بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی نساجی

تحلیل اثر نایکنواختی های موضعی بر رفتار کششی پارچه های تاری پودی

رساله دکتری مهندسی نساجی – تکنولوژی نساجی

میثم معزی

استاد راهنما

دکتر محمد قانع

۱۳۹۲

تقدیم به همسر مهربان وفرزند دلبندم

تشکرو قدردانی

اکنون که به فضل وکرم باریتعالی اتمام این رساله میسر گردید، برخود لازم می دانم ازکلیه کسانی که در این امرمرا یاری نمودند وموجبات موفقیتم را فراهم نمودند تشکروقدردانی کنم:

- تشکروسپاس ویژه از استادمحترم،جناب آقای دکترمحمد قانع که با راهنمایی های عالمانه شان، راهگشایم بودند.
- تشکروسپاس ویژه ازاساتیدمحترم، آقایان دکترمحمود فرزین، دکتر داریوش سمنانی و دکتر رضا جعفری ندوشن که با مشاورت های بی دریغ شان، همراهم بودند.
- تشکر قلبی از همسر و فرزند دلبندم و پدر ومادرم که در این مسیر دشوار همراه بی منت بودند.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج، ابتکارات ونوآوری های

ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه

صنعتی اصفهان است

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب.....هشت

چکیده..... ۱

فصل اول: مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱-۲ مطالعات انجام شده درخواص مکانیکی پارچه ها..... ۳

۱-۲-۱ مقدمه..... ۳

۱-۲-۲ نگرش ماکراسکوپی در مکانیک محیط پیوسته..... ۴

۱-۲-۳ نگرش مزوسکوپیک در مکانیک محیط پیوسته..... ۸

الف) مدل های مکانیکی - هندسی..... ۹

ب) روش انرژی کرنشی..... ۱۵

۱-۲-۴ نگرش درمقیاس مزو..... ۱۶

۱-۲-۵ نگرش درمقیاس میکرو..... ۱۹

الف) آنالیزهای میکرومکانیکی..... ۲۰

ب) آنالیزهای المان های دیجیتال چند زنجیری..... ۲۱

۱-۳ نایکنواختی در منسوجات..... ۲۲

۱-۳-۱ نایکنواختی مواد اولیه..... ۲۲

الف) نایکنواختی های کششی..... ۲۳

ب) نایکنواختی های پریودیک..... ۲۳

۱-۳-۲ نایکنواختی در حین تولید منسوج..... ۲۶

۱-۳-۳ نایکنواختی در شرایط مصرف..... ۲۶

۱-۳-۴مطالعات انجام شده درزمینه تخریب نوری نایلون ۶۶..... ۲۷

الف) آنالیز طیف سنجی جرمی گازهای خارج شده و مواد جامد باقیمانده..... ۲۹

ب) تخریب نوری لایه های نایلون۶۶، در حضور و عدم حضور پایدار کننده های نوری..... ۲۹

ج) فتولیز و اکسیداسیون نوری نایلون ۶۶ با یک لامپ بخار جیوه با فشار بالا به عنوان منبع نوری..... ۲۹

