



طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری هم‌زمان تراوایی درون صفحه و رفتار تراکمی بستر الیاف

مصطفی نصیری، علی عابدیان*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Abedian@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۶ اسفند ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

اندازه‌گیری تراوایی

رفتار تراکمی بستر الیاف

تزریق رزین به کمک خلأ

تراوایی اشباع

چکیده

یکی از فرایندهای مورد توجه در ساخت سازه‌های کامپوزیتی بزرگ با اشکال پیچیده، روش تزریق رزین به کمک خلأ است. در این فرایند پیش شکل متشکل از پارچه‌های تقویت‌کننده درون قالبی که یک طرف آن صلب و طرف دیگر آن پلاستیک منعطف است، قرار داده می‌شود. سپس رزین به کمک خلأ از طریق نقاط ورودی به درون پیش شکل تزریق می‌شود به طوری که تمام نقاط بستر الیاف از رزین اشباع شوند. موفقیت این فرایند مستلزم آن است که تمام نقاط بستر خشک الیاف از رزین اشباع شوند و نقاط خشکی باقی نماند. برای شبیه‌سازی عددی فرایند تزریق رزین به کمک خلأ نیاز به تعیین دو مشخصه بستر الیاف مورد نظر به صورت آزمایشگاهی وجود دارد. یکی از این مشخصه‌ها تراوایی بستر الیاف در جهات مختلف است که در واقع بیانگر راحتی حرکت رزین در بستر الیاف در جهات مختلف است. تراوایی بستر الیاف علاوه بر نوع الیاف، نحوه بافت و نحوه قرارگیری پارچه‌ها بر روی هم، تابعی از کسر حجمی الیاف نیز می‌باشد. مشخصه دیگر، رفتار تراکمی بستر الیاف در جهت ضخامت است. در پژوهش حاضر یک دستگاه برای اندازه‌گیری هم‌زمان تراوایی و رفتار تراکمی بستر الیاف طراحی و ساخته شده است. همچنین تراوایی و رفتار تراکمی پیش شکل تخت متشکل از ۹ لایه پارچه شیشه بافته شده با چگالی سطحی ۴۰۰ گرم بر مترمربع اندازه‌گیری شده است. خروجی‌ها برای بستر الیاف مورد نظر شامل نمودارهای تراوایی اشباع بر حسب کسر حجمی الیاف و ضخامت بر حسب فشار تراکم است.

Design and development of a test apparatus for concurrent measurement of in-plane permeability and compaction behavior of fiber beds

Mostafa Nasiri, Ali Abedian*

Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: Abedian@sharif.edu

Article Information

Original Research Paper

Received: 16 March 2025

Accepted: 9 April 2025

Keywords:

Permeability Measurement

Compaction Behavior of Fiber Bed

Vacuum Infusion Process

Saturated Permeability

Abstract

The Vacuum Infusion (VI) process is an attractive method for manufacturing large composite structures with complex shapes. In this process, reinforcement fabrics are placed in a mold with one rigid and one flexible side. Resin is infused into the preform through inlet location (s) using a vacuum to ensure complete saturation of the fiber bed. After filling the mold and curing the laminate, the laminate is removed from the mold. Selecting appropriate resin inlet and outlet locations is crucial to prevent dry spots in the preform. Studying resin flow in the fiber bed using numerical simulations is vital for optimizing this parameter. Accurate numerical simulation of resin flow requires experimental characterization of the fiber bed's permeability and compaction behavior. Permeability, which indicates the ease of resin flow, varies in different fiber bed directions. In this study, a specially designed test apparatus measured both the permeability and compression behavior of the fiber bed simultaneously. The test was conducted on a flat preform composed of nine layers of 400 g/m² woven glass fabric. The results included two critical outputs: a graph showing permeability as a function of fiber volume fraction, and another graph illustrating fiber volume fraction relative to compression pressure. These findings can be used as inputs for the numerical simulation of resin flow in the selected flat preform.

