

نفوذپذیری پارچه‌های تقویت کننده مورد استفاده در

روش RTM

Permeability Constant of Reinforcing Fabrics Used in Resin Transfer Molding Method

مهدی حاجتی

دانشگاه تربیت مدرس، بخش مهندسی مکانیک

دریافت: ۹۶/۱۱/۹، پذیرش: ۹۶/۱۱/۵

چکیده

نفوذپذیری پارچه‌های تقویت کننده از لحاظ نظری و تجربی بررسی شده است. از معادله دارسی که بیانگر نفوذ سیال گرانرو در داخل اجسام متخلخل است به همراه روش تزریق با فشار ثابت استفاده شده است تا روابط نظری لازم برای محاسبه نفوذپذیری بدست آید. حرکت رزین در پارچه‌ها برای سه حالت ایزوتروپ، ارتوتروپ و غیر ایزوتروپ بررسی شده است. سه نوع پارچه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. حرکت جبهه رزین در نمودار شیشه، که از مهم‌ترین پارچه‌های مورد استفاده در صنعت است، روی یک دایره بوده که حاکی از رفتار ایزوتروپ این پارچه‌هاست. نفوذپذیری برحسب تخلخل برای این پارچه بدست آمده است و نتایج نشان می‌دهد که با کاهش تخلخل، نفوذپذیری نیز کم می‌شود. نقش فشار روی نفوذپذیری در یک تخلخل ثابت بررسی شده است. نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که فشار نقش زیادی در میزان نفوذپذیری ندارد. پارچه بافته شده معمولی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج بیانگر رفتار ایزوتروپ این پارچه است. در آزمایش روی پارچه بافته شده هارنس ۵، جبهه رزین روی یک بیضی قرار دارد که محورهای آن با محورهای آزمایش زاویه دارد. رفتار این نوع پارچه غیر ایزوتروپ است. ضرایب نفوذپذیری برای پارچه هارنس ۵ محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت پلیمری، نفوذپذیری، RTM، نمد، پارچه بافته شده

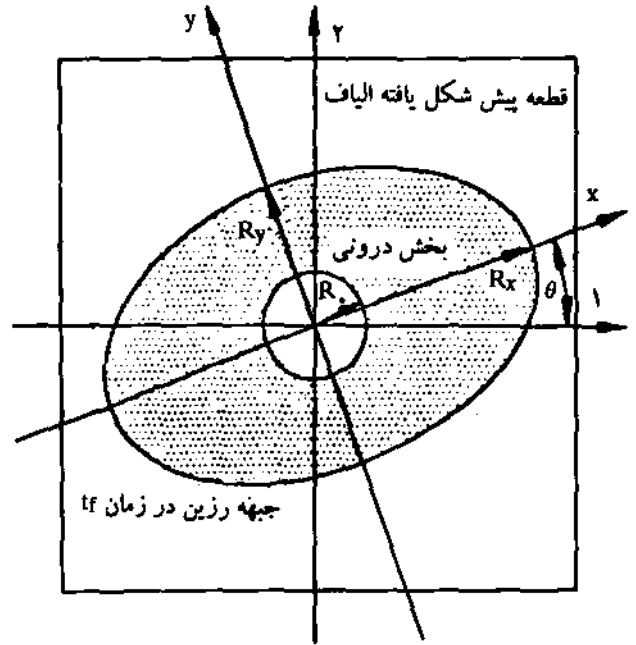
Key Words: polymer composite, permeability, RTM, mat, woven fabric

مقدمه

مورد نظر درمی‌آیند. به این حالت قطعه که الیاف شکل داده شده و هنوز خشک‌اند، پیش‌شکل یافته (perform) گفته می‌شود. قطعه به این حالت در داخل حفره قالب که آن نیز به شکل نهایی قطعه است قرار داده می‌شود و سپس، قالب بسته شده و رزین با فشار به داخل آن تزریق می‌شود. هدف اصلی در این دو روش پرکردن قالب در کمترین زمان ممکن به صورتی است که هیچ نقطه خشکی در قطعه باقی نماند.

روشهای متفاوتی در ساخت کامپوزیتهای پلیمری بکار گرفته می‌شود. دوروش متداول برای ساخت قطعات بزرگ و پیچیده در صنایع خودرو، قالبگیری انتقال رزین (resin transfer molding, RTM) و قالبگیری تزریقی با واکنش ساختاری (structural reaction injection molding, SRIM) است [۱]. نحوه ساخت اساسا در هر دو روش یکسان است. الیاف به صورت نمد، پارچه بافته شده، الیاف پیوسته یا خرد شده به شکل قطعه

برخوردار است. نفوذپذیری در درون صفحه قطعه پیش شکل یافته در حالت کلی به صورت یک تانسور مرتبه دوم عمل می‌کند. نفوذپذیری در جهات مختلف با استفاده از آزمایشهای جریان محوری (axial flow) به همراه شکل یک بعدی معادله داری [۱۵، ۱۶] و آزمایشهای جریان شعاعی صفحه‌ای (in-plane radial flow) به همراه شکل دوبعدی معادله داری [۱۷، ۱۸] بدست می‌آید. در این مقاله، ابتدا اساس نظری کار بررسی می‌شود. با استفاده از آزمایش و روش فشار تریق، ثابت نفوذپذیری نمد شیشه (glass mat) و دو پارچه بافته شده محاسبه می‌شود.



شکل ۱- جبهه حرکت رزین در قطعه پیش شکل یافته غیر ایزوتروپ.

اساس نظری
جبهه حرکت رزین در صفحه در حالت کلی، که قطعه پیش شکل یافته رفتار کاملاً غیرایزوتروپ دارد، در شکل ۱ نشان داده شده است. محوره‌های ۱-۲ در این شکل محوره‌های آزمایش و محوره‌های x-y در امتداد جهات اصلی تانسور نفوذپذیری قرار گرفته‌اند. محوره‌های x-y زاویه θ با محوره‌های آزمایش می‌سازند. در لحظه اول، رزین از داخل محل تریق به شعاع R وارد قالب می‌شود. پس از گذشت زمان، رزین از داخل الیاف عبور کرده و آنها را خیس می‌کند. جبهه حرکت رزین در قطعه پیش شکل یافته غیرایزوتروپ به صورت یک بیضی است.

در روش RTM، ترکیب رزین و سایر پارامترهای ساخت طوری انتخاب می‌شوند که در مرحله اول قالب از رزین پر شود و پس از آن واکنش شیمیایی صورت پذیرد. از این رو، در تحلیل پرشدن قالب در روش RTM از معادله انرژی صرف نظر می‌شود و در واقع، تا لحظه پرشدن قالب به صورت فرایند همدم در نظر گرفته می‌شود.