د) کراس لینک شدن و تخریب از نوع پارگی زنجیر..... ۳۰

ه) مکانیسم های رادیکال آزاد..... ۳۰

فصل دوم: تئوری رساله

۲-۱ مقدمه..... ۳۱

۲-۲ روش آزمایش ازدیاد طول اریب..... ۳۳

۲-۳ مدل غیر متعامد در مکانیک محیط پیوسته..... ۳۴

۲-۴ مدل متشکله غیر متعامد برای پارچه..... ۳۷

۲-۵ روش المان محدود برای مسائل هندسی غیر خطی..... ۴۰

فصل سوم: تجربیات

۳-۱ مقدمه..... ۴۴

۳-۲ مواد مورد استفاده..... ۴۵

۳-۳ روش اعمال نایکنواختی در پارچه ها یا ایجاد تغییرات در خواص ماده..... ۴۶

۳-۴ روش شناسایی و اندازه گیری نایکنواختی..... ۴۸

الف)ویژگی های سطحی..... ۴۸

ّب) تغییردر ویژگی های فیزیکی..... ۴۸

ج) تغییردر میزان رنگ جذب شده در الیاف نایلون..... ۴۹

۳-۴-۱ روش رنگرزی و برآورد مقادیر رنگ..... ۵۱

۳-۴-۲ ارزیابی پاسخ نمونه های تشعشع دیده و ندیده به بارگذاری های کششی..... ۵۲

الف) جهت پود..... ۵۳

ّب) جهت تار..... ۵۵

ج) جهت مورب ۵۶
۳-۵ طبقه بندی نایکنواختی با استفاده از شبکه عصبی و تجزیه و تحلیل رگرسیونی ۵۸
۳-۶ مدلسازی پارچه ها ی یکنواخت و نایکنواخت در تست ازدیاد طول اریب ۶۱
۳-۶-۱ آماده سازی نمونه یکنواخت و نایکنواخت ۶۱
۳-۶-۲ مدل المان محدود واجرا مدل ماده درآباکوس /صریح ۶۲
۳-۷ اعمال با رگذاری و گرفتن تصاویر و آنالیز تصویر ۶۳
فصل چهارم: نتایج و بحث
۴-۱ مقدمه ۶۴
۴-۲ پیش بینی تغییرات خواص ماده بر حسب زمان نوردهی ۶۵
الف) جهت پودی ۶۵
ب) جهت مورب ۶۶
ّج) نرخ افت چقرمگی ۶۷
د) راستی آزمایی مدل ۶۸
۴-۳ پیش بینی خواص ماده با استفاده از خصوصیات ظاهری مثل رنگ ۶۹
۴-۳-۱ تعیین پارامتر های منحنی تنش کرنش از طریق روش رگرسیونی ۷۰
الف) جهت پودی ۷۰
ب) جهت مورب ۷۱
۴-۳-۲ تعیین پارامتر های منحنی تنش کرنش از طریق روش شبکه عصبی ۷۳
۴-۳-۳ راستی آزمایی مدل ها ۷۳
۴-۴ مقایسه نتایج مدل المان محدود برای پارچه های یکنواخت و نایکنواخت درتست ازدیاد طول اریب ۷۴
۴-۴-۱ پاسخ مدل المان محدود برای پارچه ی یکنواخت درتست ازدیاد طول اریب ۷۴
۴-۴-۲ پاسخ مدل المان محدود برای پارچه ی نایکنواخت درتست ازدیاد طول اریب ۷۶
فصل پنجم: نتیجه گیری کلی و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری کلی ۷۹
۵-۲ پیشنهادات ۸۰
مراجع ۸۱

چکیده

در مطالعه رفتار پارچه، معمولافرض می شودکه پارچه یکنواخت است. با این وجود در عمل بعضی از منابع نایکنواختی های موضعی مثل نایکنواختی جرمی نخ ها و یا نایکنواختی های ناشی از تخریب اشعه ماوراء بنفش وجود دارد. بنابراین خواص مکانیکی پارچه ها نایکنواخت بوده و از ناحیه ای به ناحیه دیگر متفاوت خواهد بود. هدف اصلی این رساله توجه و بررسی اثر نایکنواختی های موضعی بر رفتار کششی پارچه ها در مقیاس ماکرو می باشد. در ابتدا نمونه پارچه ها یی از نایلون ۶۶ به عنوان پود و پلی استر به عنوان تارتهیه گردیده و با استفاده از تابش اشعه ماوراء بنفش تخریب گردید. برای اعمال تخریب کنترل شده از زمانهای مختلف نوردهی از صفر ساعت تا ۲۸ ساعت به فاصله هر ۷ساعت استفاده شد. سپس نمونه ها رنگ گردید. در این راستا شش پارامتر در منحنی های تنش –کرنش در نظر گرفته شدکه این پارامترهانیز برای هر نمونه رنگ شده با استفاده ازدستگاه آزمایش کشش برآورد گردید. ارتباط رفتار کششی با مقادیر رنگ نمونه ها با استفاده از روش رگرسیونی وشبکه عصبی بدست آمد. به موازات این کار مدلسازی در مقیاس ماکرو برای رفتار پارچه نایکنواخت در بارگذاری های تک محوری انجام گردید. این مدلسازی با استفاده ازروش المان محدود و زیربرنامه ای برای بیان رفتار ماده در نرم افزار تجاری آباکوس انجام شد. در ادامه دو نمونه پارچه برای آزمایش ازدیاد طول اریب تهیه گردید. یکی از نمونه ها حاوی نواحی تشعشع دیده با الگوی از پیش تعیین شده بود. و نمونه دوم نمونه تشعشع ندیده بود. هر دو نمونه تحت آزمایش ازدیاد طول اریب قرار گرفته و نتایج تجربی با نتایج عددی مورد مقایسه و بحث قرار گرفت. در نهایت تنش برشی توسط المان محدود محاسبه شده و در نقاط مشخصی در درون نمونه برآورد گردید. مقایسه نتایج نشان داد که نتایج تجربی همخوانی خوبی با نتایج مدل در پارچه های یکنواخت و نایکنواخت دارد.

کلمات کلیدی: پارچه های با بافت تافته، رفتار کششی غیر متعامد، اکسیداسیون نوری، روش المان محدود و نایکنواختی های موضعی

فصل اول

مروری بر مطالعات انجام شده

۱ ـ مقدمه

از ابتدای تولید منسوج توسط بشر یکی از دغدغه های تولید کنند گان منسوج، جلوگیری از بروز نایکنواختی چه از لحاظ خواص کاربردی و چه از لحاظ ظاهر منسوج می باشد. لذا نایکنواختی در منسوجات با توجه به زمان ایجاد آن، الگوهای بوجود آمده و تکنیک های شناسایی آن مورد توجه قرار گرفته است.

در سالهای اخیر اهتمام به مدلسازی منسوجات و پیش بینی خواص مکانیکی آن توسط محققین بسیاری مورد توجه قرار گرفته است اما به دلیل پیچیدگی مسئله، لزوم استفاده از تجهیزات و طراحی آزمایش های پیشرفته ، محدودیت های زبان های برنامه نویسی و نیز نوشتن کدهای متنوع در این مدلسازی ها به موضوع مهم نایکنواختی منسوجات و اثرات قابل توجه آن در پیش بینی خواص منسوج نهایی پرداخت نشده است. لذا در این رساله سعی شده تا منسوجات نایکنواخت مدلسازی شده و اثرات نایکنواختی درخواص پیش بینی شده مورد ارزیابی قرارداده شود.