Please cite this article using:

Nasiri M, Abedian A. Design and development of a test apparatus for concurrent measurement of in-plane permeability and compaction behavior of fiber beds. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 May 22;12(3):17-23. doi: 10.22034/ijme.2025.512292.2064 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

شبیه‌سازی فرایندهای قالب‌گیری کامپوزیت مایعی^۱ ابزار بسیار مفیدی برای طراحی قالب و فرایند قالب‌گیری سازه کامپوزیتی مورد نظر است. نقطه مشترک در همه فرایندهای قالب‌گیری کامپوزیت مایعی این است که بستر خشک لیاف (تقویت‌کننده) بایستی با تزریق رزین (با فشار مثبت یا منفی) کاملاً اشباع شده و ناحیه خشکی در لیاف باقی نماند. روش تزریق رزین به کمک خلأ^۲ یکی از روش‌های قالب‌گیری کامپوزیت مایعی است که در آن از فشار خلأ (فشار منفی) برای مکش رزین به درون قالب استفاده می‌شود. در این روش نیمه زیرین قالب صلب و نیمه بالایی قالب پلاستیک منعطف است. بنابراین با تغییر فشار رزین تزریق شده درون قالب، ضخامت چندلایه درون قالب می‌تواند تغییر کند. به منظور شبیه‌سازی این تغییر ضخامت در طول فرایند قالب‌گیری بایستی رفتار تراکمی بستر لیاف در جهت ضخامت مدل‌سازی شود. از طرفی نیاز است حرکت رزین در بستر لیاف خشک مدل‌سازی شود. عموماً حرکت رزین درون بستر لیاف با استفاده از رابطه داری مدل‌سازی می‌شود [۱]. یکی از پارامترهای رابطه داری، تراوایی بستر لیاف در جهات مختلف است که در واقع بیانگر راحتی حرکت رزین در بستر لیاف در جهات مختلف است. تراوایی بستر لیاف به دو صورت اشباع و غیر اشباع قابل اندازه‌گیری و بیان است. تراوایی اشباع در حالتی که بستر لیاف تماماً خیس است و تراوایی غیر اشباع در حین پر شدن بستر لیاف اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین در مقادیر تراوایی اشباع، مکانیسم تر شوندگی^۳ لیاف تأثیری ندارد. در مطالعه حاضر تراوایی اشباع مورد نظر است. تراوایی بستر لیاف علاوه بر نوع لیاف، نحوه بافت و نحوه قرارگیری پارچه‌ها بر روی هم، تابعی از کسر حجمی لیاف نیز هست. از طرفی تغییرات کسر حجمی لیاف تابعی از رفتار تراکمی لیاف در جهت ضخامت است. بنابراین برای شبیه‌سازی عددی فرایند تزریق رزین به کمک خلأ [۲] نیاز به تعیین دو مشخصه بستر لیاف مورد نظر به صورت آزمایشگاهی وجود دارد. یکی از این مشخصه‌ها تراوایی بستر لیاف در جهات مختلف و دیگری رفتار تراکمی لیاف در جهت ضخامت است. اندازه‌گیری تراوایی بستر لیاف به اشکال گوناگونی از جمله آزمایش‌های حرکت یک‌بعدی روغن در بستر لیاف [۳، ۴] حرکت دوبعدی (شعاعی) و حرکت سه‌بعدی صورت می‌گیرد. به طور کلی مقادیر اندازه‌گیری شده تراوایی برای یک بستر لیاف در یک آزمایشگاه مشخص دارای انحراف معیار زیادی است که با تغییر آزمایشگاه این پراکندگی بیشتر نیز می‌شود. این موضوع به دلیل استفاده از ابزارهای آزمایشگاهی مختلف، وابستگی به اپراتور، عدم قطعیت‌های موجود در پارچه‌ها، آماده‌سازی نمونه، اندازه‌گیری و غیره است. بنابراین تلاش‌های جمعی زیادی توسط مراکز آزمایشگاهی مختلف برای شناسایی این عوامل و استانداردسازی فرایند اندازه‌گیری تراوایی بستر لیاف صورت گرفته است [۵-۷].

در پژوهش حاضر، یک ابزار آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری هم‌زمان تراوایی درون صفحه و رفتار تراکمی بستر لیاف طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این ابزار، حرکت روغن در بستر لیاف به صورت یک‌بعدی ایجاد شده و با تغییر فشار در ورودی و خروجی روغن، تراوایی بستر لیاف در فشارهای مختلف و در نتیجه کسر حجمی‌های لیاف مختلف اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه این امکان را می‌دهد که با انجام صرفاً یک آزمایش، مقادیر تراوایی اشباع در کسر حجمی‌های لیاف مختلف و همچنین رفتار تراکمی را برای بستر لیاف مورد نظر استخراج نمود.

