

# مدل سازی سه بعدی سلول واحد بافت و منفذ پارچه تار پودی و تحلیل پارامترها

حمید رضا شرافت<sup>۱</sup>، علی اصغر اصغریان جدی<sup>۲</sup>، مهدی کمالی دولت آباد<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

hsharafat@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

## چکیده:

هندسه سه بعدی پارچه تار پودی نقش مهمی در کاربردهای مختلف از جمله شکل دهی کامپوزیت، رفتار فیلتر کردن و نفوذپذیری منسوجات پزشکی، محافظ و ژئوتکستایل دارد و باید در فرآیندهای پارچه مانند رنگرزی، خشک کردن و تکمیل مدنظر قرار گیرد. هندسه تخلخل در پارچه به میزان قابل توجهی به محاسبه نفوذپذیری پارچه کمک می کند. بنابراین برای مدل سازی و شبیه سازی نفوذپذیری سیال در پارچه تار پودی، به هندسه دقیق منافذ و سلول های واحد بافت پارچه نیاز است. در این مقاله هندسه منافذ و سلول بافت با استفاده از شبیه سازی نرم افزاری بررسی گردیده است. هندسه منافذ سه بعدی سلول های بافت پایه به طور سیستماتیک برای مقاطع مختلف نخ مانند دایره، عدسی و زمین بازی اجرا شده است. پس از مقایسه نتایج مدل با روش بکر و محاسبه حجم منافذ و پارچه در نمونه های کامپوزیت و اطمینان از صحت و دقت مدل، رابطه بین تغییرات پارچه و مشخصات نخ بر روی حجم منافذ بررسی شده است. نتایج نشان می دهد با تغییر ضخامت کامپوزیت، دامنه و زاویه نخ ها بصورت خطی و معکوس تغییر می کند. تغییرات حجم پارچه در شرایط مختلف سلول بافت زیاد نیست. با افزایش دامنه نخ ها، حجم منافذ به صورت خطی افزایش می یابد. شکل سطح مقطع بر دامنه نخ ها تأثیر می گذارد. سرعت جریان هوا درجهت عمودی از نوع ۳ به نوع ۴، ۲ و ۱ کاهش می یابد.

**کلمات کلیدی:** هندسه، پارچه تار پودی، مدل سه بعدی، منفذ، نرم افزار

## 3D geometrical of weave unit cell and pore model and parametric analysis

Hamid Reza Sharafat<sup>1</sup>, Ali. A. A. Jeddi<sup>2</sup>, Mehdi Kamali Dolatabadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Textile Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

hsharafat@gmail.com

### Abstract

The 3D geometry of woven fabric plays a critical role in a variety of applications, including composite forming, filtering behavior, and the permeability of medical textiles, protective clothing, and geotextiles. It is also crucial to consider this geometry in fabric processes such as dyeing, drying, and finishing. It is well known that the porosity geometry of a fabric significantly influences its permeability. Therefore, to model and simulate the fluid permeability of woven fabric accurately, a precise representation of fabric pores and unit cells is necessary. In this study, the pore geometry and unit cell of a woven fabric were analyzed using software simulation. The relationship between changes in fabric and yarn specifications on the 3D pore geometry of basic unit cells was systematically visualized for different yarn cross-sections, namely circle, lens, and racetrack. By comparing the results of the model with Becker's method and calculating the volume of pores and fabric in the composite samples to ensure the correctness and accuracy of the model, the impact of fabric changes and yarn characteristics on the volume of pores was investigated. Fabric volume variations are not substantial under various conditions of the unit cell. The pore volume increases linearly with increasing yarn amplitude. The shape of the cross-section influences the yarn amplitude. The airflow rate in the vertical direction decreases from unit cell type 3 to 4, 2, and 1.

**Keywords:** geometry, woven fabric, three dimensional, pore, software

## ۱. مقدمه

پارامتر هندسی یعنی ساختار بافت و چگالی نخ به کار می رود [۳].

بکر<sup>۱</sup> (1951) رابطه ای بین هندسه ساختار پارچه و خواص فیزیکی آن مانند هندسه منافذ و نفوذپذیری پیشنهاد کرد. وی فرض کرد نخ ها به عنوان استوانه های دایره ای توپر انعطاف پذیر عمل می کنند. همچنین نفوذپذیری هوا به حداقل سطح منافذ (سطح مقطع منفذ) در پارچه های باز و بسته مرتبط است.

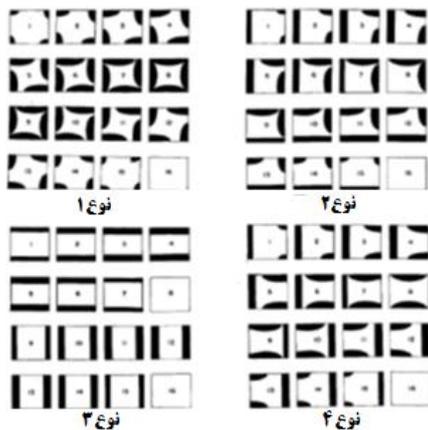
شکل ۱ بخش الف چهار نوع سلول واحد بافت پارچه و یک بخش افقی از منافذ سلول بافت (نوع ۱) را نشان می دهد که کامل تر آن در شکل ۱ بخش ب نشان داده شده است. انواع منافذ مختلف سلول بافت پارچه در شکل ۱ بخش ج نشان داده شده است که در آن صفحات ۱۶ برش افقی از چهار نوع منفذ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱ بخش ج نشان داده شده است، نوع ۱ دارای حداقل سطح مقطع منفذ برای پارچه های نسبتاً باز است، در حالی که منافذ در حالت بدون در هم رفتگی نخ ها (نوع ۳) از نظر حداقل سطح مقطع، دارای بیشترین مقدار است. برای پرداختن به نواحی منافذ به صورت کمی تر، از هندسه نخ ها (نمودار فر و موج دار پیرس) و ادغام مکانیکی در سلول واحد بافت استفاده شده است. سپس میانگین حداقل نواحی منافذ در برابر نفوذپذیری هوا که توسط شیفر گزارش شده بود، ارائه گردید. سپس درصد انقباض کل در برابر نفوذپذیری هوا توسط نظریه پیرس نشان داده شد. بر اساس نتایج و روابط

امروزه پارچه های تار پودی به دلیل خواص برتر، در حوزه های متنوعی کاربرد دارند. رفتار پارچه تار پودی در برابر انتقال سیال می تواند برای برخی از کاربردهای پارچه از جمله انتشار رزین بین و درون الیاف در تولید کامپوزیت، چاپ و چاپگرهای سه بعدی منسوجات، نفوذپذیری پارچه در فیلتراسیون، منسوجات اتاق عمل و راحتی فیزیولوژیکی لباس مورد توجه باشد [۲ و ۱]. به عنوان یک ماده متخلخل، پارچه تار پودی اجازه انتقال انرژی (نور، گرما) و مواد (مایع، گاز، ذرات) را می دهد و بنابر این برای کاربردهای مختلف مانند پوشاک و مصارف فنی مناسب است. برای تعیین تخلخل پارچه تار پودی، چندین روش تجربی از جمله روش نوری و روش هایی بر اساس نفوذ مایع، جذب، فیلتراسیون و جریان هوا توسعه داده شده که فقط بر روی پارچه های واقعی قابل استفاده است [۳-۵]. روش هندسی روشی متفاوت است زیرا بر اساس مدل هندسی ایده آل یک منسوج به عنوان مواد متخلخل بوده و داده های ورودی شامل پارامترهای الیاف و نخ از جمله شکل سطح مقطع و نمره است. چنین روشی نیاز به تجهیزات گران قیمت آزمایشگاهی یا نمونه بافی ندارد. با این حال، نتایج روش هندسی، به خوبی با مقادیر واقعی، تعیین شده توسط سایر روش های تجربی قابل مقایسه است. روش هندسی بطور معمول برای پیش بینی تخلخل پارچه های تار پودی در مقیاس ماکرو و بر اساس سیستم لوله مانند مواد متخلخل و با دو

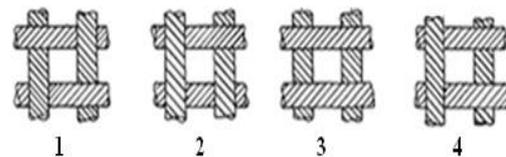
<sup>1</sup> Backer

می‌گذارند [۶]. اکثر مطالعات قبلی رابطه بین نفوذپذیری هوا و ویژگی‌های ساختاری پارچه‌های بافته شده را از روش بکر بررسی کردند [۸و۶].

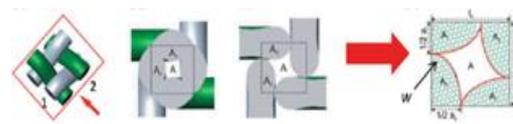
به دست آمده، با استفاده از تراکم تار و پود و بافت پارچه می‌توان نفوذپذیری پارچه‌ها را تخمین زد. این دو متغیر بر میانگین حداقل نواحی منافذ و فر و موج کل تأثیر



(ج)



(الف)



(ب)

شکل ۱- سلول واحد بافت و منفذ پارچه تار پودی: الف) چهار نوع سلول واحد بافت پارچه [۶]، ب) شکل منفذ در مقیاس ماکرو [۷]، ج) نماهای عمودی سلول واحد بافت با برش‌هایی به عمق  $1/8d$  [۶]

اسکن، روش میکروسکوپی و غیره) برای محاسبه حداقل سطح منافذ در بافت پارچه استفاده شده است [۱و۳و۸-۱۱].