حرکت رزین در داخل الیاف به کمک معادله داری، که بیانگر قانون اندازه حرکت برای حرکت سیال در اجسام متخلخل است، به صورت زیر بیان می‌شود [۲، ۱۷، ۱۸]:

$$\{U\} = - \frac{1}{\mu} [K] \nabla P \quad (1)$$

که در این معادله، $\{U\}$ بردار سرعت ظاهری بوده و در حالت دوبعدی دو مولفه U_x و U_y را داراست. μ گرانیوی سیال، $[K]$ تانسور نفوذپذیری صفحه‌ای و ∇P بردار گرادیان فشار است. تانسور نفوذپذیری صفحه‌ای به صورت زیر داده شده است:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$[K]$ برای محیطهای غیرایزوتروپ متقارن است $(K_{12} = K_{21})$ [۱۷].

پارامترهایی که برای ساخت یک قطعه با کیفیت مناسب در کمترین زمان ممکن باید مورد نظر قرار گرفته و بهینه شوند عبارتند از: محل تریق، محل تخلیه (vent) و فشار تریق [۶-۲]. از جمله پارامترهای دیگری که نقش اساسی در این فرایند دارند نوع قطعه پیش شکل یافته و چگونگی نفوذ رزین در داخل آن است. به عبارتی، ساختار قطعه پیش شکل یافته نقش اساسی در انتخاب محل تریق و محل تخلیه دارد.

برای تعیین محل تریق، محل تخلیه و فشار تریق سابقاً از روش آزمون و خطا استفاده می‌شد. این روش بسیار وقتگیر بود و در بسیاری از مواقع موجب آسیب دیدگی قالب می‌شد. استفاده از روشهای شبیه سازی در سالهای اخیر پیشنهاد شده است [۷-۱۳]. برای شبیه سازی از معادله داری جهت بیان حرکت رزین در داخل الیاف استفاده می‌شود. روش دیگری برای تعیین زمان پرشدن قالب و تعیین محل تخلیه ارائه شده است که بر اساس روابط هندسی استوار است [۱۴]. این روش از دقت کافی و سادگی کار بهره مند است. در همه روشهای ارائه شده داشتن اطلاعات دقیق در مورد چگونگی نفوذ رزین در الیاف لازم است. در این مقاله، هدف نحوه محاسبه نفوذپذیری الیاف کامپوزیتهاست. بیشتر الیاف و پارچه‌هایی که در RTM مورد استفاده قرار می‌گیرند به صورت صفحه‌اند. نفوذپذیری در چنین صفحاتی به دو قسمت، یکی نفوذپذیری عمود بر صفحه و دیگری نفوذپذیری در درون صفحه، تقسیم می‌شود. نفوذپذیری عمود بر صفحه مقدار ثابتی است و چون معمولاً قطعه پیش شکل یافته است از اهمیت کمی

است. همچنین، به دلیل نبود دیواره‌های کناری قالب در جریان رزین، اثر لبه‌های قالب در این روش حذف می‌شود. سه حالت رفتار ایزوتروپ، ارتوتروپ و غیرایزوتروپ بررسی می‌شود. روش انجام آزمایش براساس ثابت نگهداشتن فشار تریق است.

نمونه ایزوتروپ

فشار تریق در این نوع قالب در همه مراحل تریق ثابت نگهداشته می‌شود. جبهه جریان رزین در نمونه‌های ایزوتروپ یک دایره است (شکل ۲). برای پارچه‌ای با رفتار ایزوتروپ ماتریس نفوذپذیری صفحه‌ای (P) بصورت زیر خواهد بود:

$$[K] = K \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

معادله حاکم (P) با در نظر گرفتن معادله ۶ به شکل معادله لاپلاس در خواهد آمد:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} = 0 \quad (7)$$

با توجه به شکل جریان رزین، استفاده از شکل این معادله در دستگاه قطبی آسانتر است، پس:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta p}{\delta r} = 0 \quad (8)$$

حل معادله ۸، توزیع فشار از لبه آزاد تا محل تریق رزین را در داخل قطعه پیش شکل یافته نتیجه می‌دهد. برای حل معادله شرایط مرزی لازم است. این شرایط برای تریق با فشار ثابت عبارت است از:

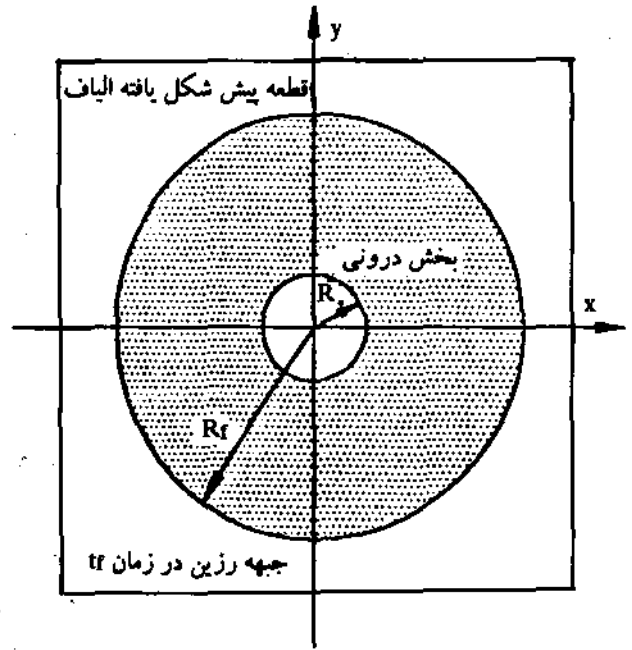
$$\begin{aligned} r=R_0 \text{ در } P=P_0 \\ r=R_f \text{ در } P=0 \end{aligned} \quad (9)$$

که در این معادله R_0 شعاع محل تریق و R_f شعاع جبهه جریان در زمان t_f است. نتیجه حل معادله ۸ در شرایط مرزی ۹ از این قرار است:

$$\left(\frac{dp}{dr}\right)_r = -\frac{P_0}{r \ln(R_f/R_0)} \quad (10)$$

و با انتگرال‌گیری مجدد خواهیم داشت [۱۹]:

$$\frac{P}{P_0} = 1 - \frac{\ln(r/R_0)}{\ln(R_f/R_0)} \quad (11)$$



شکل ۲ - جبهه حرکت رزین در قطعه پیش شکل یافته ایزوتروپ.