۲- طریقه اندازه‌گیری تراوایی و رفتار تراکمی بستر لیاف

همان‌طور که اشاره شد عموماً حرکت رزین در بستر لیاف با استفاده از رابطه داری مدل‌سازی می‌شود. رابطه داری در حالت یک‌بعدی به صورت زیر بیان می‌شود (رابطه ۱). که در آن Q نرخ جریان، A سطح مقطع بستر لیاف، μ گرانیوی رزین، $\frac{dp}{dx}$ گرادیان فشار محرک و K_x تراوایی بستر لیاف در جهت x است [۸].

$$Q = -\frac{K_x A}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

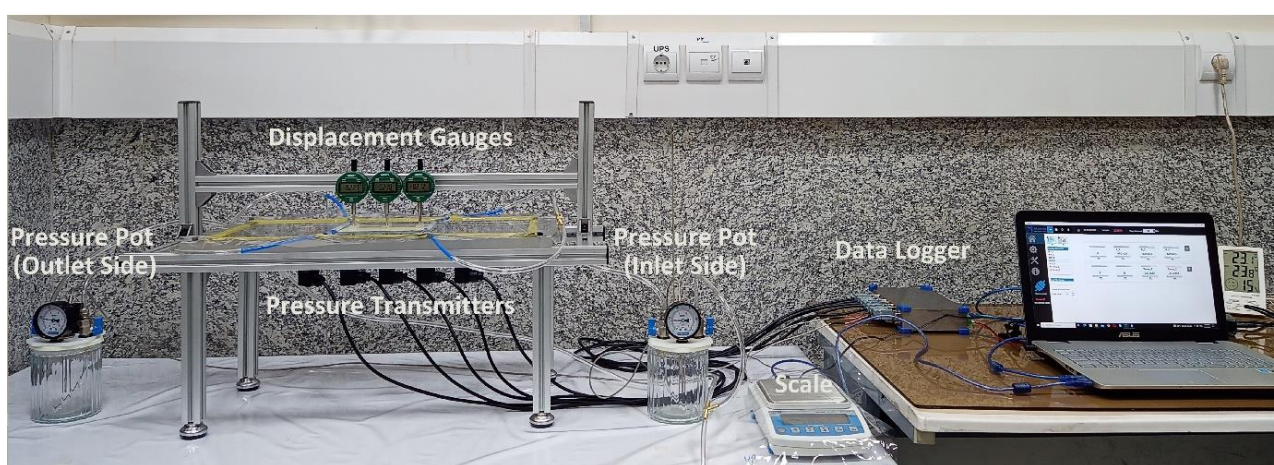
این رابطه ساختاری یک رابطه میکروسکوپی بین نرخ جریان و گرادیان فشار مورد نیاز برای حرکت سیال برقرار می‌کند. تراوایی تابعی از شبکه‌ی لیاف، کسر حجمی لیاف و نوع سایزینگ استفاده شده در لیاف است.

¹ Liquid Composite Molding

² Vacuum Infusion (VI) Process

³ Wetting

در مطالعه حاضر، هدف اندازه‌گیری تراوایی اشباع در کسرهای حجمی ایاف مختلف با ایجاد جریان یک‌بعدی روغن درون ایاف با شرط مرزی فشار ثابت است. برای این منظور یک ابزار آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است (شکل ۱). در این ابزار از یک ورق پلگسی به ضخامت ۲ سانتی‌متر به عنوان قالب استفاده می‌شود. ورق پلگسی در ۵ نقطه بر روی خط وسط با فاصله ۷ سانتی‌متر از یکدیگر سوراخ‌کاری (قطر ۴ میلی‌متر) شده است. مبدل‌های فشار در زیر این سوراخ‌ها قرار گرفته‌اند. پس از قرار گرفتن ایاف و پلاستیک بر روی قالب، سه عدد ضخامت سنج نیز بر روی آن‌ها قرار می‌گیرد. دو عدد محفظه فشار در سمت ورودی و خروجی روغن نیز قرار گرفته‌اند و در ابتدای آزمایش روغن مورد نظر در محفظه فشار ورودی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود شلنگ‌های ورودی و خروجی روغن بر روی سطح قالب قرار می‌گیرد و سپس بر روی آن‌ها نوار آب‌بند زده می‌شود [۹]. این نقاط مکان‌های محتمل برای نشت خلأ درون قالب هستند. به همین دلیل و به منظور افزایش تکرارپذیری نتایج، مکان شلنگ‌های ورودی و خروجی روغن تغییر داده شده است. بدین‌صورت که دو مبدل فشار ابتدا و انتها از زیر قالب جدا شده و هر کدام از آن‌ها بر روی یک محفظه فشار قرار داده شده است. سپس شلنگ‌های ورودی و خروجی روغن در زیر قالب و در مکان دو مبدل فشار جابجا شده قرار می‌گیرد.