شبهه سازی سه بعدی پارچه فرایند پیچیده ای است که اجرای آن ملزوم به داشتن دانش در رشته های متفاوت مانند مهندسی نساجی، رایانه و مکانیک است [۱۲]. مطالعات اندکی هندسه سه بعدی منافذ را در نظر گرفته اند که سطح مقطع منافذ را به ساده ترین شکل ممکن یعنی دایره ای یا بیضی و شکل سه بعدی آن را استوانه ای در نظر گرفته اند [۳و۱۳].

بدیهی است که ویژگی های سلول های پارچه تار پودی و پارامترهای منافذ آن تابعی از مشخصات نخ و فاکتورهای

بررسی پیشینه تحقیق نشان داد که اساس اکثر مطالعات در این زمینه تحقیقات بکر است که چهار نوع سلول واحد بافت از پارچه‌های تار پودی را در نظر گرفته است. مطالعه وی بر اساس تخمین نفوذپذیری هوای پارچه و محاسبه حداقل سطح منافذ در هر سلول واحد بافت با استفاده از نماهای برش مقطعی و محاسبه سطح منافذ دو بعدی است. سپس میانگین نفوذ پذیری هوا در هر یک از سلول های چهار واحدی در تکرار بافت و درصد توزیع سلول های چهار واحدی محاسبه شده و بر اساس درصد توزیع سلول های چهار واحدی در تکرار بافت، تنها میانگین نفوذپذیری هوا در نمونه ها برآورد شده اند. در تحقیقات دیگری از روش‌های ساده تر و سریع تر (یعنی

پارچه است. رویکرد بکر برای محاسبه حداقل مساحت منافذ وقت گیر و مشکل ساز بوده و تنها شکل ۲ بعدی سلول واحد و منافذ را به دست می دهد. تعمیم سطح مقطع و تصویر دو بعدی سلول ها و منافذ به سه بعدی با خطای قابل توجهی همراه است و یا حتی افزایش تعداد صفحات به منظور به حداقل رساندن خطا زمان بر است. اگرچه نفوذپذیری هوای پارچه با حداقل سطح منافذ ارتباط دارد، اما نفوذپذیری سیالاتی مانند رزین ها و سایر مایعات به شکل سه بعدی و حجم منافذ بستگی دارد.

شکل سه بعدی منافذ عامل مؤثر برای ارزیابی خواص نفوذ رزین از طریق پارچه های تار پودی به صورت افقی و عمود و ایجاد حباب است. علاوه بر این، شکل ذکر شده نقش حیاتی در فیلتراسیون هوا یا سیال دارد. علاوه بر این، پیش بینی مقدار مناسب رزین قبل از رزین زنی پارچه نیز مهم است که باعث کاهش هزینه، تشکیل حباب، قیمت تمام شده کامپوزیت و افزایش کیفیت پارچه می شود. برای مدل سازی محیط متخلخل، هندسه سه بعدی دقیق سلول های بافت و منافذ پارچه مورد نیاز است. مدل سازی شکل سه بعدی منافذ در تحقیقات منتشر شده به جز یک مورد از همین نویسنده یافت نشد که در آن نتایج نرم افزار با نتایج تجربی مقایسه شده بود که از دقت بالایی برخوردار بود [۱۴]. هدف اصلی این تحقیق برآورد شکل سه بعدی منافذ پارچه بافته شده با استفاده از روش شبیه سازی نرم افزاری است. برای این منظور از مفهوم بکر در نرم افزار کتیا<sup>۱</sup> استفاده شده است.

## ۲. شبیه سازی و تحلیل

روش دیگری نیز برای هدف بکر مورد بررسی قرار گرفته است، از جمله روش های تصویربرداری پزشکی مانند تصویربرداری تشدید مغناطیسی، پراش اشعه ایکس، سی تی اسکن (توموگرافی کامپیوتری)، توموگرافی کامپیوتری میکرو<sup>۲</sup> و اسکنرهای نوری و دیجیتالی، دوربین ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۳</sup>، میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۴</sup>، لیزر و روش بروناتر-امت-تله<sup>۵</sup>.

هیچ یک از این روش ها به دلیل وجود تصویر دو بعدی، وضوح یا کنتراست کم، هزینه بالا، زمان بردن یا شرایط سخت تصویربرداری یا نمونه برداری، نمی توانند نیازهای پژوهشی را برآورده کنند [۱۵ و ۱۶]. در این تحقیق لازم بود روشی ارائه گردد که بتوان به سرعت، دقیق و ارزان،

<sup>2</sup> Micro CT

<sup>3</sup> SEM

<sup>4</sup> TEM

<sup>5</sup> BET

<sup>1</sup> CATIA

۱- نخ های تار و پود دارای سطح مقطع گرد و توپر هستند.

۲- نخ های تار و پود به یکدیگر داخل نمی شوند (با محدودیت های خاص)

۳- از مدل پیرس و مفروضات آن برای هندسه سلول های واحد بافت استفاده شد.

مدل بکر به عنوان یک معیار در این بخش در نظر گرفته شد. بنابراین، مقادیر پارامترهای مطالعه بکر (۱۹۵۱) در روش نرم افزاری مذکور مورد استفاده قرار گرفت. این مقادیر شامل D (قطر) ۰,۰۰۴ اینچ، P (فاصله نخ) ۰,۰۱ اینچ و D، P و C (فر و موج) برای نخ های تار و پود برابر در نظر گرفته شد.

در نرم افزار کتیا از Part design, Sketcher و Assembly در محیط Mechanical Design استفاده شد. برای این منظور ابتدا از گزینه Start گزینه Mechanical Design انتخاب و سپس با انتخاب Part Design فایل مورد نظر ایجاد شد. برای ایجاد هر سلول واحد بافت، یک صفحه در Sketch انتخاب شد و ناحیه مقطع دایره را ایجاد کرد. پس از آن، مسیری مشخص شد و سطح مقطع دایره با استفاده از دستور Rib و تعیین شرایط و محدودیت های لازم به نخ تبدیل شد.

سپس ۴ کپی از نخ ایجاد شده گرفته شد و در زوایای مناسب به عنوان نخ تار و پود سلول واحد بافت مورد استفاده قرار گرفت.

بعد شکل سه بعدی سلول واحد شبیه سازی شد. پس از آن، برای ارائه روند کار بکر در نرم افزار، تعدادی صفحه

تصویر سه بعدی واقعی از منافذ و سلول واحد بافت ارائه شود که بتوان پارامترهای نخ و پارچه را به راحتی تغییر داد. با توجه به قابلیت های نرم افزار کتیا مانند مونتاژ، ماژول بندی و خروجی مناسب برای نرم افزارهای بعدی به عنوان مثال، فلونت<sup>۱</sup>، برای طراحی هندسه پارچه های بافته شده در مقیاس مزو انتخاب شد. از دیگر عملکردهای این نرم افزار می توان به قابلیت جداسازی سلول های واحد بافت با انواع مشخصات و مونتاژ آن ها به صورت پارچه اشاره کرد. لازم به ذکر است که در تحقیقات قبلی، شکل سه بعدی تخلخل پارچه بافته را شبیه سازی نکرده اند.

بنابراین مراحل زیر در نظر گرفته شد:

۱- روش بکر با استفاده از نرم افزار کتیا شبیه سازی شد. سپس نتایج با محاسبات بکر مقایسه شد.

۲- شبیه سازی با استفاده از قابلیت های نرم افزار بهبود یافت تا به روشی سریع، دقیق و ساده برسد.

۳- شکل سه بعدی منافذ و سلول های واحد بافت با فرض برش های مختلف نخ شبیه سازی شد.

برای شبیه سازی شکل منافذ سه بعدی، چندین مقطع نخ به شرح زیر در نظر گرفته شد.

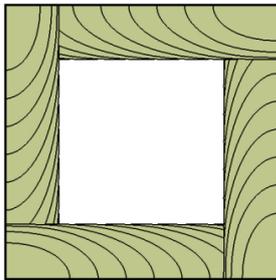
#### ۱-۲. شبیه سازی سطح مقطع دایره

برای جلوگیری از پیچیدگی، هندسه دقیق و ساده در محیط پیوسته مجازی مورد نیاز است. بر این اساس، فرضیات برای مقطع دایره ای عبارت بودند از:

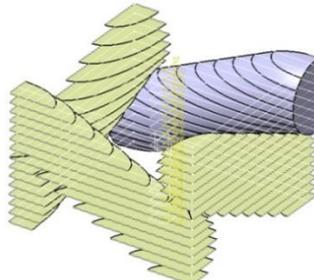
<sup>1</sup> FLUENT

منافذ در هر صفحه محاسبه و در جدول ۱ در ابعاد  $P_w * P_f$  نشان داده شد. مقادیر واقعی ۱۰۰۰ برابر بزرگتر در نرم افزار در نظر گرفته شد.