۱-۲ مطالعات انجام شده درخواص مکانیکی پارچه ها

۱-۲-۱ مقدمه

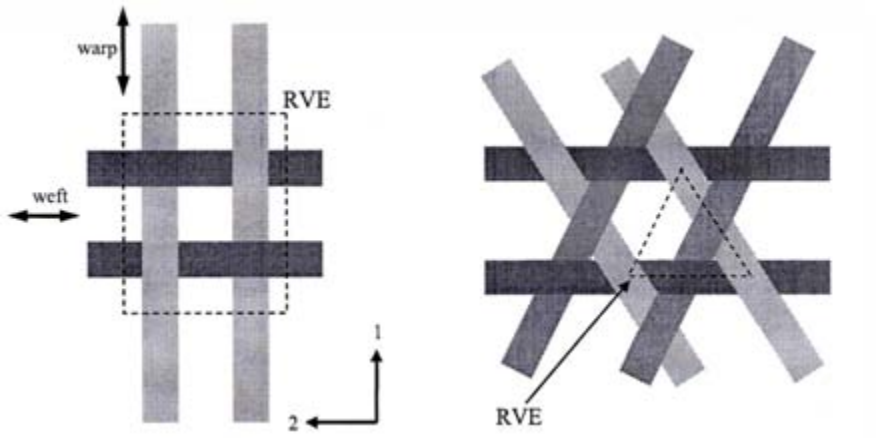
طراحی و تولید مجازی مصنوعات صنعتی می تواند سبب افزایش معنی دار راندمان تولید و کاهش هزینه های آن گردد. این موضوع باعث انگیزه شدیدی در صنایع نساجی شده تا تکنولوژی شبیه سازی را در منسوجات گسترش دهند. دراین راستا خواص مکانیکی منسوجات با بافت تاری پودی به طور وسیع مورد مطالعه قرارگرفته و تخمین های عددی همانند حل های آنالیزی برای جزءبه جزء تنش ها، نتایج قابل قبولی فراهم نموده است.[۱, ۲]

تکنیک های بافت زیادی در صنعت نساجی وجود دارد، که بطور اخص دو کلاس اصلی از روش های بافت قرار می گیرندکه عبارتند از:

۱- ساختار های بافت متعامد

۲- ساختارهای بافت غیر متعامد

درقسمت (الف) شکل(۱-۱) پیکربندی غیر متعامد نمایش داده شده است که نخ ها دراین پیکر بندی دارای زاویه قائمه نسبت به هم نیستند. که این ساختار در بافت منسوجاتی مانند قیطان یا نوار به کار می رود. درقسمت (ب) شکل(۱-۱) ساختار بافت متعامد نمایش داده شده که نخ ها به صورت عمود بر هم قرار گرفته اند. [۳-۷]



(ب) (الف)

شکل ۱-۱ : (الف) پیکربندی غیر متعامد و (ب) ساختار بافت متعامد [۱]

هنگام بررسی مکانیکی منسوجات می توان فرض کرد که رفتار منسوج با توجه به هر یک از موارد ذیل مدل سازی شود.

ـ خواص نخ مصرفی وساختار بافت

ـ تنظیمات فرایند بافت(کشیدگی در نخ های تار یا پودو...)

ـ تکمیل های نساجی صورت گرفته(اضافه نمودن رزین و...)

ـ تاریخچه مواد(مانند بارگذاری های قبلی و...)

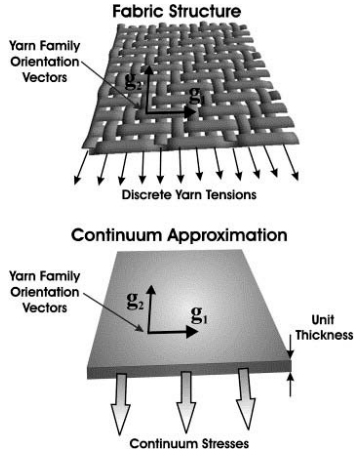
- نوع تغییر شکل منسوج درحین بارگذاری

- نوع بارگذاری در شرایط مصرف

لذا بررسی منسوجات نیاز به درک صحیح از خواص مکانیکی آنها دارد . علیرغم تصورات ساده خواص مکانیکی منسوجات به سبب تلاقی ذاتی نخ ها در ساختارشان بسیار پیچیده است. با توجه به تلاش های وسیع جهت ارائه مدل مؤثر برای پارچه، مدل کاملی که بتواند همه جوانب تغییر شکل پارچه را در نظر بگیرد ارائه نشده است. بنابراین نگرش های مختلفی در مکانیک منسوجات و پارچه ها انجام گرفته که از نقطه نظر دقت و پیچیدگی از یکدیگر متمایز می گردند.