شکل ۱ ابزار اندازه‌گیری تراوایی اشباع و رفتار تراکمی بستر ایاف

در ادامه به توضیح طریقه اندازه‌گیری تراوایی بستر ایاف با استفاده از این ابزار پرداخته شده است. با توجه به رابطه ۱، تراوایی بستر ایاف در جهت x توسط رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$K_x = -Q\mu \frac{1}{A} \frac{1}{dp} \frac{dx}{dx} \quad (2)$$

در رابطه ۲، سطح مقطع بستر ایاف (A) را می‌توان به صورت حاصل‌ضرب ضخامت (h) در عرض (w) بستر ایاف در نظر گرفت. ضخامت در نقاط مدنظر توسط گیج‌های قرار گرفته بر روی بستر ایاف اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از ضخامت بستر ایاف می‌توان کسر حجمی ایاف (V_f) را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$V_f = \frac{\rho_{fabric} n}{\rho_{fiber} h} \quad (3)$$

در این رابطه ρ_{fiber} و ρ_{fabric} به ترتیب بیانگر چگالی سطحی پارچه و چگالی ایاف است. همچنین n و h به ترتیب بیانگر تعداد لایه‌های پارچه و ضخامت بستر ایاف است.

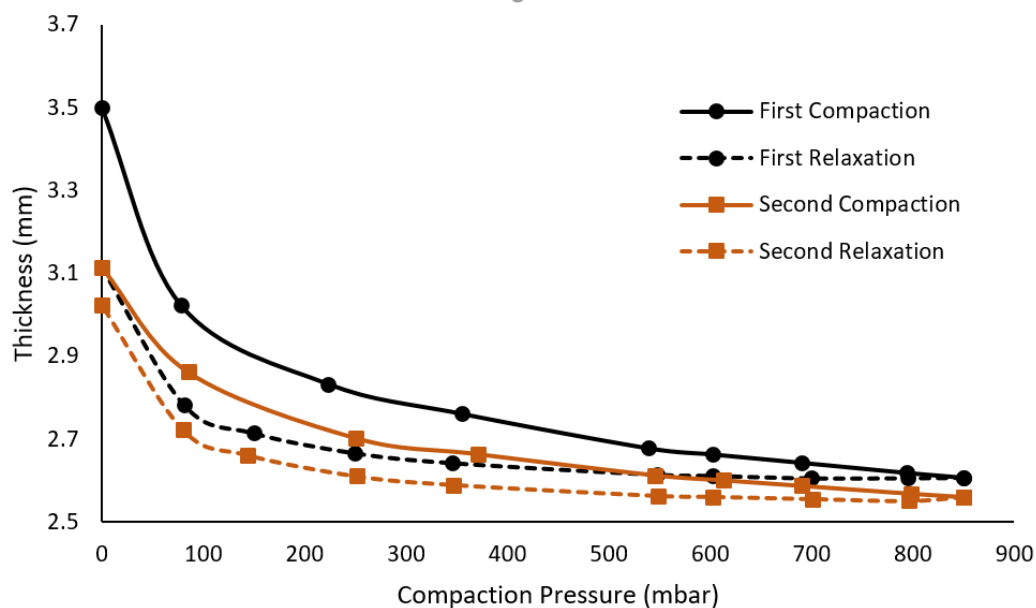
برای اندازه‌گیری تراوایی با استفاده از ابزار طراحی‌شده گام‌های زیر پیموده شده است:

- ۱- پارچه ایاف در ابعاد ۱۵ (طول) در ۱۰ (عرض) سانتی‌متر بریده شده و به تعداد لایه مدنظر بر روی یکدیگر قرار داده می‌شود. تراوایی بستر ایاف در جهت طول اندازه‌گیری می‌شود.
- ۲- یک پلاستیک منعطف بر روی بستر ایاف خشک (متشکل از چند لایه پارچه با ابعاد اشاره شده) قرار گرفته و با استفاده از نوار سیل آب‌بندی می‌شود.