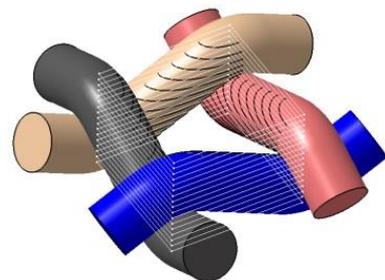
مجازی موازی در ارتفاعات مختلف از سلول واحد تعریف شد. صفحات سلول واحد همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، طراحی شد. مساحت سطح مقطع نخ و



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲- الف) ۱۶ برش از یک سلول بافت پارچه تار پودی (ب) تصاویر صفحات برش در نمای سه بعدی، (ج) سلول بافت از نمای بالا

## ۲-۲. محاسبه شکل سه بعدی منافذ پارچه تار

### پودی با روشی سریع تر

برای شبیه سازی سطح مقطع دایره، تمامی فرضیات و محاسبات پیرس و برای مقطع عدسی<sup>۱</sup>، تمامی فرضیات و محاسبات هرل و برای سطح مقطع زمین بازی<sup>۲</sup>، تمامی فرضیات و محاسبات کمپ در نظر گرفته شد [۱۷]. در شکل ۳ هندسه سه سطح مقطع نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شد که مطابقت خوبی با یکدیگر داشتند. در شکل های زیر P فاصله نخ، h دامنه نخ، r شعاع نخ، a قطر بزرگ، b قطر کوچک، h دامنه نخ، c فر و موج نخ، l طول نخ،  $\theta$  زاویه محور نخ، T ضخامت پارچه و اندیس ۱ و ۲ نشانگر تار و پود پارچه هستند.

برش های ۱۶ گانه از سلول بافت تافته در جدول ۱ نشان داده شده است.

مشاهده می شود که تفاوت فاحشی بین نتایج نرم افزار و بکر وجود ندارد (جدول ۲). همچنین می توان مشاهده کرد که در هر دو نتیجه، حداقل اندازه منافذ مربوط به ردیف ۸ است. لازم به ذکر است که در نوع ۱ لایه ۱۵ کارهای بکر (شکل ۱) در مقایسه با نتایج روش نرم افزاری اشکالاتی وجود دارد.

برای به دست آوردن شکل سه بعدی دقیق تر منافذ در روش نرم افزاری، تعداد صفحات برش (۱۶ برش روش بکر) به صفحات برش بیشتر (تا ۶۴ صفحه) افزایش یافت. لازم به ذکر است افزایش برش ها زمانبر است و از این رو رویکرد دیگری در این مطالعه پیشنهاد شد.

<sup>1</sup> Lens

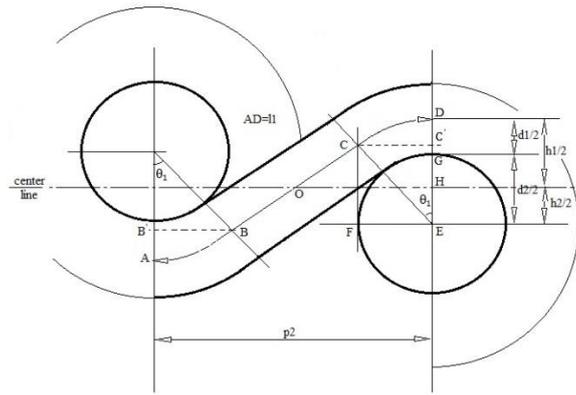
<sup>2</sup> Racetrack

جدول ۱- نماهای عمودی برش های ۱۶ گانه سلول واحد بافت تافته

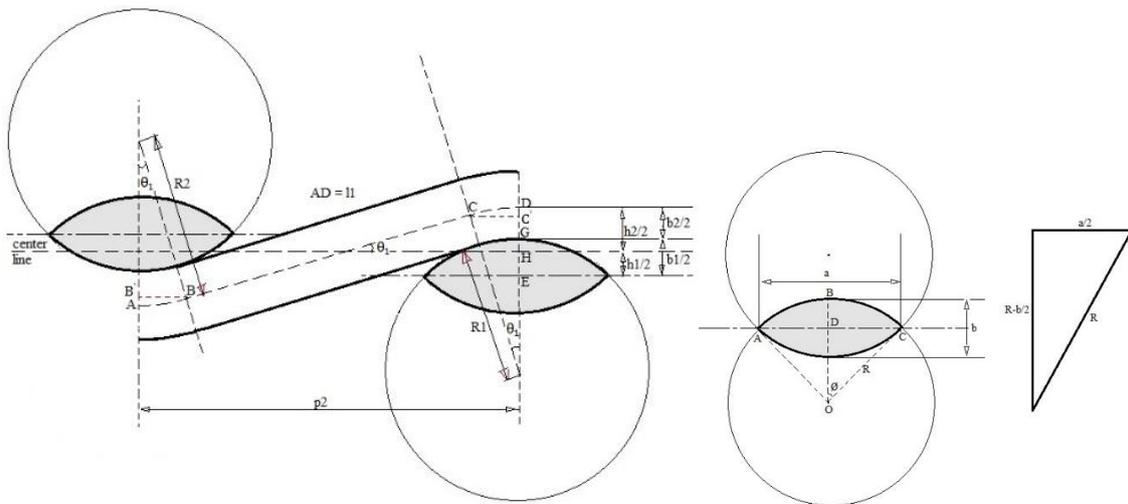
شماره لایه	سطح مقطع	عمق برش	مساحت سطح مقطع نخ ( $10^{-8}$ * اینچ مربع)	مساحت سطح مقطع منفذ ( $10^{-8}$ * اینچ مربع)
1		d/8	1008.8	8991.2
2		2d/8	1890	8110
3		3d/8	2751.2	7248.8
4		4d/8	3592	6408
5		5d/8	4381.6	5618.4
6		6d/8	5076	4924
7		7d/8	5606.8	4393.2
8		D	5814.8	4185.2
9		9d/8	5606.8	4393.2
10		10d/8	5076	4924
11		11d/8	4381.6	5618.4
12		12d/8	3592	6408
13		13d/8	2751.2	7248.8
14		14d/8	1890	8110
15		15d/8	1008.8	8991.2
16		2d	0000	100.00

جدول ۲- خطای مطلق نتایج

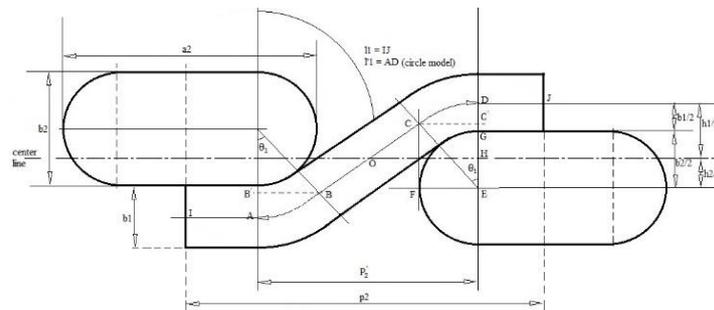
شماره لایه	مساحت سطح مقطع منفذ		خطای مطلق (%)
	روش نرم افزاری	روش بکر	
1	8991.2	8988	0.036
2	8110	8132	0.270
3	7248.8	7240	0.110
4	6408	6416	0.125
5	5618.4	5564	0.980
6	4924	4888	0.740
7	4393.2	4404	0.245
8	4185.2	4216	0.731



الف) هندسه سطح مقطع دایره پیرس



ب) هندسه سطح مقطع عدسی هرل



ج) هندسه سطح مقطع زمین بازی کمپ

شکل ۳- هندسه پارچه تافته با سطح مقاطع مختلف [۱۴]

که در آن  $V_u$  حجم کل سلول واحد بافت،  $V_p$  حجم منفذ سلول واحد،  $i$  نشان دهنده نخ تار،  $z$  نخ بود،  $d$  نشان دهنده قطر نخ آزاد،  $D$  نشان دهنده مجموع قطرهای  $(d_i + d_j)$  است.  $P$  میانگین فاصله نخ و ضخامت پارچه و  $\theta$  زاویه محور نخ است. از این رو:

$$L_j = (1/\cos\theta_j) P_i - D_j * \tan \theta_j + D_j * \theta_j \quad (1)$$

$$V_i = L_i * A_i \quad (2)$$

$$V_p = V_u - (V_i + V_j) = P_i * P_j (d_i + d_j) - (V_i + V_j) \quad (3)$$

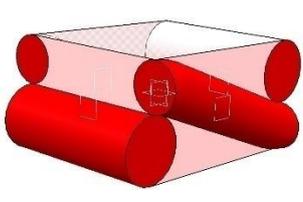
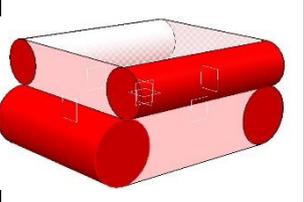
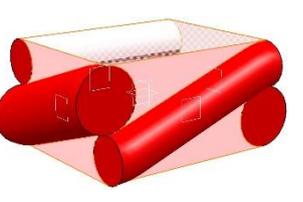
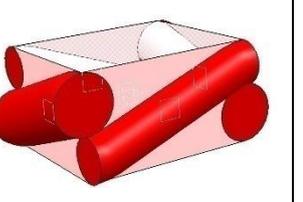
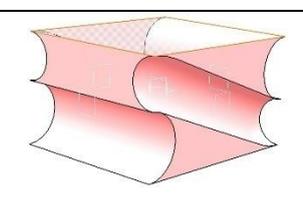
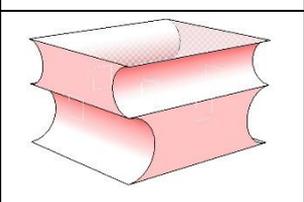
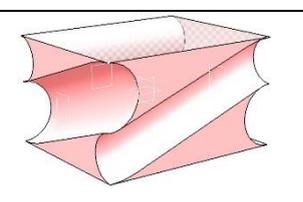
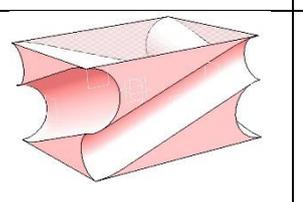
در مواد کامپوزیتی، این روش می تواند برای محاسبه جرم و حجم رزین مفید باشد. برای این نوع بافت ها نیز همان فرآیند ایجاد منافذ انجام می شود که البته در برخی از آن ها نیازی به چرخاندن نخ ها نبود. سلول های واحد مطابق با این مقادیر تنظیم شدند: ضخامت پارچه = ۰,۰۴۵ متر،  $P_{warp}$  = ۰,۰۴۹۸ متر،  $P_{weft}$  = ۰,۰۵ متر. سایر مقادیر در جدول ۳ برای هر کدام از سه سطح مقطع آمده است.

پس از بدست آوردن مدل سلول واحد بافت، یک مکعب مستطیل توپر با ابعاد  $P_w * P_f * T$  طراحی شد. سپس یک سلول واحد با ابعاد سلول واحد به روشی که قبلاً ذکر شد ایجاد گردید. برای محاسبه حجم منافذ، ابتدا حجم سلول واحد پارچه تار پودی با استفاده از اعداد صحیح بولین محاسبه شد و سپس این مقدار از حجم مکعب استنتاج شد. برای نشان دادن شکل منافذ سه بعدی، سلول واحد نخ با استفاده از دستور Remove از مکعب حذف شد.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای پارچه برای شبیه سازی

سطح مقطع دایره						
h	$\theta$	S	r	d	نوع	
متر	درجه	متر مربع	متر	متر	واحد	
0.0089	10.812	0.00023494	0.00865	0.0173	تار	
0.0027	35.073	0.00027158	0.0093	0.0186	پود	
سطح مقطع عدسی						
h	$\theta$	S	R	b	a	نوع
متر	درجه	متر مربع	متر مربع	متر	متر	واحد
0.00142	18.676	0.00023494	0.0034451	0.0098	0.035418	تار
0.0053	0.230	0.00027158	0.0046901	0.0097	0.041541	پود
سطح مقطع زمین بازی						
h	$\theta$	$S_{\text{و}}$	R	b	a	نوع
متر	درجه	متر مربع	متر مربع	متر	متر	واحد
0.00142	30.250	0.00023494	0.004900	0.0098	0.02607	تار
0.0053	9.427	0.00027158	0.004850	0.0097	0.03008	پود

(S) (مساحت سلول بافت) بر حسب متر مربع و  $\theta$ ، درجه و واحد سایر مقادیر، متر است.)

				سلول بافت واحد
				منفذ
۴	۳	۲	۱	نوع

شکل ۴- مدل سه بعدی سلول های چهار واحد بافت و منافذ آن با سطح مقطع دایره ای

جدول ۴ ورودی های مدل دایره را در نرم افزار کتیا نشان می دهد.

جدول ۴- ورودی های مدل دایره در نرم افزار

نحوه محاسبه	پارامتر	ورودی
برعکس تراکم نخ های تار بر حسب سانتی متر اندازه گیری می شود	فاصله نخ های تار	$P_1$
برعکس تراکم نخ های پود بر حسب سانتی متر اندازه گیری می شود	فاصله نخ های پود	$P_2$
محاسبه با رابطه (۱)	قطر نخ تار	$d_1$
محاسبه با رابطه (۱)	قطر نخ پود	$d_2$
با ضخامت سنج در فشار مکش مورد نظر اندازه گیری می شود	ضخامت پارچه	$T$
قابل تغییر / $T = h_1 + d_1$ یا $T = h_2 + d_2$ هر کدام بزرگتر هستند	دامنه نخ تار	$h_1$
قابل محاسبه از $d_1 + d_2 = h_1 + h_2$	دامنه نخ پود	$h_2$
قابل محاسبه از $c_1 = \frac{l_1 - P_2}{P_2}$ و $\theta_1 = 2\sqrt{C_1}$	زاویه نخ تار	$\theta_1$
قابل محاسبه از $c_2 = \frac{l_2 - P_1}{P_1}$ و $\theta_2 = 2\sqrt{C_2}$	قطر نخ پود	$\theta_2$

بر اساس نمره نخ (Tex)، قطر نخ (d) با سطح مقطع  $T_y$  نمره نخ بر حسب Tex و  $\mu$  فشردگی نخ و  $\rho$  دایره بر حسب سانتی متر با معادله زیر محاسبه شد:

$$d [\text{Cm}] = \frac{2\sqrt{T_y}}{\sqrt{\rho * \mu * \pi * 10^5}} \quad (۴)$$

وسط به ترتیب ۳۵,۹، ۱۸,۶ و ۱۷,۳ بوده و در نقطه انتهایی نمودار در نوع ۱ به ترتیب مقادیر ۵۳,۱۹۹، ۳۵,۸۹۹ و ۰ و در نوع ۲ به ترتیب ۴۹,۸۴۱، ۳۲,۵۴۱ و ۳,۳۵۹ و در نوع ۳ به ترتیب ۳۸,۶۵۹، ۲۱,۳۵۹ و ۱۴,۴۵۱ و در نوع ۴ به ترتیب ۵۳,۲، ۳۵,۹ و ۰ بر حسب  $m \cdot 10^3$  به دست آمد. نمودارهای مربوط به این تغییرات در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

#### ۲-۴. سطح مقطع عدسی

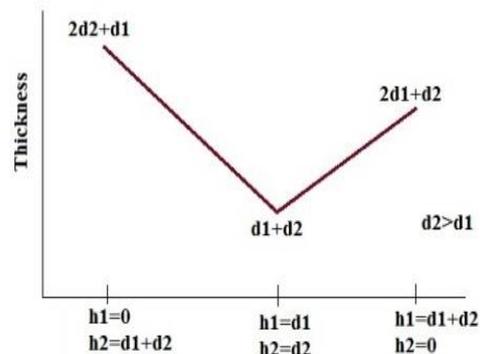
از قابلیت های این روش، تغییر سطح مقطع نخ و ساختمان پارچه است. به عنوان مثال، در اکثر پارچه های تقویت کننده کامپوزیت، سطح مقطع نخ دایره ای نیست. از جمله سطح مقطع شکل عدسی توسط محققان گزارش شده است. بنابراین سلول واحد پارچه تار پودی بر اساس سطح مقطع عدسی نخ در نظر گرفته شده است. برای این منظور، فرض بخش ۲,۱ درست است، اما مسیر انحنا و مقطع نخ تغییر می کند. فرض بر این است که منحنی ها نیز دایره ای بوده اند. شکل عدسی را می توان با همپوشانی دو دایره رسم کرد. چهار نوع بافت سلولی واحد و شکل منافذ سه بعدی به ترتیب در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که سطح مقطع عدسی برابر با سطح مقطع دایره ای در نظر گرفته شده است. قطر بزرگ و کوچک نخ اندازه گیری و محاسبه شد و سلول های واحد زیر شبیه سازی شدند.

سپس سطح مقطع دایره محاسبه شد و این مقدار نیز برابر با سطح مقطع عدسی و زمین بازی در نظر گرفته شد. فشردگی<sup>۱</sup> به عنوان مقدار ثابت ۰,۸ در نظر گرفته شد.

#### ۲-۳. سطح مقطع دایره

با توجه به توضیحات قبلی سلول واحد بافت با سطح مقطع دایره در نرم افزار کتیا شبیه سازی شد. در زیر شکل های مربوطه آمده است.

پس از شبیه سازی سلول های واحد بافت بر اساس مقادیر جدول ۳، با ثابت نگه داشتن ضخامت پارچه، مقادیر  $h$  از صفر تا حداکثر، وارد نرم افزار شد و تغییرات  $\theta$  و حجم پارچه و منفذ مورد بررسی قرار گرفت که منجر به ترسیم منحنی های زیر شد.