۱-۲-۲ نگرش ماکروسکوپی در مکانیک محیط پیوسته

اگر چه یک پارچه از دو گروه نخ تشکیل شده، ولی زمانی که قطعات بزرگ پارچه مدل سازی می شود می توان از مکانیک محیط پیوسته استفاده نمود. بنابراین پارچه می تواند به صورت یک محیط پیوسته و عاری از گسستگی در ریز ساختارش مورد بحث قرار گیرد و در این راستا از تئوری الاستیسیته و مکانیک محیط پیوسته مورد استفاده در جامدات برای مدل سازی آن استفاده می گردد. در شکل(۱-۲)بطور شماتیک نگرش ماکروسکوپی در منسوجات، نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲: مدلسازی منسوجات درنگرش ماکروسکوپی[۸]

در سال ۱۹۶۳ ،کیلبی [۹] برای اولین بار از تئوری الاستیسیته در مدل سازی پارچه استفاده نمود. او روابط تنش ـ کرنش موجود در یک سطح را در پارچه ای که به شکل شبکه ساده سازی شده بود ارائه نمود. وی در این راستا از تجزیه و تحلیل های مرسوم در تئوری الاستیسیته بهره گرفت. وی به واسطه بررسی هایش، پیش بینی نمود که مدول یانگ پارچه، تابعی از زاویه بارگذاری در سطح پارچه است. شاناهان، لیود و هرل[۱۰] از تئوری صفحات و پوسته ها برای شناخت رفتار الاستیک پارچه ها در تغییر شکل های پیچیده استفاده نمودند. ساده ترین شکل این تئوری اعمال فرضیات ذیل بود.

۱- مواد همگن هستند.

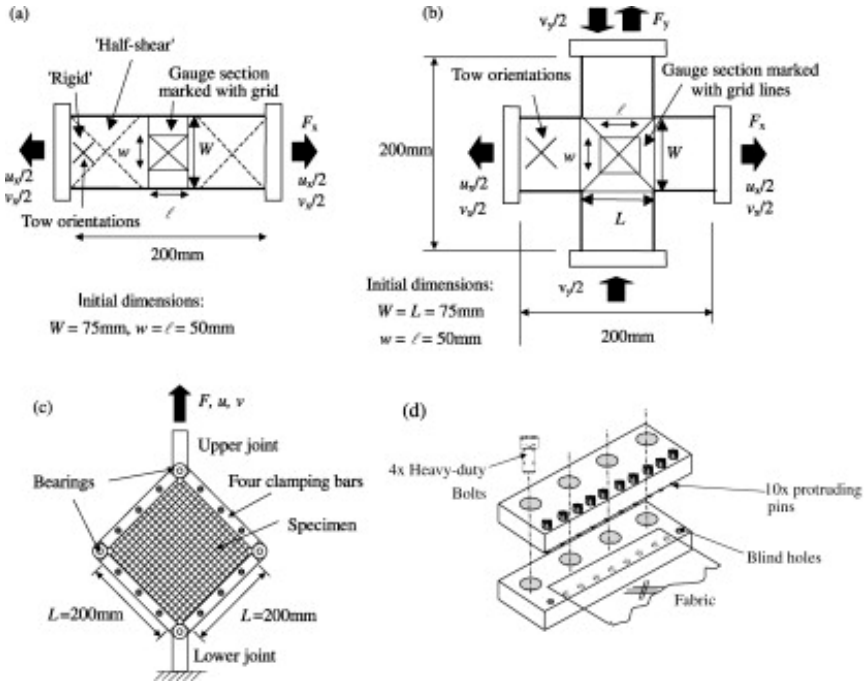
۲- کرنش ها و جابجایی ها کوچک می باشند.

۳- رفتار مواد الاستیک خطی می باشد.

علیرغم کاستی های این تئوری در مسائل کاربردی، آنها معادلاتی برای سختی های کششی، برشی، خمشی و پیچشی پارچه ها بدست آوردند. بعدها لیود[۱۱] ازدیاد طول های غیرخطی را به این روابط اضافه نمود. او از روش المان محدود برای شبیه سازی بخشی از آزمایشات در ساختار پارچه استفاده کرد و نتایج او همخوانی خوبی با نمونه پارچه های واقعی داشت. با این حال نتایج بدست آمده تنها در موارد خاص از کرنش های کوچک اعتبار داشت. به این دلیل که مدل سازی با فرض کرنش ها و تغییر شکل های کوچک انجام گرفته بود. با این وجود فرایند مدل سازی وی چارچوبی مناسب برای مطالعات بعدی فراهم کرد.

باسئو[۱۲] و استیقمان [۱۳] فرمولاسیون محیط پیوسته را برای شبکه های لیفی بکار بردند این نوع مدل سازی ها برای پارچه های غیر تقویت شونده مناسب بودند. ریسه [۱۴] یک فرمولاسیون محیط پیوسته غیر ایزوتروپیک الاستیک پلاستیک برای پارچه ارائه نمود. زو و همکاران [۱۵] و همچنین شاکی و همکاران [۱۶] مدل های محیط پیوسته ای برای کامپوزیت های پارچه ای ارائه نمودند. کامرز [۱۷] و همچنین رائون و چو [۱۸] از مدل سازی محیط پیوسته برای کامپوزیت های حلقوی استفاده نمودند.