- ۳- شیر ورودی روغن بسته و فشار محفظه ورودی به اندازه ۷۵۰ میلی‌بار نسبت به اتمسفر کاهش داده می‌شود. فشار محفظه خروجی نیز به اندازه ۸۵۰ میلی‌بار کاهش داده می‌شود. در این حالت ارتباط بین محفظه خروجی و بستر الیاف برقرار است.
- ۴- شیر ورودی روغن باز شده و اجازه داده می‌شود تا قالب پر شود و روغن از خروجی خارج شود.
- ۵- پس از ریختن روغن به محفظه خروجی و به تعادل رسیدن توزیع فشار در طول بستر الیاف، به مدت ۵ دقیقه وزن محفظه ورودی که حاوی روغن است اندازه‌گیری شده و نرخ روغن ورودی به بستر الیاف (برابر با نرخ روغن خروجی) محاسبه شده و در رابطه ۲ قرار داده می‌شود.
- ۶- دمای روغن در محفظه ورودی و خروجی خوانده می‌شود و با استفاده از متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، مقدار گرانیروغن استخراج شده و در رابطه ۲ قرار داده می‌شود.
- ۷- فشار در ابتدا، وسط و انتهای بستر الیاف نیز با استفاده از گیج‌های فشار زیر قالب خوانده می‌شود. با استفاده از مقادیر فشار اندازه‌گیری شده در ابتدا و انتهای بستر الیاف و با توجه به طول ۱۵ سانتی‌متری بستر الیاف و فرض ثابت بودن گرادیان فشار در طول قالب، ترم گرادیان فشار $(\frac{dp}{dx})$ در رابطه ۲ محاسبه می‌شود.
- ۸- مقادیر ضخامت بستر الیاف در سه نقطه مشخص در طول قالب خوانده شده و با استفاده از میانگین ضخامت و عرض ۱۰ سانتی‌متری بستر الیاف، مساحت سطح مقطع (A) در رابطه ۲ محاسبه می‌شود. در این مرحله با استفاده از مقدار میانگین ضخامت بستر الیاف، کسر حجمی الیاف نیز با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. بنابراین با انجام گام‌های ۳-۸ مقدار تراوایی اشباع متناظر با کسر حجمی الیاف محاسبه شده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.
- ۹- به منظور محاسبه تراوایی اشباع بستر الیاف در کسر حجمی الیاف بیشتر، فشار محفظه‌های ورودی و خروجی را در هر مرحله ۱۰۰ میلی‌بار افزایش داده و گام‌های ۴-۸ تکرار می‌شود. به منظور افزایش دقت می‌توان در گام‌های آخر (نزدیک فشار اتمسفر) افزایش فشار را به جای ۱۰۰ میلی‌بار در هر مرحله، ۵۰ میلی‌بار افزایش داد.
- علاوه بر اندازه‌گیری تراوایی اشباع، اندازه‌گیری رفتار تراکمی بستر الیاف نیز مدنظر است. رفتار تراکمی بستر الیاف شامل دو مرحله بارگذاری و باربرداری است. از طرف دیگر رفتار تراکمی بستر الیاف در حالات خشک و خیس (اشباع شده از روغن) متفاوت است. به طور کلی رفتار تراکمی بستر الیاف پیچیده است زیرا از طرفی رفتار وابسته به زمان از خود نشان می‌دهد و از طرفی وابسته به تعداد سیکل بارگذاری/باربرداری اعمال شده است [۱۰]. با صرف نظر از برخی پیچیدگی‌ها، رفتار تراکمی بستر الیاف عموماً با استفاده از رابطه توانی بیان می‌شود [۱۱].
- معمولاً در ابتدای فرایند تزریق رزین به کمک خلأ، یک‌بار بستر الیاف خشک تحت بارگذاری و باربرداری قرار می‌گیرد تا بررسی شود که بستر الیاف به خوبی آب‌بندی شده و نشستی وجود ندارد. به منظور بررسی رفتار تراکمی بستر الیاف در حالت خشک می‌توان قبل از شروع اندازه‌گیری تراوایی، یک سیکل بارگذاری/باربرداری به بستر الیاف اعمال کرد و رفتار تراکمی آن را بررسی نمود. برای بررسی رفتار بستر الیاف خیس در حالت باربرداری نیز می‌توان در حین فرایند اندازه‌گیری تراوایی، از داده‌های مربوط به گام‌های ۷ و ۸ استفاده کرد. رفتار بستر الیاف خیس در حالت بارگذاری را نیز می‌توان پس از اندازه‌گیری تراوایی، با اعمال یک سیکل بارگذاری بررسی کرد.