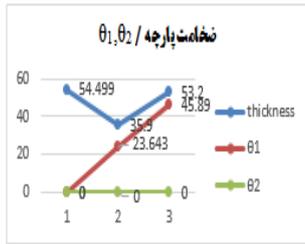


شکل ۵- نمودار رابطه ضخامت پارچه و  $h$  در چهار نوع سلول

#### واحد بافت با سطح مقطع دایره

برای شکل ۴ با جاگذاری در نرم افزار در هر ۴ نوع سلول واحد بافت، مقادیر ضخامت بر اساس تغییر  $h_1$  و  $h_2$  در نقطه شروع به ترتیب ۵۴,۵، ۳۵,۸۹۹ و ۰ و در نقطه

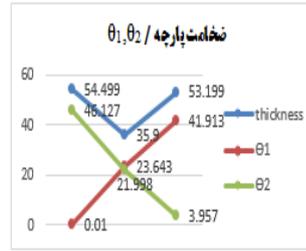
<sup>1</sup> Fraction



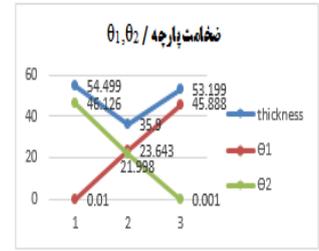
نوع ۴

$\theta_1=0, \theta_2=0$

نوع ۳

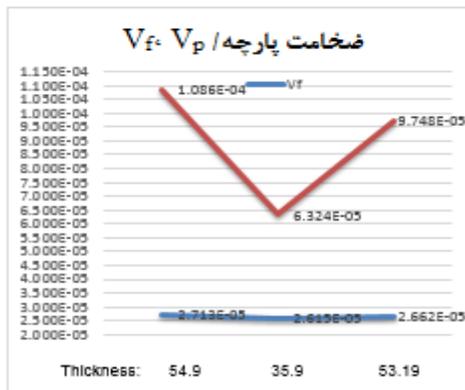


نوع ۲

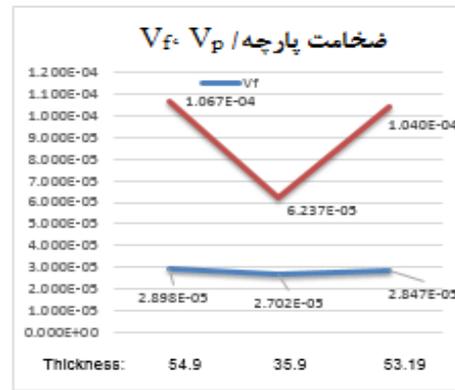


نوع ۱

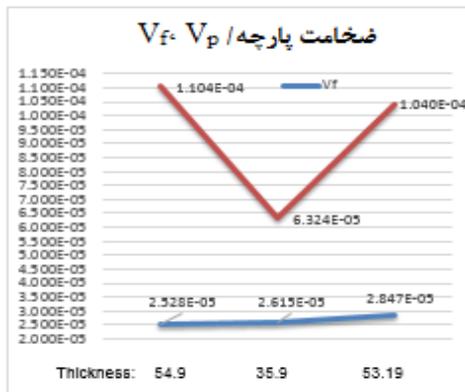
شکل ۶- نمودار رابطه ضخامت پارچه و  $\theta$  در چهار نوع سلول واحد بافت با سطح مقطع دایره



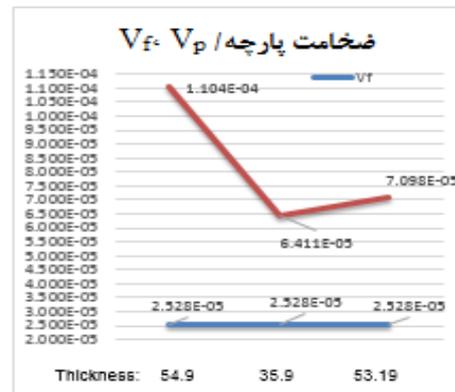
نوع ۲



نوع ۱

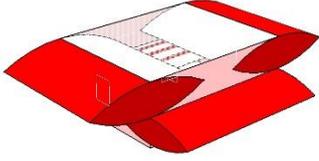
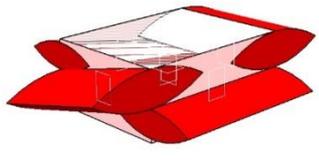
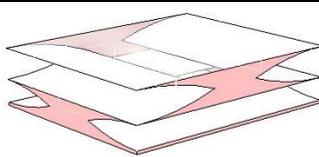
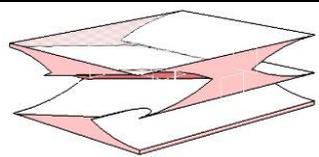
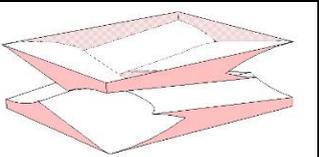


نوع ۴



نوع ۳

شکل ۷- رابطه ضخامت پارچه، حجم پارچه ( $V_f$ ) و حجم منفذ ( $V_p$ ) سلول های چهار واحد بافت با سطح مقطع دایره

				سلول بافت
				منفذ
۴	۳	۲	۱	نوع

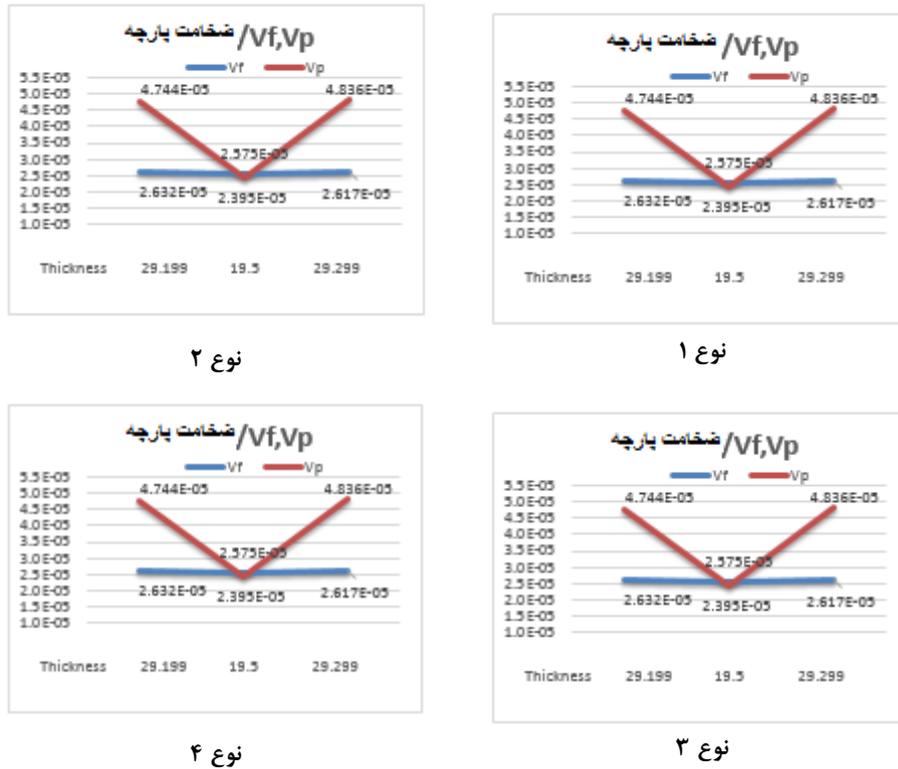
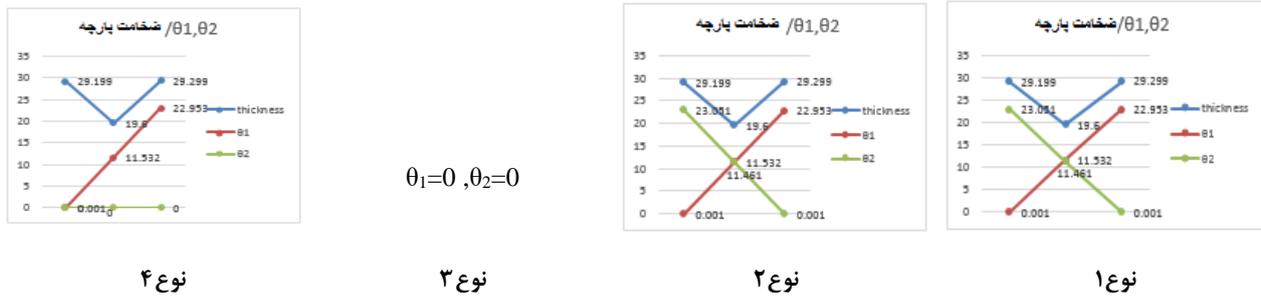
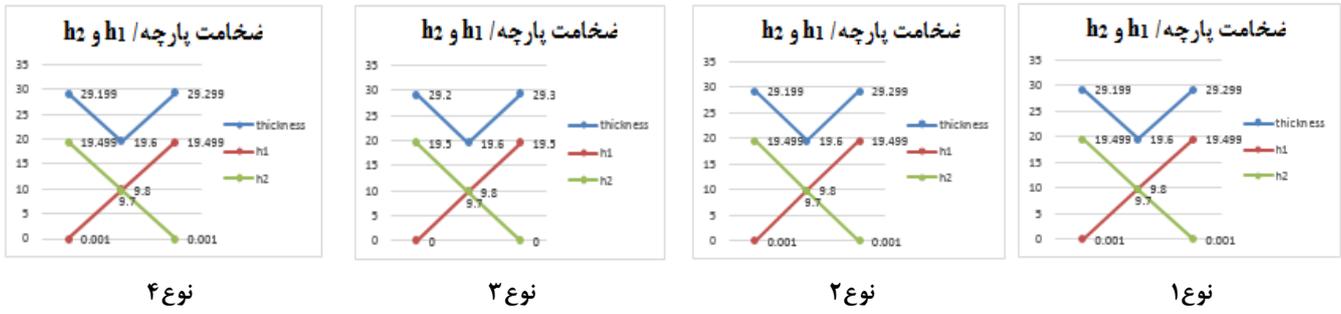
شکل ۸- مدل سه بعدی سلول های چهار واحد بافت و منافذ آن با سطح مقطع عدسی