اگرچه مدل های محیط پیوسته، نوعاً باعث راندمان محاسباتی بیشتر شده و به آسانی در مدلسازی سیستم های چند جزئی مورد استفاده قرار می گیرند ولی تعریف مناسب پارامترهای مدل می تواند به عنوان یک چالش عمده مطرح باشد. به این معنی که، درمدلی که پارامترهای آن بطور تجربی تعیین شده، بایستی خواص منسوج مدلسازی شده با منسوج تحت بررسی همخوانی داشته باشد. این مسئله می تواند بدون مدل سازی ریز ساختارها بدست آید بگونه ای که در پیش بینی رفتار مکانیکی مواد معتبر باشد. در تعیین تجربی پارامترهای مدل، چهار پارامتر برآورد می گردد که عبارتنداز دو مدول یانگ، یک ضریب پواسن و یک مدول برشی. تعیین مدول های یانگ به آسانی قابل فهم بوده و معمولاً با ابزارهای تست کشش بدست می آید. با بهره گیری از تکنیک های تصویربرداری، امکان اندازه گیری ضریب پواسن نیز حاصل شده است [۱۹]. پارچه ها می توانند تا ۵۰ درجه، برش را تحمل کنند لذا سه روش اصلی برای اندازه گیری خواص برشی پارچه ها وجود دارد که همگی در شکل(۱-۱۱) نشان داده شده است.



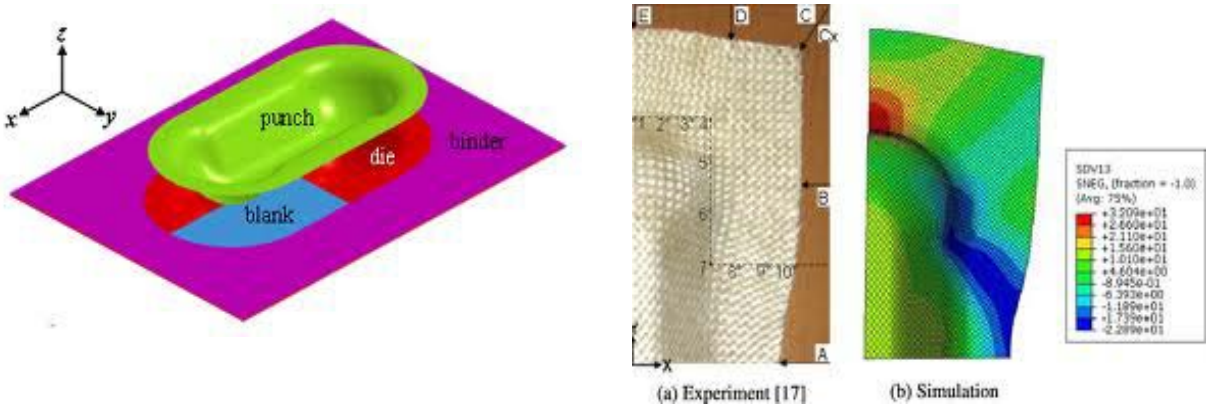
شکل ۱-۱۱: سه روش اصلی برای اندازه گیری خواص برشی پارچه ها

در آزمایش برشی دو محوری، نمونه پارچه بین دو فک ثابت و دو فک متحرک قرار داده می شود و نیروی برشی و زاویه برش با اعمال نرخ ثابت نیرودر دو جهت عمود بر هم اندازه گیری می شود. لیو و پنگ محققینی بودند که از این روش در کار خویش بهره گرفتند.[۲۰, ۲۱]

در آزمایش ازدیاد طول اریب، نمونه پارچه بین یک فک ثابت و یک فک متحرک قرار داده می شود و نیروی برشی و زاویه برش با اعمال نرخ ثابت نیرو اندازه گیری می شود. آزمایش ازدیاد طول اریب، در کارهای پوتلوری و ژو انجام شده است [۶, ۲۲, ۲۳] و آزمایش برشی پیکچر فریم[۱] در کارهای لوموف و ژواستفاده شده است.[۵, ۲۲] بنابراین زو و همکاران خواص مواد را به وسیله آزمایشات تجربی تعیین نمود ولی شاکی وهمکاران این خواص را از آزمایشات تجربی و جزئیات مدل المان محدود بدست آورد. ریسه از ترکیب المان های مدل ساختارمزو برای تعیین خواص ساختاری مدل محیط پیوسته استفاده نمود.

خان و همکاران[۲۴] شکل دهی رادر کامپوزیت های پارچه ای مدلسازی نمود و رفتار ماده را هایپو الاستیک فرض کرد. وی از مدل محیط پیوسته غیر متعامد برای بهبود فرایند مدلسازی شکل دهی استفاده کرد. که نتایج این کار در شکل ۱-۳ نشان داه شده است.

[۱].-.Picture frame shear test



(ب) (الف)

شکل ۱-۳: مدلسازی شکل دهی کامپوزیت های پارچه ای (الف) نتایج مدل و آزمایش فرایند پانچ (ب) شکل شماتیک پانچ [۲۴]

دانگ و همکاران[۲۵] مدل محیط پیوسته ای بر روی پارچه های کولار با استفاده از آزمایش ازدیاد طول اریب ارائه نموده است. که این پارچه حاوی نانو اجزاءسیلیکا بوده که روی آن کاشته شده بود.