سیال (رزین) یک ماده تراکم‌ناپذیر است. معادله بقای (پایستگی) جرم برای ماده تراکم‌ناپذیر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla U = 0 \quad (3)$$

با جایگزین کردن معادله اندازه حرکت (۱) در معادله بقای جرم (۳) و فرض ثابت بودن گرادیان (فرض همدم بودن و عدم وجود واکنش تا لحظه پر شدن قالب) خواهیم داشت:

$$\nabla([K]\nabla P) = 0 \quad (4)$$

معادله ۴، معادله اساسی در تعیین ضریب نفوذ رزین و همچنین معادله اساسی برای شبیه‌سازی حرکت رزین در داخل الیاف است. نکته قابل توجه این است که سرعت واقعی از معادله زیر محاسبه می‌شود (۱۷):

$$V_f = \left(\frac{dr}{dt}\right)_r = (U/\epsilon)_f \quad (5)$$

که ϵ بیانگر میزان تخلخل یا فضای خالی در داخل الیاف است. در تحلیل دوبعدی، پارچه خشک در داخل قالب قرار می‌گیرد و رزین از یک سوراخ در وسط پارچه به داخل آن تریق می‌شود (شکل ۱). جریان رزین در این حالت دو بعدی است و امتیاز این روش محاسبه مولفه‌های تانسور نفوذپذیری در دو جهت، انجام یک آزمایش

نمونه ارتوتروپ

جبهه جریان رزین در نمونه‌های ارتوتروپ یک بیضی است (شکل ۳). در نمونه ارتوتروپ محورهای اصلی بیضی منطبق بر محورهای آزمایش‌اند. تانسور نفوذپذیری صفحه‌ای به صورت زیر خواهد بود:

$$[K] = K_x \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

معادله ۴ به شکل زیر خواهد بود:

$$K_x \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} + K_y \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} = 0 \quad (16)$$

این معادله را می‌توان با تغییر متغیر به شکل سیستم ایزوتروپ معادل، که همان معادله لاپلاس است، تبدیل کرد [۱۷]. روابط مهم در این انتقال عبارتند از [۱۷]:

$$Y = \left(\frac{K_y}{K_x}\right)^{1/2} x \quad (17)$$

$$K_c = (K_x K_y)^{1/2} \quad (18)$$

$$X_c = \left(\frac{K_y}{K_x}\right)^{1/2} x \quad (19)$$

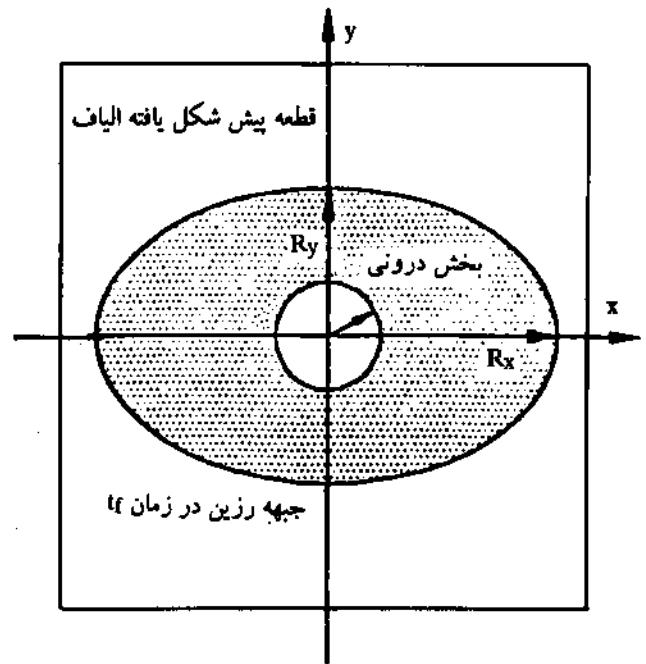
$$Y_c = \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^{1/2} y \quad (20)$$

معادله ۱۶ در انتقال‌های داده شده در معادله‌های ۱۸ تا ۲۰ به شکل معادله لاپلاس (۷) در سیستم مختصات جدید (X_c, Y_c) تبدیل خواهد شد. در این سیستم جدید می‌توان از روابط بسط یافته برای پارچه ایزوتروپ استفاده کرد.

روش استفاده از معادله‌های یاد شده برای محاسبه مقادیر K_x و K_y به صورت زیر است:

۱- با انجام آزمایش در زمانهای مختلف (t_f) ، دو فاصله پیشروی رزین در امتداد قطر بزرگ بیضی (R_x) و در امتداد قطر کوچک بیضی (R_y) در هر زمان اندازه‌گیری می‌شود. نقاط روی یک نمودار، بطوری که محور افقی نشان دهنده R_x و محور عمودی بیانگر R_y باشد، نشان داده می‌شود و سپس، خط راستی از میان نقاط و مبدا مختصات (به روشهای عددی یا هندسی) رسم می‌گردد. با توجه به معادله ۱۷ می‌توان دید که شیب این خط عبارت است از:

$$m_1 = \left(\frac{K_y}{K_x}\right)^{1/2} \quad (21)$$



شکل ۳- جبهه حرکت رزین در قطعه پیش‌شکل یافته ارتوتروپ.

معادله ۱۱ توزیع فشار در داخل قطعه پیش شکل یافته را نشان می‌دهد. با ترکیب معادله‌های ۱، ۵ و ۱۰ خواهیم داشت:

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{U_f}{e} = \frac{K P_c}{\epsilon \mu R_f \ln(R_f/R_c)} \quad (12)$$

برای بدست آوردن معادله نهایی از معادله ۲ انتگرال‌گیری می‌شود که نتیجه به صورت زیر است [۱۸، ۱۹]:

$$F = R_f^2 \left[2 \ln\left(\frac{R_f}{R_c}\right) + \left(\frac{R_f}{R_c}\right)^2 - 1 \right] = \frac{4 K P_c}{\epsilon \mu} t_f \quad (13)$$

این معادله رابطه بین زمان (t_f) و شعاع جبهه جریان (R_f) را مشخص می‌کند. در این آزمایش مقادیر R_c ، μ ، ϵ و P_c معلومند. برای تعیین نفوذپذیری (K) ، زمان لازم جهت رسیدن جبهه جریان به فاصله R_f اندازه‌گیری می‌شود و سپس، با استفاده از معادله ۱۳ نفوذپذیری محاسبه می‌گردد. در صورتی که جبهه جریان در زمانهای مختلف اندازه‌گیری شود، نقاط حاصل روی یک نمودار، که محور افقی آن زمان و محور عمودی آن جمله سمت چپ معادله ۱۳ یعنی F است، مشخص می‌شود و خط راستی از میان نقاط و مبدا مختصات رسم می‌گردد. با استفاده از شیب خط m و معادله ۱۳، نفوذپذیری از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$m = \frac{4 K P_c}{\epsilon \mu} \quad (14)$$