۳- نتایج و بحث

در مطالعه حاضر هدف اندازه‌گیری تراوایی بستر الیاف متشکل از ۹ لایه پارچه شیشه بافته‌شده با چگالی سطحی ۴۰۰ گرم بر مترمربع (تولید شرکت سینا) در جهت رول (تار) است. همچنین مشخصه سازی رفتار تراکمی بستر الیاف مذکور در جهت ضخامت نیز مورد نظر است. برای این منظور ۹ لایه پارچه با ابعاد ۱۵ در ۱۰ سانتی‌متر بریده شده و بر روی یکدیگر قرار داده شده است. ابتدا به منظور بررسی رفتار تراکمی بستر الیاف خشک در دو مرحله بارگذاری و باربرداری، نمونه مذکور تحت دو سیکل بارگذاری/باربرداری قرار داده می‌شود. تغییرات فشار بر روی بستر الیاف در گام‌های مختلف اعمال می‌شود و در هر گام به منظور پایدار شدن تغییرات ضخامت نمونه، ۵ دقیقه زمان داده می‌شود. تغییرات ضخامت نمونه بر حسب فشار اعمالی در مراحل بارگذاری/باربرداری در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با اعمال هر سیکل بارگذاری/باربرداری ضخامت نمونه کاهش پیدا می‌کند.



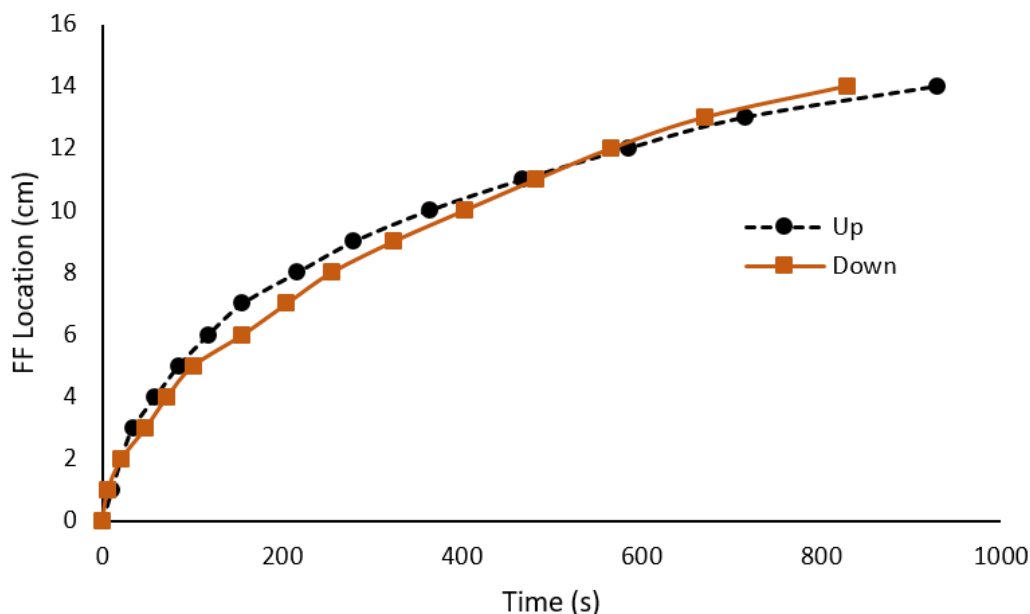
شکل ۲ تغییرات ضخامت بستر لیاف خشک (۹ لایه پارچه شیشه) تحت دو سیکل بارگذاری/باربرداری

به منظور اندازه‌گیری تراوایی نمونه مورد نظر، گام‌های ذکر شده در بخش قبل پیموده می‌شود. شکل ۳ شروع تزریق روغن به درون بستر لیاف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای رساندن روغن از ورودی تا لبه بستر لیاف از فلومش استفاده شده است.



