر کردن) و } 0.10 \text{ (pack)}$$

$$\tau_d = \text{تاخیر زمانی حاصله از عناصر محدود کننده موجود}$$

$$\text{در خط هیدرولیک} = 175 \text{ msec}$$

$$V_A = \text{حجم فعال کننده} = 0.103 \text{ m}^3$$

$$V_f = \text{ولتاژ ورودی به شیر کنترل جریان}$$

$$V_L = \text{حجم خط} = 0.102 \text{ m}^3$$

$$V_p = \text{ولتاژ ورودی به شیر اطمینان}$$

$$\omega_n = \text{فرکانس طبیعی شیر اطمینان} = 25 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\xi = \text{نسبت میرایی شیر اطمینان} = 0.6$$

$$x_{ram} = \text{جابجایی هیدرولیکی ماردون}$$

$$P_n = \text{فشار داخل نازل سیلندر}$$

$$F_v = \text{اصطکاک ویسکوز مذاب پلیمری}$$

References

1. Abu Fara, D., *M. Eng thesis, Dept. of Chemical Engineering, Montral. PQ. McGill University, 1983.*

2. Agrawal, A.R., Panelidis, I.O., & Pecht, M., “*Injection-Molding Process*