برای ماده ارتوتروپ صادق است. با استفاده از این معادله‌های دو مقدار K_x و K_y محاسبه می‌گردد. سپس، از طریق انتقال با فرض بزرگتر بودن K_x ، مولفه‌های تانسور نفوذپذیری در امتداد ۱-۲ به صورت زیر حاصل خواهد شد [۱۷، ۱۸]:

$$K_{11} = \frac{(K_x + K_y)}{4} + \frac{(K_x - K_y)}{4} \cos 2\theta \quad (29)$$

$$K_{22} = \frac{(K_x + K_y)}{4} - \frac{(K_x - K_y)}{4} \cos 2\theta \quad (30)$$

$$K_{12} = \frac{(K_x - K_y)}{4} \sin 2\theta \quad (31)$$

تجربی

الیاف شیشه از مهمترین الیافی است که در صنعت کامپوزیتها، بویژه در صنایع خودروسازی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این الیاف به شکل نمد، پارچه‌های بافته شده دو جهتی و پارچه‌های تک جهتی استفاده می‌شود. از سه نوع پارچه موجود جهت آزمایش و تعیین نفوذپذیری استفاده شده است. پارچه اول از نوع نمدی بوده و چون بیشترین کاربرد را دارد، نفوذپذیری آن در شرایط متفاوت از جمله مقادیر مختلف تخلخل و فشارهای مختلف بررسی شده است. پارچه دوم از نوع بافته شده معمولی و فشرده بوده که در هر سانتی‌متر آن ده نخ موجود است. پارچه نوع سوم از نوع بافته شده با مشخصه هارنس ۵ است که در هر سانتی‌متر آن هفده نخ وجود دارد. رفتار این پارچه از جهت نفوذ رزین، رفتاری غیرایزوتروپ است. مشخصات پارچه‌های آزمایش شده در جدول ۱ ارائه شده است. مقادیر داده شده، مقادیر متوسط اندازه‌گیریهای مختلف است.

چگالی سطح (G) عبارت از وزن پارچه به ازای واحد سطح است و معمولاً جهت شناسایی پارچه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نفوذپذیری بیانگر سرعت نفوذ سیال در داخل جسم متخلخل (پارچه) است. از این رو، جهت بدست آوردن آن باید از سیال استفاده کرد. استفاده از رزین به دلیل مشکلات کار با آن و همچنین دربرداشتن هزینه معمولاً توصیه نمی‌شود. در عمل از روغنهای گرانترو مانند روغن موتور خودرو برای انجام آزمایش نفوذپذیری استفاده می‌شود. روغن

جدول ۱ - مشخصات پارچه‌های مختلف آزمایش شده.

نوع پارچه	تعداد نخ در سانتی‌متر	ζ (kg/m ²)
نمد	-	۰/۴۵
دوجتهی معمولی	ده	۰/۲۲
دوجتهی هارنس ۵	هفده	۰/۳۲۵

۲. فواصل R_x (معادله ۱۹) و زمان t_c به سیستم مختصات جدید منتقل می‌شود. در این صورت، خواهیم داشت:

$$t_{fc} = t_f \quad (22)$$

$$R_{xc} = \left(\frac{K_y}{K_x}\right)^{1/4} R_x = (m_1)^{1/4} R_x \quad (23)$$

$$R_{yc} = \left(\frac{K_x}{K_y}\right)^{1/4} R_y = (m_1)^{1/4} R_y \quad (24)$$

سیستم مختصات جدید، سیستم ایزوتروپ معادل است. لذا از معادله‌های قسمت ایزوتروپ در این سیستم می‌توان استفاده کرد. معادله ۱۳ در سیستم مختصات جدید معتبر است و به صورت زیر از آن استفاده می‌شود:

$$F_c = R_{xc}^2 \left[2 \ln \left(\frac{R_{xc}}{R_{yc}} \right) + \left(\frac{R_{yc}}{R_{xc}} \right)^2 - 1 \right] = \frac{\nu K_c P_c}{\epsilon \mu} t_{fc} \quad (25)$$

با استفاده از نتایج آزمایش و معادله‌های ۲۲ تا ۲۴، یک نمودار رسم می‌شود، بطوری که محور افقی آن بیانگر زمان t_{fc} و محور عمودی آن نشان دهنده سمت چپ معادله ۲۵ باشد. سپس، خط راستی از میان نقاط و مبدا مختصات رسم می‌گردد. شیب این خط m_1 اندازه‌گیری می‌شود. این شیب با توجه به معادله ۲۵ برابر است با:

$$m_1 = \frac{\nu K_c P_c}{\epsilon \mu} \quad (26)$$

که با استفاده از معادله ۲۶ مقدار K_c محاسبه می‌گردد.

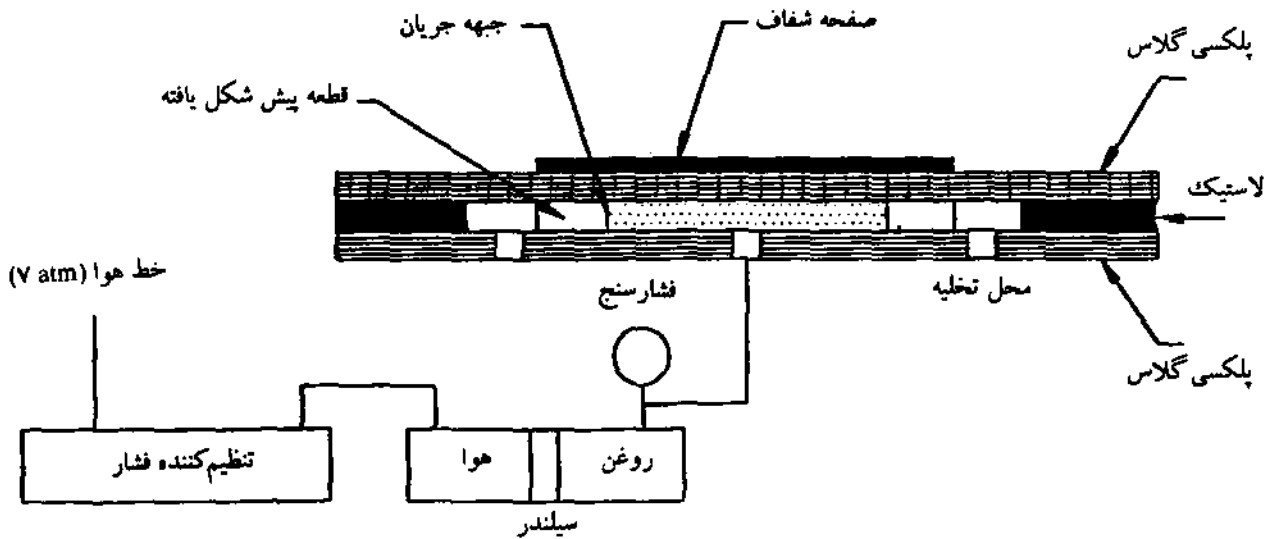
۳- از مرحله اول مقدار m_1 و از مرحله دوم مقدار K_c بدست می‌آید. با توجه به معادله‌های ۱۸ و ۲۱ می‌توان مقادیر K_x و K_y را محاسبه کرد:

$$K_x = \frac{K_c}{m_1} \quad (27)$$

$$K_y = m_1 K_c \quad (28)$$

نمونه غیرایزوتروپ

حالت غیرایزوتروپ در شکل ۱ نشان داده شده است. حرکت رزین در امتداد محورهای اصلی تانسور نفوذپذیری به شکل بیضی است، اما محورهای اصلی با محورهای اندازه‌گیری زاویه θ می‌سازند. تانسور نفوذپذیری برای نمونه غیرایزوتروپ به شکل معادله ۲ به گونه‌ای است که کلیه ضرایب K_{11} و K_{22} و K_{12} غیر صفرند. در امتداد محورهای اصلی تانسور نفوذپذیری (قطرهای اصلی بیضی)، معادله‌های یاد شده



شکل ۴ - مجموعه مورد استفاده جهت تعیین نفوذپذیری دوبعدی.