با این وجود بسیاری از مدل های محیط پیوسته از اثر تقاطع بین نخ ها صرف نظر می کردند این اثرات شامل:

الف) تغییر موج نخ ها[۱]:زمانی که پارچه در یک راستا کشیده می شود در آن راستا افزایش طول داشته و منبسط می گردد. ولی در راستای دیگر افزایش دامنه موج داشته و منقبض می گردد. به عبارت دیگر هنگام کشش موج نخ ها از نظر دامنه کاهش و از نظر طول موج، افزایش پیدا می کند.

ب) قفل شدن نخ ها به هم[۲]: مکانیزمی که سبب می شود پارچه در مقابل تغییر شکل ها به واسطه فشردگی و قفل شدن نخ ها، مقاومت کند.

ج) مقامت در برابر تغییر زاویه نسبی نخ ها[۳]: مکانیزم غالب پارچه در پاسخ به برش صفحه ای می باشد.

موارد ذکر شده، رفتارهای مهم در پارچه در خیلی از کاربردها می باشد که با حذف آنها مدل محیط پیوسته در بسیاری از کاربردها نامناسب می گردد. بنابراین زمانی که هر دو رفتار ماکروسکوپیک درسطح محیط پیوسته و تقاطع نخ ها در مقیاس مزو مهم باشد به موارد فوق توجه ویژه ای می گردد.

---

[۱].- Crimp Inter Change

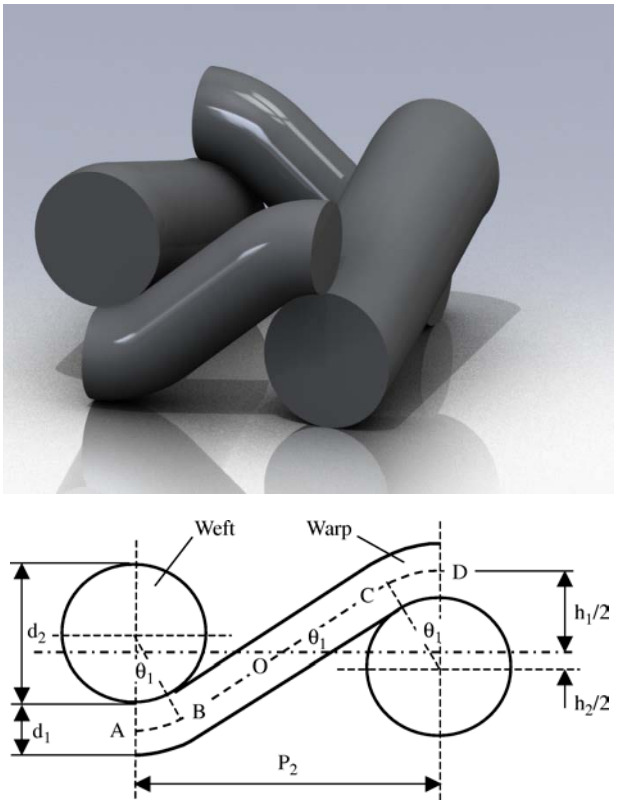
[۲]-.Locking

[۳]- Resistance to relative yarn rotation

۱-۲-۳ نگرش مزوسکوپیک در مکانیک محیط پیوسته

برای مطالعه رفتارهایی که در بالا ذکر شد، مدل های زیادی بر اساس ساختارمزو ارائه گردیدند. مدل های آنالیز شده براساس ساختارمزو در حالت های مختلف تغییر شکل، از روابط ریاضی برای پیش بینی پاسخ مکانیکی پارچه و جزء جزء نخ ها استفاده نمودند. تجزیه و تحلیل ها در مقیاس مزو بر روی بخش هایی از پارچه که تکرار شونده هستند انجام می پذیرد. این نوع از تجزیه و تحلیل ها بر روی سلول های واحد تکرار شونده یا المان های حجمی نمایش داده شده در سطح مزو تعریف و آنالیز می گردد.

مدل های اولیه با توجه به ارتباط و تعادل مکانیکی و هندسی بین نخ ها ارائه گردیده است [۲۶-۲۹] که نمایش شماتیک آن در شکل(۱-۴) آورده شده است.



شکل ۱-۴: مدل های اولیه برای ارتباط و تعادل مکانیکی و هندسی بین نخ ها[۲۶]

به عنوان مثال یک مدل می تواند برای پیش بینی رفتار نیرو ـ ازدیاد طول یک پارچه تحت کشش های تک محوری یا دو محوری در جهت های تار یا پود تنظیم گردد. مدل های آنالیزی در مقیاس مزو می تواند در یک فرمولاسیون محیط پیوسته غیر ایزوتروپیک قرار داده شودتا با ملاحظات مدلسازی در مقیاس مزو مدلی کارآ در تغییر شکل های محیط

پیوسته بوجود آورد.ترکیب مدلسازی محیط پیوسته با ظرفیت های مدلسازی در مقیاس مزو ، راهکاری جدید در این راستا می باشد.

الف) مدل های مکانیکی- هندسی

یکی از مدل هایی که به طور وسیع مورد قبول قرار گرفت مدل پیرس [۲۶] بود وی اولین کسی است که در زمینه مدل سازی پارچه ها پیشگام بوده است.مطابق شکل(۱-۴)، پیرس در اواسط دهه ی ۳۰ یک سلول مدل سازی از هندسه پارچه تعریف کرد و روابط هندسی در محل تقاطع نخ ها را آنالیز نمود.