پارامترهای ورودی مدل عدسی در نرم افزار کتیا در اندازه گیری شد. در جدول ۵ پارامترهای ورودی این جدول ۵ آمده است. قطر بزرگ (a) برای نخ تار و پود با اندازه گیری مستقیم از طریق تصویربرداری از پارچه،

جدول ۵- ورودی های مدل عدسی در نرم افزار

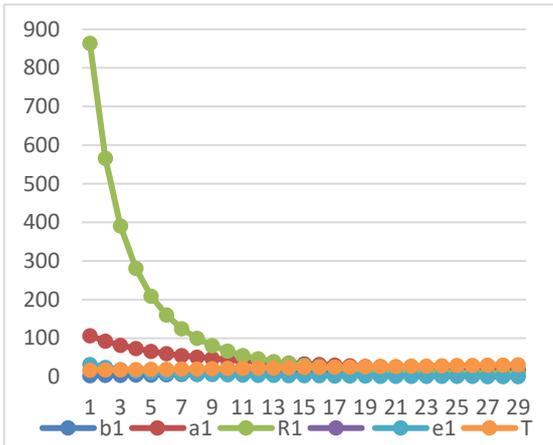
نحوه محاسبه	پارامتر	ورودی
برعکس تراکم نخ های تار بر حسب سانتی متر اندازه گیری می شود	فاصله نخ های تار	$P_1$
برعکس تراکم نخ های پود بر حسب سانتی متر اندازه گیری می شود	فاصله نخ های پود	$P_2$
محاسبه با روش فوق الذکر	قطر بزرگ نخ تار	$a_1$
محاسبه با روش فوق الذکر	قطر بزرگ نخ پود	$a_2$
محاسبه با روش فوق الذکر	قطر کوچک نخ تار	$b_1$
محاسبه با روش فوق الذکر	قطر کوچک نخ پود	$b_2$
با ضخامت سنج در فشار مکش مورد نظر اندازه گیری می شود	ضخامت پارچه	T
قابل تغییر / $T = h_1 + d_1$ یا $T = h_2 + d_2$ هر کدام بزرگتر هستند	دامنه نخ تار	$h_1$
قابل محاسبه از $d_1 + d_2 = h_1 + h_2$	دامنه نخ پود	$h_2$
قابل محاسبه از $c_1 = \frac{l_1 - P_2}{P_2}$ و $\theta_1 = 2\sqrt{C_1}$	زاویه نخ تار	$\theta_1$
قابل محاسبه از $c_2 = \frac{l_2 - P_1}{P_1}$ و $\theta_2 = 2\sqrt{C_2}$	قطر نخ پود	$\theta_2$

نمودارهای مربوط به پارامترها و تغییرات ضخامت پارچه در شکل های ۹ و ۱۰ برای سطح مقطع عدسی نشان داده شده است.

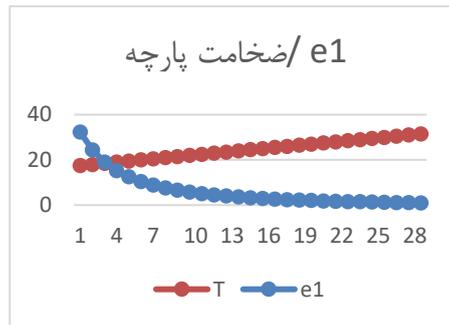


عدسی نشان می دهد. همچنین این شکل تغییر قطر کوچک و بزرگ و شعاع عدسی و نسبت قطرهای بزرگ به قطرهای کوچک را نشان می دهد که تأثیر آن بر ضخامت عدسی نشان داده شده است.

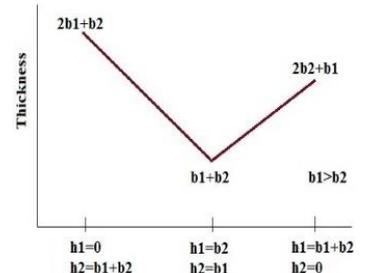
نمودار ۱۱ مربوط به اثر تغییرات ضخامت پارچه بر حجم پارچه و منفذ آن است. در بخش قبل، مقطع دایره فقط قطر (d) داشت، اما در اینجا قطر بزرگ و کوچک (a, b) وجود دارد. "e" نسبت a/b در عدسی است. شکل ۱۲ رابطه بین ضخامت پارچه و e را در سطح مقطع



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- نمودار و شماتیک رابطه بین ضخامت پارچه و (الف) h, (ب) e (ج) R, a, b, e در چهار سلول واحد بافت با سطح مقطع عدسی

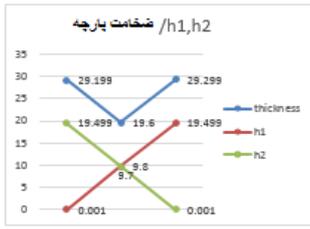
در ادامه، تأثیر تغییر ضخامت پارچه بر پارامترهای  $h, \theta, V_p$  و  $V_f$  توسط مدل نرم افزاری در مقطع دایره، عدسی و زمین بازی بررسی و نمودارهای آن در شکل های ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است.

## ۵-۲. سطح مقطع زمین بازی

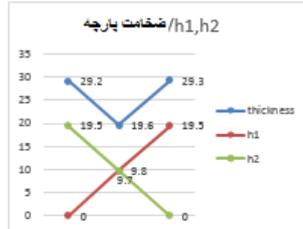
سپس در نرم افزار کتیا طبق توضیحات قبلی سلول واحد بافت با سطح مقطع زمین بازی شبیه سازی شد.

				سلول بافت واحد
				منفذ
۴	۳	۲	۱	نوع

شکل ۱۳- مدل سه بعدی سلول های چهار واحد بافت و منافذ آن با سطح مقطع زمین بازی



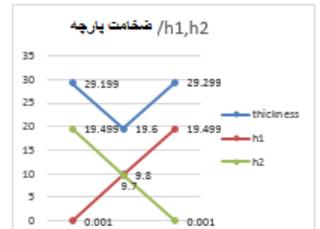
نوع ۴



نوع ۳

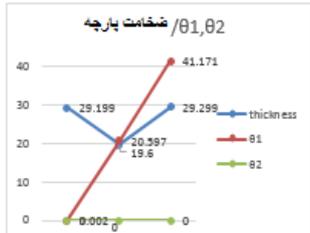


نوع ۲



نوع ۱

شکل ۱۴- نمودار رابطه ضخامت پارچه و  $h_1$ ,  $h_2$  در چهار نوع سلول واحد بافت با سطح مقطع زمین بازی

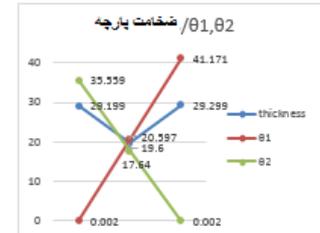


نوع ۴

$$\theta_1=0, \theta_2=0$$



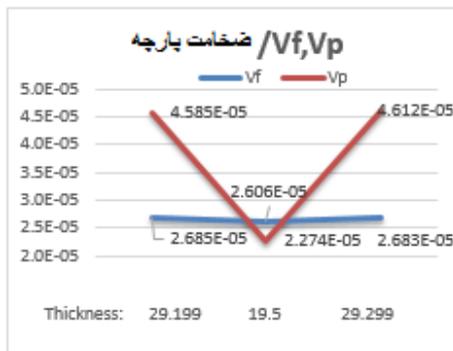
نوع ۳



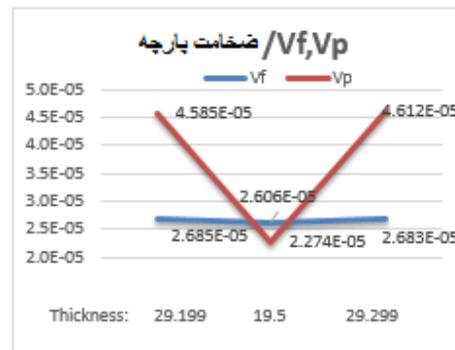
نوع ۲

نوع ۱

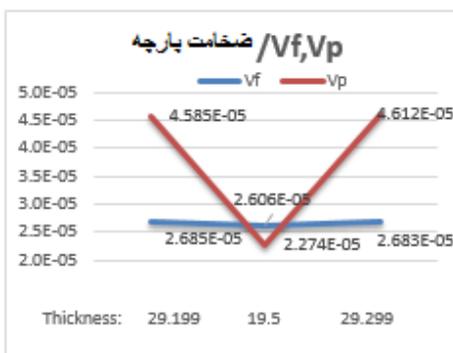
شکل ۱۵- نمودار رابطه ضخامت پارچه و  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  در چهار نوع سلول واحد بافت با سطح مقطع زمین بازی