حفره‌ای مستطیلی به ابعاد 20×30 mm در وسط آن ایجاد گردید. سپس، این صفحات روی صفحه پایینی پلکسی گلاس طوری قرار داده شد، که سوراخهای تخلیه دیده شوند. پس از قرار دادن پارچه‌های تهیه شده در داخل این حفره صفحه شبکه‌بندی شده بالایی روی آن قرار داده شد. برای مقابله با فشار روغن تزریقی مهار مجموعه قالب لازم است. از گیره‌های C شکل برای بستن مجموعه استفاده شد.

مجموعه تزریق رزین با فشار ثابت متشکل از یک سیلندر بادی از شرکت پارس (۱۵۰-۲۵-۷۵-PC) و یک سیستم فشارشکن بادی است. از سیلندر بادی برای پمپ کردن استفاده شد. یک طرف سیلندر از راه سیستم فشارشکن به خط انتقال فشار متصل گردید. در طرف دیگر سیلندر با استفاده از قیفی پر شده از روغن و با استفاده از ضربات کوتاه به میله سیلندر بادی هواگیری اولیه به عمل آمد. سپس، یک فشارسنج به محل تخلیه روغن متصل شد و با اتصال هوا به قسمت دیگر سیلندر، هواگیری نهایی نیز انجام شد. پس از آن، لوله تخلیه به محل ورودی رزین روی صفحه پلکسی گلاس متصل گردید. با استفاده از فشارسنج، فشار تزریق در همه مراحل کنترل شد. در همه آزمایشها فشار تزریق، همان گونه که انتظار می‌رفت، ثابت بود.

روش آزمایش از این قرار است که پس از آماده‌سازی قالب و مجموعه تزریق، برای تامین فشار هوا این سیستم به سیلندر متصل می‌شود. در همین لحظه برای ثبت زمان، یک زمان‌سنج از نوع سیکو روشن می‌شود. جبهه جریان در فواصل مختلف با استفاده از صفحه پلکسی گلاس مدرج مشخص می‌شود و زمان رسیدن جبهه رزین به فاصله موردنظر نیز به کمک زمان‌سنج ثبت می‌شود. با استفاده از زمان ثبت شده و فاصله طی شده و سایر پارامترها،

مورد استفاده در این آزمایش روغن موتور پارس-سوپر کیان ۳۰ است. گرانیوی این روغن با توجه به مقادیر بدست آمده از شرکت سازنده و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده، با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{E}{T}\right) \quad (32)$$

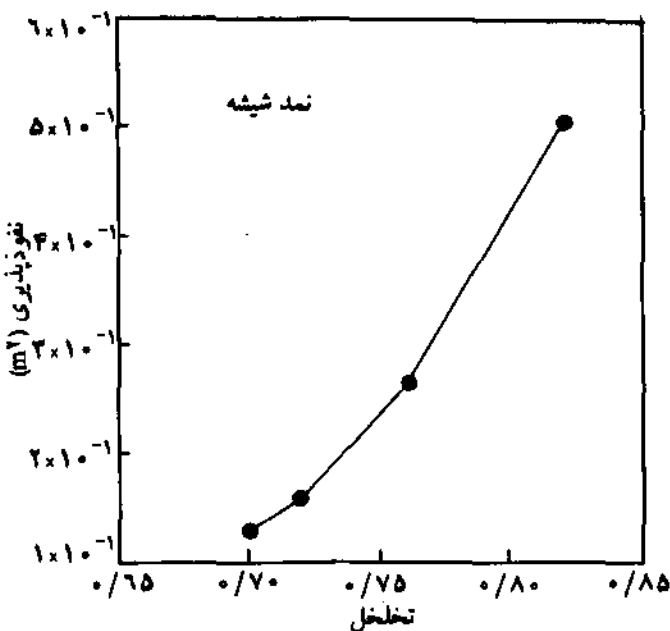
که در این معادله μ گرانیوی روغن برحسب Pa.s، T دما برحسب درجه K است. همچنین، در این معادله $\mu_0 = 8/2 \times 10^{-8}$ و $E = 4/45 \times 10^{-3}$ است [۱۹].

دو روش تزریق با فشار ثابت و تزریق با دبی ثابت برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بکار گرفته می‌شود. با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه روش تزریق با فشار ثابت در این مطالعه بکار شده است. مجموعه مورد استفاده در شکل ۴ نشان داده شده است. این نوع مجموعه برای تحلیل و آزمایش دوبعدی صفحه‌ای بکار می‌رود. این مجموعه متشکل از دو صفحه شفاف پلکسی گلاس به ابعاد 45×45 cm بوده و ضخامت هر صفحه نیز ۱ cm است. روی صفحه بالایی با استفاده از مازیک خطوطی عمود برهم به فاصله ۱ cm از یکدیگر رسم گردید. از شبکه ایجاد شده با خطوط، برای اندازه‌گیری جبهه جریان استفاده شد. روی صفحه پایینی نیز یک سوراخ در وسط صفحه جهت تزریق رزین و دو سوراخ نیز برای تخلیه ایجاد گردید. معمولاً، برای ایجاد حفره قالب از لاستیک به ضخامتهای مختلف استفاده می‌شود. در این آزمایش از لاستیکی با ضخامتهای ۳ و ۵ mm استفاده شد. از هر لاستیک قطعه‌ای به ابعاد 45×45 cm تهیه شد و