او نشان داد اگر از مقاومت خمشی نخ ها صرف نظر گردد و سطح مقطع نخ ها دایروی فرض شود می توان یک مدل هندسی برای تعیین پارامترهای مورد نیاز تعریف کرد که در آن از تمام نیروهای داخلی صرف نظر شده است. هم چنین پیرس مجموعه ای از روابط برای این مدل هندسی بدست آورد. مشکل اصلی در استفاده از مدل پیرس این بودکه سطح مقطع نخ ها معمولاً دایروی نیستند. لذا تحقیقات زیادی انجام شد تا روابط اصلی مدل پیرس براساس اشکال متفاوت سطح مقطع نخ ها اصلاح گردد. بیضی و شکلی شبیه مسیر مسابقه دو سطح مقطع مهم بودند، که مورد توجه قرار گرفتند[۳۰, ۳۱]. در این مدلسازی ها، از مدل هندسی پارچه برای محاسبه زوایای بافت استفاده شد. برای پارچه تافته ای که فاصله بین نخ ها و موج های آن تعیین شده، زاویه انحنا و ارتفاع موج برآورد کننده درجه صافی نخ هاست. در کنار مدل های کاملاً هندسی برای پارچه، وی مدل سازی الاستیک نخ را نیزبرای توصیف مقاومت خمشی نخ ارائه نمود. در مدل پیرس برای مدلسازی موج نخ ها از تئوری الاستیکا استفاده شده بود. از نظر فیزیکی الاستیکا ها توسط اولر در سال ۱۷۴۴ معرفی شدند و در کارکونوپاسک [۳۲] کامل شرح داده شده است. الاستیکا یک میله بلند و باریک بوده و فرض می شود که ممان خمشی در هر نقطه از محور مرکزی میله به طور خطی با افزایش انحنای بوجود آمده در اثر ممان تناسب دارد.

در الاستیکاها ها تنها محور مرکزی نخ های تاروپود در نظر گرفته می شود و V, Uمولفه های نیروی خارجی در جهات افقی (x)و عمودی (y)می باشد.در نتیجه رابطه بین سختی خمشی و مولفه های نیروی خارجی به صورت رابطه ۱-۱ خواهد بود:

$$EI\frac{d\varphi}{ds}=-vx+uy \qquad (۱-۱)$$

که در اینجا،EI سختی خمشی نخ هاو $\frac{d\varphi}{ds}$ انحنای نخ ها می باشد.

زمانی که u صفر در نظر گرفته شود، تنها یک راه حل برای رابطه وجود داردکه موج نخ برای زوایای بافت مختلف مورد محاسبه قرار می گیرد.

اولافسون [۳۳] در سال۱۹۶۴مدلی ارائه نمود که از لحاظ ساختاری مشابه با مدل پیرس بود. او فرض کرد که هندسه نخ ها در بافت تابعی از نیروهای خارجی و نیروهای عکس العملی در پارچه است. هم چنین فرض کرد که نیروهای تولید شده توسط تماس های گسترده بین نخ ها ممکن است با بار نقطه ای تقریب زده شوند. وی هنگام بارگذاری دو محوری پارچه ها، نیروهای افقی و عمودی را در نقاط تقاطع نخ ها به نمایش گذاشت. و ایده تغییر شکل های ثابت نخ ها را به سبب خمش مطرح کرد و خصوصیات نخ ها را در حالت موج دار بدست آورد.

او همچنین از یک فاکتور جدید با عنوان فاکتور شکل، τ، برای اندازه گیری خصوصیات استفاده نمود هم چنین وی نشان داد که بین انحنای نخ در پارچه و انحنای نخ در حالت آزاد رابطه ۱-۲ برقرار است.

$$\frac{d\varphi_o}{ds_o}=(1+\tau)\frac{d\varphi}{ds} \qquad (۱-۲)$$

بنابراین رابطه ممان خمشی به شکل رابطه ۱-۳ اصلاح گردید.

$$M=-E_bI\left(\frac{d\varphi}{ds}-\frac{d\varphi_o}{ds_o}\right) \qquad (۱-۳)$$

وانرژی خمشی ،M ،براساس مکانیک ساختارهای الاستیک به دست می آید. همچنین این رابطه، قطر نخ ها را به صورت پارامترهای ثانویه بدست می آورد و اندازه صاف شدگی نخ ها را پیش بینی می کند. در خلال این تجزیه و تحلیل ها، او روابطی برای شرایط تعادل پیش بینی نمود و روابط تنش ـ کرنش را تحت تنش های کم در ساختار سطح مقطع بدست آورد. با این وجود این مدل به راستی آزمایی تجربی بیشتری نیاز دارد.

گراسبرگ و کیدا [۳۴, ۳۵] مدلی مشابه مدل اولافسون پیشنهاد نمودند. فرض های اولیه مدل سازی آنها عبارتند از:

ـ طول نخ مابین نقاط تقاطع در حین ازدیاد طول ثابت باقی می ماند.

ـ شکل نخ ها توسط نیروهای عمل کننده در محل تقاطع بدست می آید با این فرض که نخ یک تیر بی نهایت نازک است.