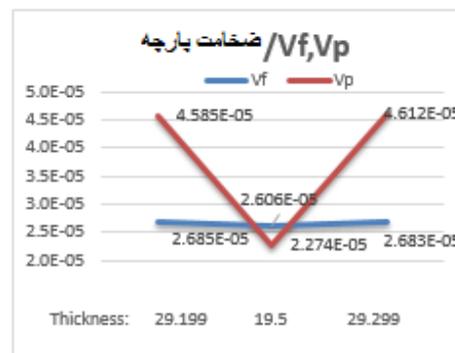
نوع ۲



نوع ۱



نوع ۴

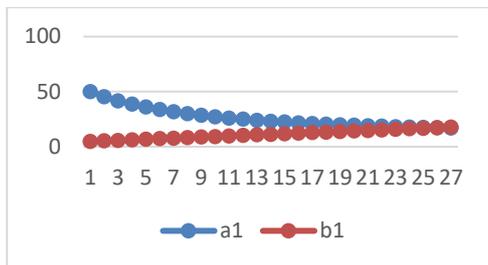


نوع ۳

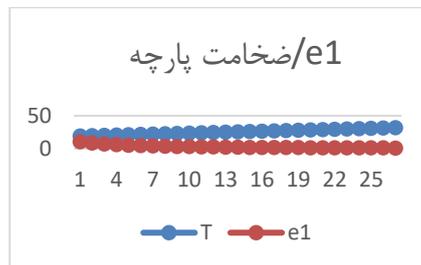
شکل ۱۶- نمودار رابطه ضخامت پارچه با حجم پارچه ( $V_f$ ) و حجم منفذ ( $V_p$ ) در چهار نوع سلول واحد بافت با سطح مقطع زمین بازی

نمودارهای شکل ۱۷ ارائه شده است.

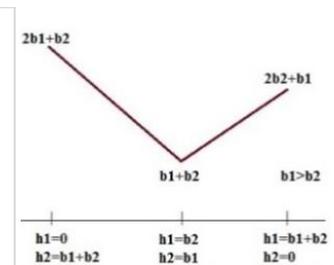
نمودارهای تغییرات ضخامت پارچه با تغییر برخی پارامترهای ساختاری نخ در سلول های واحد بافت در



(ج)



(ب)

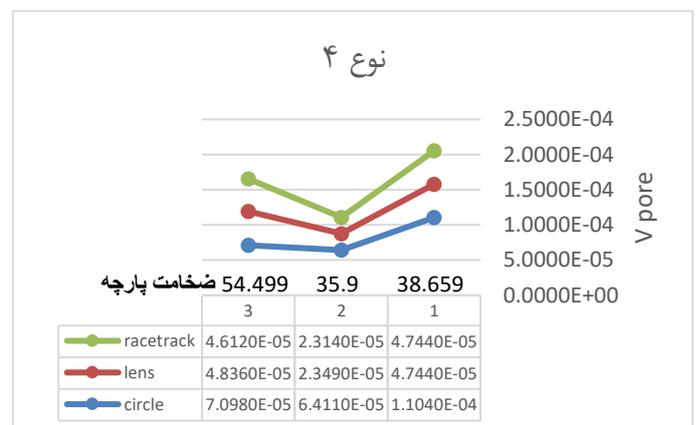
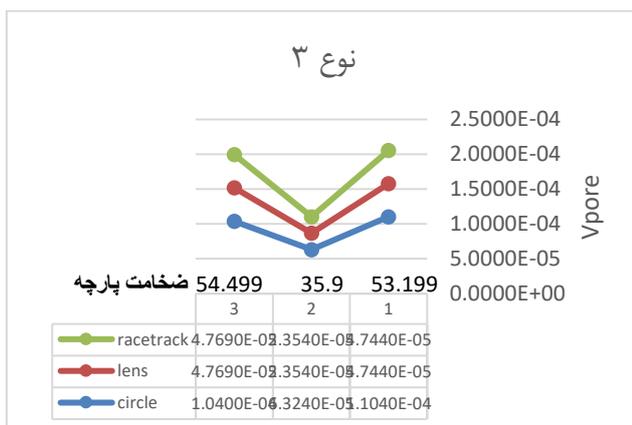
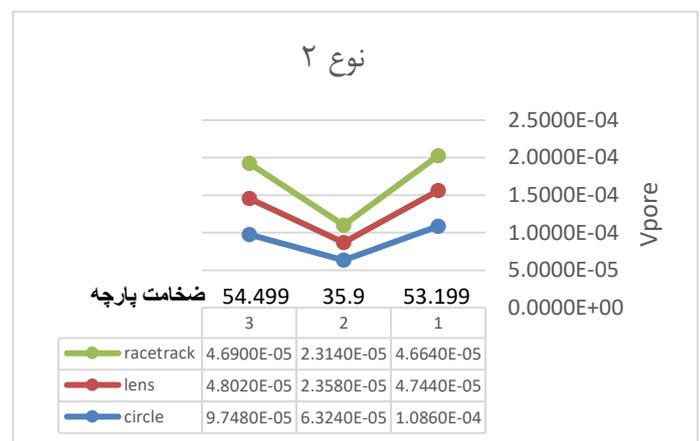
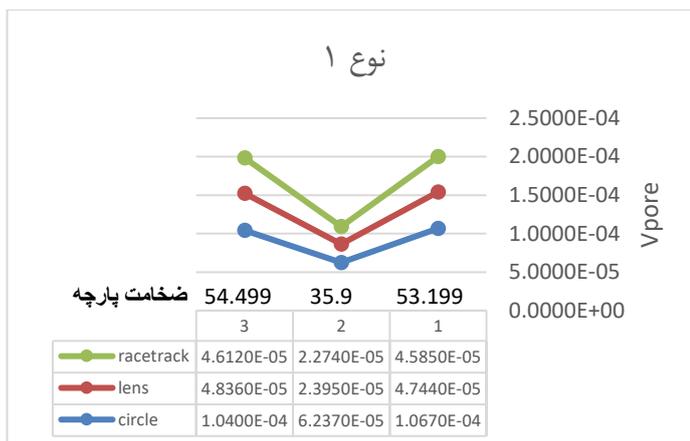


(الف)

شکل ۱۷- نمودار رابطه ضخامت پارچه با 'h، e، a و b در چهار نوع سلول واحد بافت با سطح مقطع زمین بازی

همانطور که مشاهده می شود، حجم منافذ با تغییر سطح مقطع تغییر می کند.

در نمودارهای شکل ۱۸ تغییرات حجم منافذ با تغییر سطح مقطع نخ در سلول های واحد بافت ارائه شده است.



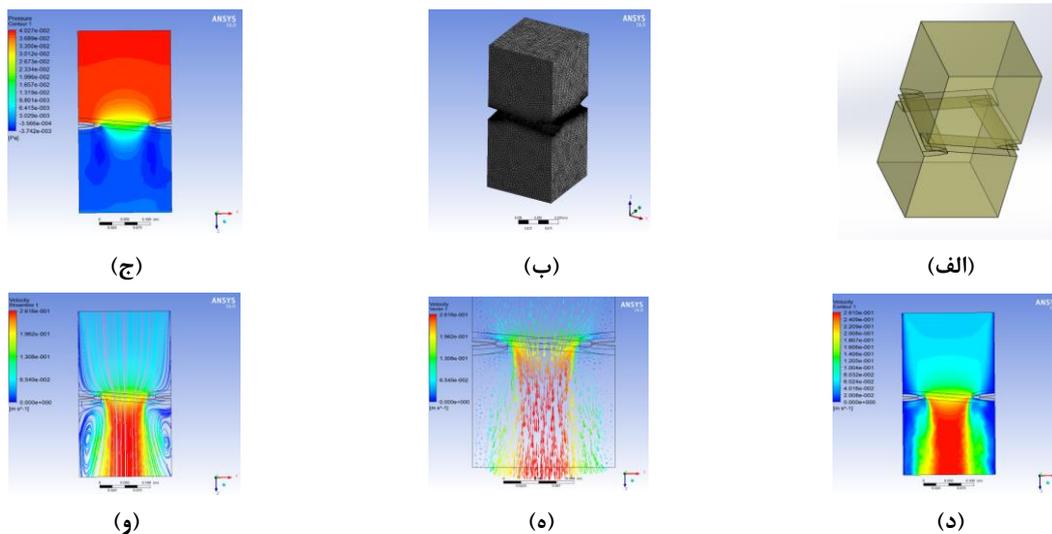
شکل ۱۸- رابطه بین سطح مقطع نخ و حجم منافذ با سطح مقطع زمین بازی

تغییرات بین سطح مقطع عدسی و زمین بازی کم است و با سطح مقطع دایره قابل توجه است. در تجربه، ضخامت پارچه شیشه عملاً کمتر از مجموع قطرهای تار و پود در سلول واحد بافت است. اما حجم منافذ دو مقطع دیگر به هم نزدیک است و حجم منفذ سطح مقطع زمین بازی کمتر از عدسی است.