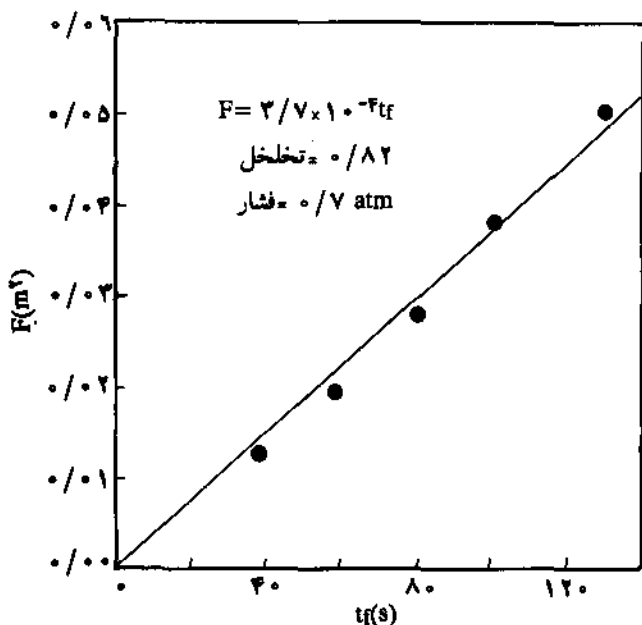
همان‌گونه که ذکر شد، برای هر حالت t_f بر حسب F (معادله ۱۳) رسم شد تا شیب m بدست آید. شکل ۵ نتایج حاصل را برای حالتی نشان می‌دهد که تخلخل برابر با 0.82 است. با دانستن شیب m و معادله ۱۴ نفوذپذیری محاسبه گردید. برای محاسبه K مقادیر $P_0 = 0.7 \text{ atm} = 7 \times 10^4 \text{ Pa}$ و $\mu = 0.47 \text{ Pa.s}$ مورد نظر گرفته شد. چگونگی تغییرات نفوذپذیری بر حسب تخلخل در شکل ۶ نشان داده شده است. با کاهش تخلخل، به دلیل اینکه فضای خالی کمتری برای حرکت رزین موجود است، یا به عبارتی مقدار بیشتری از الیاف وجود دارند و در مقابل حرکت رزین مقاومت می‌کنند، سرعت نفوذ کاهش می‌یابد.

برای بررسی اثر فشار، سه آزمایش در فشارهای مختلف صورت گرفت. در هر سه آزمایش $\epsilon = 0.76$ و دما نیز برابر 13°C بود. مانند حالت قبل t_f بر حسب F برای فشارهای مختلف رسم شد تا شیب m بدست آید. نمودار ۷ نشان دهنده نفوذپذیری بر حسب فشار تریق است. بنظر می‌رسد که در محدوده فشار مورد آزمایش تغییرات عمده‌ای در نفوذپذیری رخ نمی‌دهد و می‌توان گفت که در این محدوده فشار، نفوذپذیری مستقل از فشار تریق است.

پارچه دوجبهتی معمولی با تعداد ده نخ در سانتی‌متر در آزمایش بعدی بکار گرفته شد. در این آزمایش پارچه مستقیماً بدون هیچ لاستیکی در صفحه پلکسی گلاس قرار داده شد. دولایه از پارچه مزبور به صفحات نهایی 0.3 mm مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به معادله ۲۲ مقدار تخلخل برابر با 0.43 است. در این آزمایش، فشار تریق برابر 0.7 atm و دما برابر 13°C بود. با قرار دادن یک



شکل ۶ - نحوه تغییرات نفوذپذیری بر حسب تخلخل.



شکل ۵ - تغییرات t_f بر حسب F برای پارچه نمادی ($\epsilon = 0.82$).

نفوذپذیری محاسبه می‌شود.

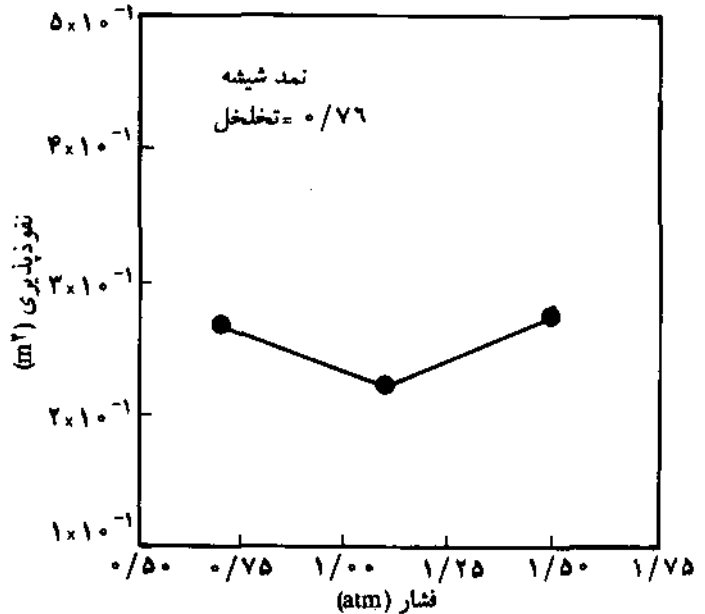
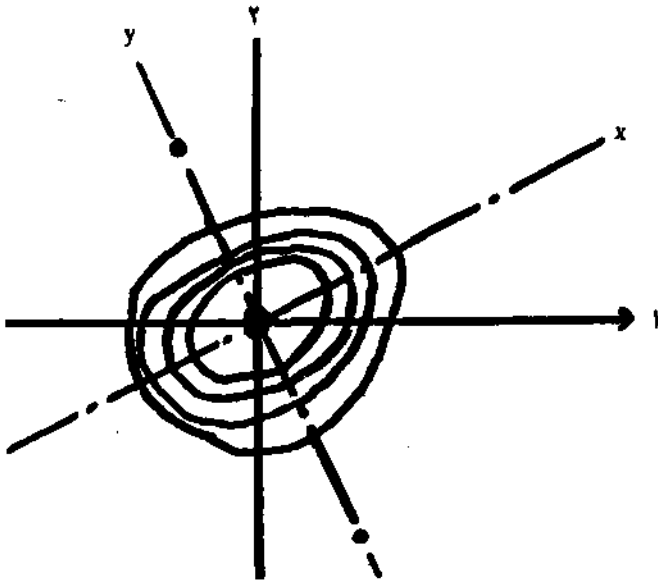
نتایج و بحث

نفوذپذیری نمدها، که بیشترین استفاده را در روش RTM دارد، بررسی شد و نقش دو عامل، یکی تخلخل و دیگری فشار تریق، مطالعه گردید. با تغییر تعداد لایه‌های قرار داده شده در قالب و ایجاد تخلخلهای متفاوت نقش تخلخل بررسی شد. اگر n تعداد لایه‌های نمدها، چگالی سطحی، t ضخامت حفره قالب (ضخامت لاستیک مورد استفاده) و ρ_f چگالی الیاف باشد، مقدار تخلخل از معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\epsilon = 1 - \frac{n t \rho_f}{\rho_f} \quad (22)$$

در محاسبات، چگالی الیاف با توجه به مقدار متعارف گزارش شده در مقالات [۱۸-۱۵] برابر با $2/56 \text{ g/mL}$ در نظر گرفته شد. چهار حالت آزمایش شد و در همه حالتها از پارچه‌های نمدها بریده شده به ابعاد $20 \times 20 \text{ cm}$ استفاده شد. در وسط لایه‌ها سوراخی به قطر 5 mm جهت ورود رزین ایجاد گردید.