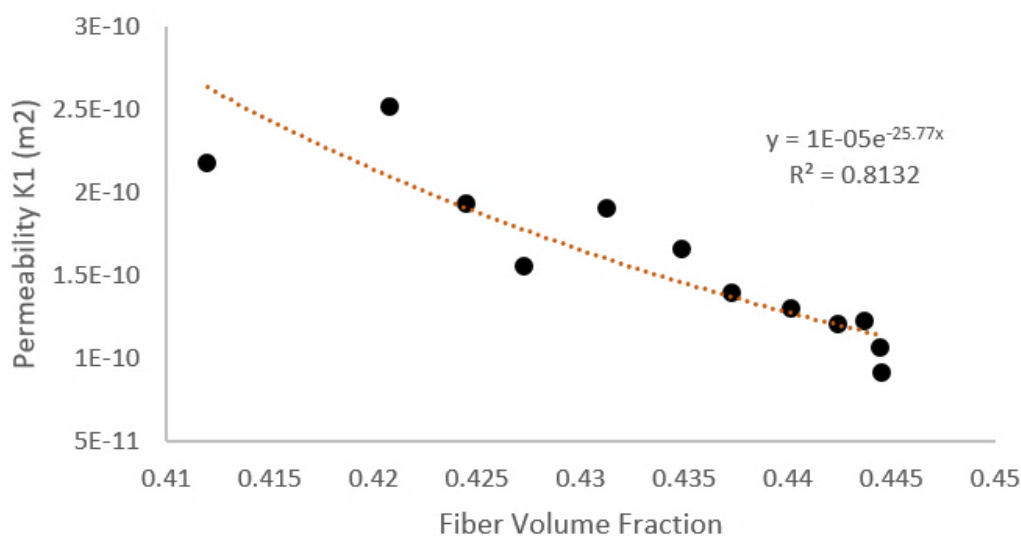
شکل ۳ نمایی از شروع تزریق روغن سیلیکون به درون بستر لیاف

تغییرات مکان جبهه جریان روغن نسبت به زمان در طول مرحله پر شدن قالب در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مکان جبهه جریان مشاهده شده از بالا و پایین قالب با یکدیگر مقاداری تفاوت دارند. این موضوع را می‌توان به تفاوت در خطوط شاخص برای اندازه‌گیری جبهه جریان در بالا و پایین قالب و همچنین خطا در مشاهده جبهه جریان به دلیل بی‌رنگ بودن روغن مورد استفاده نسبت داد. از نمودارهای مکان جبهه جریان نسبت به زمان می‌توان برای صحت گذاشتن بر اینکه رابطه داری قابل استفاده برای مدل‌سازی حرکت روغن در بستر لیاف مذکور است استفاده کرد. همچنین در مواقعی که هدف اندازه‌گیری تراوایی غیراشباع بستر لیاف است بررسی این نمودارها اساسی است.



شکل ۴ تغییرات مکان جبهه جریان روغن نسبت به زمان در حالات مشاهده از بالا و پایین

تغییرات تراوایی اشباع نمونه مورد نظر بر حسب کسر حجمی الیاف در شکل ۵ ارائه شده است. باید توجه داشت که شرایط لبه بستر الیاف تأثیر زیادی بر روی مقادیر تراوایی استخراج شده دارد. به منظور از بین بردن اثر لبه بستر الیاف باید تمهیداتی اندیشیده شود تا پلاستیک منعطف نتواند لبه بستر الیاف را بیش از حد فشرده کرده و باعث کاهش موضعی تراوایی الیاف شود. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش کسر حجمی الیاف، تراوایی بستر الیاف کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۵ تغییرات تراوایی اشباع بستر الیاف نسبت به کسر حجمی الیاف