### ۲-۶. تأثیر نوع سلول واحد بافت بر نفوذپذیری هوا

برای تعیین نفوذپذیری هوا یک مکعب مستطیل  $182 * 182 * 364$  سانتی متر طراحی شد. از خروجی نرم افزار کتیا برای ورودی نرم افزار فلوئنت استفاده شد. در هر چهار نوع سلول، شرایط یکسانی در نظر گرفته شد. همچنین قطر کوچک نخ ها یکسان در نظر گرفته شد. شماتیک این هندسه در شکل ۱۹(الف) نشان داده شده است. سپس بر اساس این هندسه، شبکه سازی در شکل ۱۹(ب) انجام شد. سرعت ۵ سانتی متر بر ثانیه برای

جریان هوا در نظر گرفته شد. توزیع فشار و سرعت عبور از سلول واحد مطابق شکل ۱۹(ج) بود. همانطور که در شکل ۱۹(د) (کنترل فشار) مشاهده می کنید، جریان هوا از طریق سلول واحد به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. به عبارت دیگر، فشار استاتیکی سیال به فشار دینامیکی تبدیل می شود. نحوه سرعت بخشیدن به جریان عبوری از سلول واحد به خوبی در شکل ۱۹(الف) (میزان سرعت سنج) نشان داده شده است. مشاهده می شود که اگر دبی جریان در بالادست ۵ سانتی متر بر ثانیه باشد، حداکثر سرعت سیال پس از عبور از سلول واحد ۲۶ سانتی متر بر ثانیه خواهد بود. نحوه سرعت بخشیدن به جریان و جریان گرداب حاصل در پشت سلول واحد به خوبی در شکل ۱۹(و) نشان داده شده است. به عبارت دیگر، جریان در ناحیه پشتی سلول واحد می چرخد و جریان گردابی حاصل می شود. این جریان باعث افت می شود.



شکل ۱۹- شبیه سازی نفوذپذیری هوا سلول واحد بافت در نرم افزار فلوئنت

نشان داده شده است.

نتایج عبور هوا در چهار سلول واحد بافت در شکل ۲۰

		<p>کنتور فشار</p>
		<p>کنتور سرعت</p>
<p>نوع ۲</p>	<p>نوع ۱</p>	<p>نوع سلول بافت</p>
		<p>کنتور فشار</p>
		<p>کنتور سرعت</p>
<p>نوع ۴</p>	<p>نوع ۳</p>	<p>نوع سلول بافت</p>

شکل ۲۰- مقایسه نفوذپذیری هوا برای نوع سلول واحد بافت در نرم افزار فلونت

با توجه به بردارهای سرعت در ۴ نوع سلول بافت، همان طور که مشاهده می شود حداکثر بردارهای سرعت جریان در نوع ۳ و ۴ بسیار بزرگتر نسبت به انواع ۱ و ۲ هستند. به عبارت دیگر، می توان نتیجه گرفت که نفوذپذیری هوا در نوع ۳ بیشتر از بقیه وضعیت ها است. همانطور که از شکل ها بر اساس قانون برنولی مشاهده می شود، فشار در ورودی افزایش یافته و با پایین آمدن خروجی، فشار کاهش می یابد اما سرعت آن به خروجی افزایش می یابد. بر اساس بردارهای جریان در گلوگاه چهار سلول واحد به ترتیب نفوذپذیری هوا، به ترتیب، بیشتر از سلول های واحد نوع ۳ و نوع ۴ و نوع ۲ و نوع ۱ است.

### ۳. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، برای اندازه گیری حجم منافذ پارچه های تاری پودی، رویکرد جدیدی به عنوان شبیه سازی نرم افزاری توسعه داده شده است. شکل سه بعدی منافذ برای نخ های با سطح مقطع دایره و عدسی و زمین بازی با ۴ نوع سلول واحد بافت با استفاده از روش نرم افزار کتیا شبیه سازی شد. در این مقاله بر خلاف سایر مقالات، به جای هندسه سلول واحد، شکل و حجم سه بعدی پارچه و منافذ شبیه سازی شده است. لازم به ذکر است که بسیاری از پدیده های مهم مانند ایجاد حباب در فرآیند تهیه کامپوزیت، جذب آلودگی در فیلترهای هوا در این بخش رخ می دهد و نیز قابل کاربرد در چاپگرها و چاپ سه بعدی است. در ضمن استفاده از نرم افزار کتیا و قابلیت های آن در شبیه سازی در مقالات مشاهده نشد. مدل های ارائه شده اجازه تغییر در سلول ها و منافذ واحد را

نمی دادند، یا ممکن بود در مونتاژ سلول های واحد یا منافذ مختلف مشکل داشته باشند. شبیه سازی سه بعدی پارچه فرآیند پیچیده ای است که اجرای آن ملزوم به داشتن دانش در رشته های متفاوت مانند مهندسی نساجی، رایانه و مکانیک است. در مقاله حاضر ابتدا روش بکر مورد سنجش قرار گرفت. توافق خوبی بین روش نرم افزاری و روش بکر به عنوان شاهد مشاهده شد. سپس مدل شبیه سازی شده در رزین زنی کامپوزیت با ماتریس پارچه شیشه مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نرم افزار با نتایج تجربی مقایسه شده که از دقت خوبی برخوردار بود و در مقاله ای منتشر گردید. نتایج نشان داد با تغییر ضخامت کامپوزیت، دامنه و زاویه نخ ها بصورت خطی و معکوس تغییر می کند. تغییرات حجم پارچه در شرایط مختلف سلول واحد زیاد نیست. با افزایش دامنه نخ ها، حجم منافذ به صورت خطی افزایش می یابد. شکل سطح مقطع بر دامنه نخ ها تأثیر می گذارد. سرعت جریان هوا در جهت عمودی از سلول واحد نوع ۳ به نوع ۴، ۲ و ۱ کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که روش ارائه شده یک رویکرد مؤثر، ساده و دقیق برای ارزیابی سلول واحد پارچه و شکل منافذ سه بعدی است. همچنین از قابلیت های این روش محاسبه هندسه منافذ کل به صورت یک شکل سه بعدی از پارچه تاری پودی با سطح مقطع نخ و ساختار پارچه است که برای بررسی نفوذ سیال از ماتریس با چندین لایه پارچه مفید خواهد بود. برای تهیه کامپوزیت پارچه ای، دانستن اثر وجود پارامترهای ساختاری بر روی حجم و شکل منافذ پارچه

رزین و شرایط نفوذ و انتشار رزین کمک می کند.

#### ۴. منابع

[1] R. B. Turan, A. Okur, (2012), Investigation of pore parameters of woven fabrics by theoretical and image analysis methods, Journal of the Textile Institute, 875-884.

[2] Nazari Sh., and Co., Design of modular clothing using 3D printing technology with the approach to sustainability in fashion, Journal of Apparel and Textile Science and Technology, Volume 13, Issue 3 - Serial Number 51, Pages 83-104, September (2024).

[3] P. D. Dubrovski, (2001), A Geometrical Method to Predict the Macro porosity of Woven Fabrics, Journal of The Textile Institute, 288-298.

[4] Dubrovski P. D. Porosity of the Flat Textiles. Sciyo, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, (2010).

[5] Q. Zhao, Simulation of 3D digital design of clothing fabrics based on optical imaging detection and image acquisition, Optical and Quantum Electronics, vol. 56, no. 4, pp. 1-18, (2024).

[6] S. Backer, (1951), The relationship between the structural geometry of a textile fabric and its physical properties. Part IV: Interstice geometry and air permeability, Textile Research Journal, 703-714.

[7] D. Marlena Kuhr, Aibibu and C. Cherif, (2016), Targeted partial finishing of barrier textiles with micro particles, and their effects on barrier properties and comfort, Journal of Industrial Textiles, Vol.45 (5), 853-878.

[8] R. Tugrul Ogulata, Serin Mezarcioz, (2012), Total porosity, theoretical analysis, and prediction of the air permeability of woven fabrics, Journal of the Textile Institute, 103:6, 654-661.

[9] X. Xiao, X. Zeng, (2012), An analytical model for through-thickness permeability of woven, Textile Research Journal, vol. 82(5), 492-501.

[10] Thanikai Vimal J., Effect of weave parameters on air resistance of woven fabrics produced from compact doubled yarn, Indian Journal of Fiber & Textile Research, 42 (2017) 196.

[11] Radostina A. Angelova, C. R. Acad. Bulg. Sci., ۷۳, No ۱, (2020).

ضروری است. این اطلاعات به انتخاب صحیح نوع پارچه و

[12] Payvandy P., Mozafary V., Fabric Simulation Using Mass-Spring Model (Review), Journal of Apparel and Textile Science and Technology, Volume 5, Issue 4 - Serial Number 17, March (2016), Pages 43-66.

[13] X. Xiao, X. Zeng, P. Bandara & A. Long, (2012), Experimental study of dynamic air permeability for woven fabrics, Textile Research Journal, 82(9), 920-930.

[14] Resin Capacity of Technical Woven Fabrics: Pore Volume and Pore Shape Simulation

Sharafat H.R., Dolatabadi M.K., Jeddi A.A.A. (2020) Fibers and Polymers, 21 (11), pp. 2664-2674.

[15] Rouquerol F. Adsorption by Powder and Porous Solids. San Diego, USA: Academic press, (1999).

[16] Viera Glombikova R, Nemcokova P, Komarkova & Kus Z, Evaluation of liquid moisture transport in textile structures, Indian Journal of Fiber & Textile Research, 43 (2018) 74.

[17] Hu, J. Structure and mechanics of woven fabrics, Woodhead publishing Ltd, & CRC press, (2004).