در همه آزمایشهای پارچه نمدها، $R_0 = 2/5 \text{ mm}$ ، $T = 13^\circ\text{C}$ و $P_0 = 0.7 \text{ atm}$ بود. جبهه حرکت رزین در همه آزمایشها تقریباً روی یک دایره قرار داشت که حاکی از رفتار ایزوتروپ پارچه‌های نمدها است. زمان لازم (t_f) جهت رسیدن جبهه جریان به شعاع ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ cm ثبت شد [۱۹].



شکل ۸- جبهه جریان رزین در پارچه بافته شده هارنس ۵ در زمانهای ۳۷۰، ۷۲۰، ۱۱۰۰ و ۱۸۰۰ s.

شکل ۷- نحوه تغییرات نفوذپذیری بر حسب فشار تزریق.

زمانهای مختلف داده شده است. مطابق روش یاد شده، نمودار ۹، که بیانگر R_x بر حسب R_y است، رسم شد و مقدار شیب m_1 برابر $0/665$ بدست آمد. با استفاده از معادله‌های ۲۲ و ۲۴ مقادیر R_x و R_y سیستم ایزوتروپ معادل محاسبه شد. سپس، با استفاده از معادله ۲۵ مقادیر F_e نیز محاسبه گردید. جدول ۳ مقادیر محاسبه شده را نشان می‌دهد.

صفحه شفاف روی صفحه پلکسی گلاس جبهه جریان در زمانهای مختلف با استفاده از مازیک رسم گردید. جبهه جریان طی آزمایش تقریباً روی یک دایره قرار داشت. جریان سیال در این پارچه شکل ایزوتروپ دارد [۱۹].

شیب m_1 از نمودار ۱۰، که بیانگر F_e بر حسب t_f است، محاسبه شد و مقدار حاصل برابر $8/2 \times 10^{-7} m^2/s$ است. با استفاده از معادله ۲۶، نفوذپذیری K_e محاسبه شد. مقدار نفوذپذیری برابر m^2 $3/5 \times 10^{-13}$ است. با استفاده از معادله‌های ۲۷ و ۲۸ مقادیر نفوذپذیری در جهات اصلی به دست آمد:

تغییرات F بر حسب t_f رسم شد و شیب حاصل برابر برای m^2/s $2/22 \times 10^{-6}$ بدست آمد. با توجه به معادله ۱۴ $K=8/1 \times 10^{-13} m^2$ است. کوچک بودن K به دلیل فشردگی الیاف (کم بودن تخلخل) و در نتیجه مقاومت در برابر حرکت رزین است.

$$K_x = 5/3 \times 10^{-13} m^2$$

$$K_y = 2/28 \times 10^{-13} m^2$$

آخرین آزمایش روی پارچه بافته شده هارنس ۵ صورت گرفت. جبهه جریان با استفاده از صفحه شفاف در زمانهای مختلف ثبت گردید (شکل ۸). حرکت در داخل الیاف به صورت بیضی است که محورهای اصلی آن نیز با محورهای آزمایش زاویه θ می‌سازد و بیانگر رفتار غیر ایزوتروپ این نوع پارچه است. برای محاسبه مولفه‌های تانسور نفوذپذیری مانند آزمایشهای قبلی عمل شد. در آزمایشها $d=2/5 mm$ و $\epsilon=0/49$ و $T=13^\circ C$ ، $P_0=1/3 atm$ بود.

مقادیر مولفه‌های تانسور نفوذپذیری در جهات آزمایشگاهی ۱-۲ از

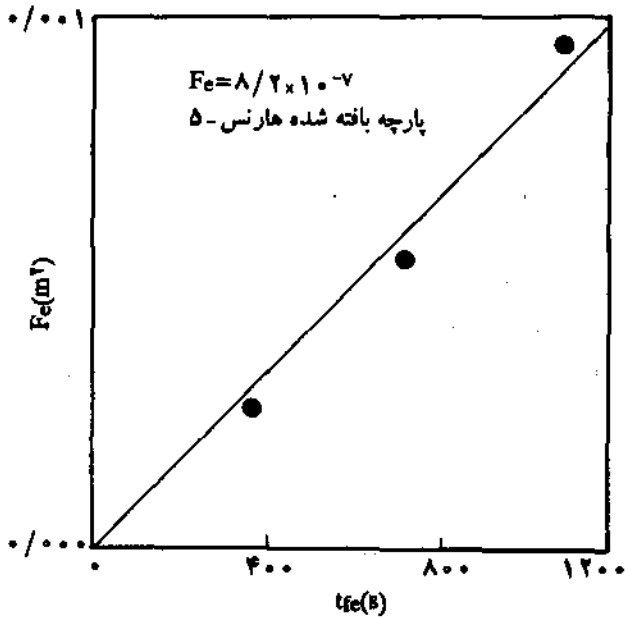
در جدول ۲ مقادیر پیشروی در جهات اصلی x و y برای

جدول ۳- پیشروی جریان بر حسب زمان در سیستم ایزوتروپ معادل.

جدول ۲- پیشروی رزین در امتداد محورهای اصلی در زمانهای مختلف.

$F_e(m^2)$	$R_x(m)$	$t_f(s)$
$2/6 \times 10^{-4}$	1/06	370
$5/45 \times 10^{-4}$	1/287	720
$9/5 \times 10^{-4}$	1/713	1100

$R_y(cm)$	$R_x(cm)$	$t_f(s)$
0/9	1/3	370
1/1	1/7	720
1/4	2/1	1100



شکل ۱۰ - تغییرات t_{fe} بر حسب F_e برای پارچه بافته شده هارنس ۵.

ثابتی از قالب است که در نتیجه، مقاومت بیشتری در برابر حرکت رزین دارند. در یک تخلخل ثابت، اثر فشار بر نفوذپذیری بررسی شد. نتایج حاصل بیانگر این است که در محدوده فشار اعمالی، میزان نفوذپذیری تقریباً ثابت می‌ماند.

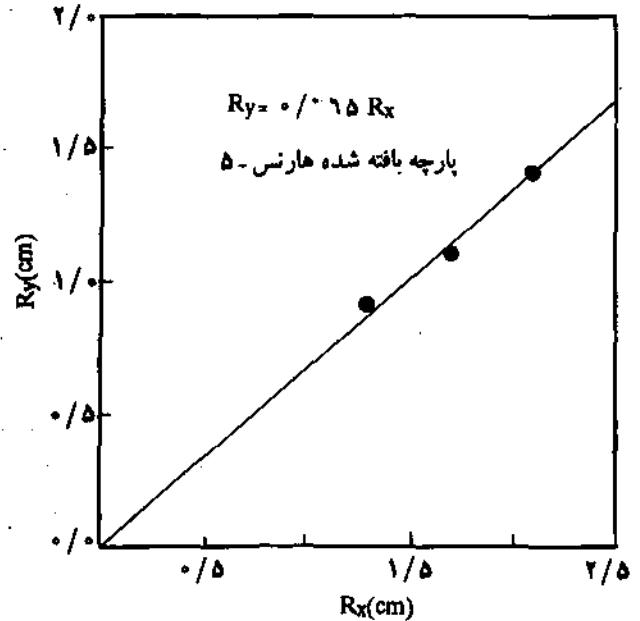
یک نوع پارچه بافته شده معمولی نیز بررسی شد. نتایج آزمایش بیانگر رفتار ایزوتروپ این پارچه از نقطه نظر حرکت رزین در داخل آن است. جبهه جریان روی یک دایره حرکت می‌کند. پارچه بافته شده هارنس ۵ آزمایش شد و رفتار غیرایزوتروپ برای حرکت رزین در داخل آن مشاهده شد. جبهه حرکت رزین در این نوع پارچه روی یک بیضی قرار داشت که محورهای آن با محورهای آزمایش دارای زاویه بود. مولفه‌های نفوذپذیری برای این نوع پارچه محاسبه شد.