بنابراین،آنها خواص کششی و خمشی پارچه هارا با فرض نادیده گرفتن خواص فشاری، بدست آوردند و رابطه ممان خمشی پارچه را به شکل عددی با استفاده از سری های تیلور حل کردند. در مدل سازی آنهارابطه نیرو ـ ازدیاد طول با استفاده از روش های گرافیکی بدست می آید. مدول اولیه نیرو ـ ازدیاد طول بدست آمده از این روش برای چندین پارچه بررسی شد و نشان داد که نتایج تئوری با یافته های آزمایشگاهی از همخوانی خوبی برخوردار است.

کونوپاسک[۳۲, ۳۶] مدلی براساس تئوری الاستیکا ارائه نمود که مدل وی، منحنی های خمشی دو بعدی با محورهایی در جهت تارو پود داشت. او معادلات تعادل ساختار پارچه را با حل دو گروه از روابط منحنی های خمشی، برای نخ های تاروپود بدست آورد که در روابط او شرایط مرزی به خوبی لحاظ شده بود.

لیف و آناندجیوالادر سال ۱۹۸۵[۳۷] مدلی براساس مدل پیرس ارائه نمودند با این فرض که نخ ها در این مدل سازی به عنوان یک الاستیکا در نظر گرفته شده بود و برای ممان خمشی از مدل دوخطی هانگ استفاده شده بود. هانگ [۳۸] پیشنهاد کرد که رابطه ممان خمشی ـ انحناء پارچه می تواند در دو بخش خطی مدل سازی گردد. بطوریکه منحنی دارای شیب تند در ناحیه انحنای کمتر و دارای شیب خیلی کمتر در ناحیه انحنای بالا بود. آنها مدل سازی خود را براساس روابط تعریف شده بین پارامترهای هندسی ارائه نمودند. نهایتاً کار آنها اطلاعاتی را ارائه می داد که توانایی مدل شان را در پیش بینی روابط هندسی تأیید می کرد.

در کارهای بعدی آناندجیوالا و لیف [۳۹, ۴۰] از مدل سازی برای پیش بینی رفتار نیرو-ازدیاد طول پارچه ها در کشش عمیق استفاده نمودند باتوجه به اینکه پارچه در معرض نیروهای دوره ای تکرار شونده دو محوری(بارگذاری و حذف بارگذاری) قرار داشت. در این مدل سازی خمش نخ ها، ازدیاد طول نخ ها و نیروی فشاری بین نخ ها در نظر گرفته شده بود. آنها جهت اعتبار بخشی به تجزیه و تحلیل های تئوری از آزمایشات تجربی استفاده کردند و اعلام کردند که رفتار پارچه در پاسخ به تنش های اعمالی بطور فزاینده ای از پارامترهای خمشی نخ ها اثرپذیر است.

کوش، باترا و بارکر [۴۱-۴۳] با اعمال ازدیاد طول ثانویه بیشتر و مشابه کارهای اولافسون و لیف و آناندجیوالا مدل پیرس را اصلاح نمودند. آنها در مطالعه رفتار خمشی پارچه های تافته از هر دو مدل ممان ـ خمش خطی و دو خطی استفاده نمودند. ازدیاد طولی که آنها اعمال نمودند در خط تماس محل تقاطع نخ ها مدل سازی گردید لذا دربازه خاصی از سختی های خمشی پارچه، مجموعه ای از محاسبات انجام شد تا نتایج مدل سازی با نتایج تجربی متناظر هماهنگ گردد. با این وجود نمونه ها به پارچه هایی که از نخ های مونوفیلامنت ساخته شده بودند محدود بودند که این نمونه ها به طور کسترده به شکل الاستیکا رفتارمی کردند.

وارن [۴۴] از هندسه اصلاح شده پیرس برای پیش بینی پاسخ پارچه تحت بارگذاری های کم در کشش های تک محوری و دو محوری در جهات تاروپود استفاده نمود وی در این تحقیق با در نظر گرفتن اثرات خمش و کشش نخ ها از تئوری تیرهای الاستیک استفاده نمود.

لوموف و همکاران [۴۵] مدلی برای پیش بینی سختی خمش پارچه تافته از پارچه تا نخ ارائه نمودند. مدل از نظر ساختاری بسیار شبیه مدل پیرس بود و از تقریب چند جمله ای برای تئوری الاستیکا استفاده شده بود. آنها مدلسازی خود را براساس هر دو فرض تماس نقطه ای و خط تماس انجام دادند و تغییر شکل پارچه را با انتقال مختصات پارچه نشان دادند. در نهایت اعتبار مدل سازی به هنگام مقایسه نتایج آن با نتایج تجربی به اثبات رسید.

ساگار و همکاران [۴۶] از فرم اصلاح شده هندسه پیرس با اعمال انرژی پتانسیل ثابت برای تعیین پیکربندی پارچه استفاده نمود و تغییر شکل آن را در پاسخ به نیروهای اعمال شده بدست آورد.

با این وجود همه ی این مدل ها تنها در شرایط بارگذاری خاصی که طراحی شده بودند اعتبار داشتند. به عنوان مثال هر دو مدل ارائه شده توسط وارن وساگارفرض کرده بودندکه نخ های تار و پود عمود بر هم هستند لذا در این مدل سازی ها، اجازه به تغییر شکل های برشی داده نمی شد. در ضمن ازدیاد طول آن مدل ها هنگام بارگذاری های زیاد به سبب هندسه