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه طریقه اندازه‌گیری تراوایی اشباع و رفتار تراکمی بستر الیاف با استفاده از ابزار ساخته شده به تفصیل بیان شد. همچنین برای بستر الیاف حاوی ۹ لایه پارچه شیشه بافته‌شده با چگالی سطحی ۴۰۰ گرم بر مترمربع مقادیر تراوایی اشباع برای کسرهای حجمی الیاف مختلف و رفتار تراکمی بستر الیاف خشک استخراج شد. همان‌طور که انتظار می‌رفت تراوایی اشباع اندازه‌گیری شده، با کاهش کسر حجمی الیاف افزایش می‌یابد زیرا سیال راحت‌تر می‌تواند در بستر الیاف حرکت کند. همچنین مشاهده شد که با اعمال

یک سیکل بارگذاری/باربرداری به بستر الیاف، یک کاهش ضخامت ماندگار در آن نسبت به قبل از اعمال سیکل اتفاق می‌افتد. اختلافی در مقادیر مکان جبهه جریان نسبت به زمان، که از بالا و پایین قالب با استفاده از دوربین اندازه‌گیری می‌شود وجود دارد. به منظور رصد بهتر مکان جبهه جریان بایستی از ترکیب روغن با رنگ مناسب به عنوان سیال آزمایش استفاده کرد. لازم به ذکر است که داده‌های مکان جبهه جریان بر حسب زمان به منظور استخراج تراوایی غیراشباع بستر الیاف مورد نیاز است. به منظور بهبود دقت و تکرارپذیری نتایج تراوایی اشباع باید اثر لبه بستر الیاف را به طریقی از بین برد و عدم قطعیت پارامترهای درگیر در فرایند را کاهش داد.

References

- [1] Correia NC, Robitaille F, Long AC, Rudd CD, Šimáček P, Advani SG. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2005 Dec 1;36(12):1645-56. doi: 10.1016/j.compositesa.2005.03.019
- [2] Nasiri M, Abedian A. Influence of resin curing during mold filling on process - induced residual stresses and deformations in ultra - thick vacuum - infused laminates: A multiphysics approach. *Polymer Composites*. 2025 Feb 26. doi: 10.1002/pc.29596
- [3] Grofti Z, Croteau - Labouly B, Boukhili R, Causse P, Belouettar S, Perrin H, Trochu F. Simultaneous characterization of preform expansion and permeability in vacuum assisted resin infusion. *Polymer Composites*. 2022 Jun;43(6):3560-73. doi: 10.1002/pc.26637
- [4] Yalcinkaya MA, Sarioglu A, Sozer EM. A novel mold design for one-continuous permeability measurement of fiber preforms. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015 Jun;34(11):915-30. doi: 10.1177/0731684415581630
- [5] Arbter R, Béraud JM, Binetruy C, Bizet L, Bréard J, Comas-Cardona S, Demaria C, Endruweit A, Ermanni P, Gommer F, Hasanovic S. Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011 Sep 1;42(9):1157-68. doi: 10.1016/j.compositesa.2011.04.021
- [6] Vernet N, Ruiz E, Advani S, Alms JB, Aubert M, Barburski M, Barari B, Beraud JM, Berg DC, Correia N, Danzi M. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014 Jun 1;61:172-84. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.02.010
- [7] May D, Aktas A, Advani SG, Berg DC, Endruweit A, Fauster E, Lomov SV, Long A, Mitschang P, Abaimov S, Abliz D. In-plane permeability characterization of engineering textiles based on radial flow experiments: A benchmark exercise. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019 Jun 1;121:100-14. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.006
- [8] Advani SG, Sozer EM. *Process modeling in composites manufacturing*. CRC press; 2002 Aug 28.
- [9] Esfandiari M, Rahimi Asiabaraki H, Akbari M. Experimental investigation of plasma effect on mechanical properties and impact resistance of aluminum-glass epoxy composites. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Dec 21;11(10):45-55. doi: 10.22034/ijme.2024.473465.1996 [In Persian]
- [10] Danzi M, Schneeberger C, Ermanni P. A model for the time-dependent compaction response of woven fiber textiles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018 Feb 1;105:180-8. doi: 10.1016/j.compositesa.2017.11.002
- [11] Yalcinkaya MA, Caglar B, Sozer EM. Effect of permeability characterization at different boundary and flow conditions on vacuum infusion process modeling. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017 Apr;36(7):491-504. doi: 10.1177/0731684416684211