قدردانی

بدین وسیله از آقای مهندس مسعود دانایی مقدم مدیر عامل محترم مرکز تحقیقات و نوآوری صنایع خودرو و همچنین، آقایان علی منیبی و مهندس ناصر آقامحمدی جهت پشتیبانی از واحد کامپوزیت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

1. Mallik P. K. and Newman S.; Composite Materials Technology Hanser, Munich, 1990.
2. Young W. B. et al.; Analysis of Resin Injection Molding in



شکل ۹ - تغییرات R_x بر حسب R_y برای پارچه بافته شده هارنس ۵.

معادله‌های ۲۹-۳۱ محاسبه شد. زاویه θ از روی شکل ۸ بدست آمد و برابر $\theta = 26/5^\circ$ است. بنابراین، خواهیم داشت:

$$K_{11} = 4/716 \times 10^{-12} \text{ m}^2$$

$$K_{22} = 2/964 \times 10^{-12} \text{ m}^2$$

$$K_{12} = 1/168 \times 10^{-12} \text{ m}^2$$

نتیجه‌گیری

نفوذپذیری الیاف سه نوع پارچه بررسی شد. در آغاز با استفاده از معادله داری که بیانگر نفوذ سیال گرانرو در داخل اجسام متخلخل است، نظریه مربوط بسط یافت. روش تریق با فشار ثابت بررسی شد و معادله‌های مورد نیاز برای محاسبه نفوذپذیری بسط داده شد. حرکت رزین در داخل الیاف برای سه حالت ایزوتروپ، ارتوتروپ و غیرایزوتروپ بررسی شد. در حالت ایزوتروپ، جبهه جریان روی یک دایره قرار دارد. حرکت جبهه رزین روی یک بیضی از خصوصیات رفتار غیرایزوتروپ پارچه‌هاست. اگر محورهای اصلی بیضی تشکیل یافته منطبق بر محورهای آزمایش باشد، رفتار پارچه ارتوتروپ است.

از روش تریق با فشار ثابت، نفوذپذیری سه نوع پارچه بررسی شد. پارچه‌های نمدی مهمترین نوع پارچه مورد استفاده در صنعت RTM است. نفوذپذیری پارچه‌های نمدی برای تخلخلهای مختلف بررسی گردید. نتایج آزمایش بیانگر کاهش نفوذپذیری با کاهش مقدار تخلخل است. دلیل این امر وجود بیشتر الیاف در حجم

- Polymer Filling of Molds; *Polym. Eng. and Sci.*; **35**, 22, 1758-65; 1995.
13. Friedrichs B. and Guceri S. I.; A Hybrid Numerical Technique to Model 3-D Flow Fields in Resin Transfer Molding Processes; *Polym. Eng. Sci.*; **35**, 23, 1834-51, 1995.
 14. Boccard A., Lee W. I. and Springer G. S.; Model of Determining the Vent Location and the Fill Time of Resin Transfer Molds; *J. Comp. Mater.*; **29**, 3, 306-33, 1995.
 15. Trevino L. et al.; Analysis of Resin Injection Molding in Molds with Preplaced Fiber Mats. I: Permeability and Compressibility Measurements; *Polym. Comp.*; **12**, 1, 20-29, 1991.
 16. Ahn K. J. and Seferis J. C.; Simultaneous Measurements of Permeability and Capillary Pressure of Thermosetting Matrices in Woven Fabric Reinforcements; *Polym. Comp.*; **12**, 3, 146-52, 1991.
 17. Chan A. W. and Hwang S. T.; Anisotropic In-plane Permeability of Fabric Media; *Polym. Eng. Sci.*; **31**, 16, 1233-39, 1991.
 18. Chan A. W., Larive D. E. and Morgan R. J.; Anisotropic Permeability of Fiber Perform: Constant Flow Rate Measurement; *J. Comp. Mater.*; **27**, 10, 996-1009, 1993.
 - ۱۹ - حاجتی مهدی، قابلیت نفوذ در پارچه‌های مختلف مورد استفاده در ساخت قطعات کامپوزیتی به روش RTM، گزارش داخلی کد ۱۶۸-Q-I-RP، مرکز تحقیقات و نوآوری صنایع خودرو، تهران، دی‌ماه ۱۳۷۶.
 - Molds with Preplaced Fiber Mats II: Numerical Simulation and Experiments of Mold Filling; *Polym. Comp.*; **12**, 1, 30-8, 1991.
 3. Han K. and Lee L. J.; Dry Spots Formation and Changes in Liquid Composite Molding I: Experimental; *J. Comp. Mater.*; **30**, 13, 1458-74, 1996.
 4. Ibid, 1475-93, 1996.
 5. Yu H. W. and Young W. B.; Optimal Design of Process Parameters for Resin Transfer Molding; *J. Comp. Mater.*; **31**, 11, 1113-40, 1997.
 6. Chen Y. F., Stelson K. A. and Voller V. R.; Prediction of Filling Time and Vent Locations for Resin Transfer Molds; *J. Comp. Mater.*; **31**, 11, 1141-61, 1992.
 7. Young W. B. et al.; Flow Simulation in Molds With Preplaced Fiber Mats; *Polym. Comp.*; **12**, 6, 391-403, 1991.
 8. Aoyagi H., Uenoyama M. and Guceri S. I.; Analysis and Simulation of Structural Reaction Injection Molding (SRIM); *Inter. Polym. Proc.*; **VII**, 71-83, 1992.
 9. Wymer S. A. and Engel R. S.; A Numerical Study of Nonisothermal Resin Flow in RTM with Heated Uniaxial Fibers; *J. Comp. Mater.*; **28**, 1, 53-65, 1994.
 10. Cai Z.; Analysis of the Non-viscous Flow Effect in Liquid Molding Process; *J. Comp. Mater.*; **29**, 2, 257-78, 1995.
 11. Wu C. J. and Houang L. W.; Permeable Boundary Condition for Numerical Simulation in Resin Transfer Molding; *Polym. Eng. Sci.*; **35**, 16, 1272-81, 1995.
 12. Voller V. R. and Peng S.; An Algorithm for Analysis of