

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی نساجی

پایان نامه دکتری

مهندسی تکنولوژی نساجی

عنوان :

بررسی تاثیر ساختمان بافت پارچه های حلقوی تار بر رفتار خمشی
آن به کمک یک مدل ریاضی

دانشجو :

سعید آجلی

اساتید راهنما :

پرفسور علی اصغراصغریان جدی

دکتر عباس راستگو

شهریور ۱۳۸۶

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ:



فرم اطلاعات پایان نامه کارشناسی ارشد و دکترا

معاونت پژوهشی

فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۲

دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: سعید آجلی □ دانشجوی آزاد □ بورسیه □ معادل □
شماره دانشجویی: ۸۰۱۲۸۹۱۷ دانشگاه: مهندسی نساجی رشته تحصیلی: تکنولوژی

نام و نام خانوادگی اساتید راهنما: دکتر علی اصغر اصغریان جدی

عنوان به فارسی: بررسی تاثیر ساختمان بافت پارچه های حلقوی تار بر رفتار خمشی آن به کمک یک مدل ریاضی
عنوان به انگلیسی: Effect of Warp-Knitted Fabric Structure on the Bending Behavior Using Mathematical Model

نوع پروژه: کارشناسی ارشد □ کاربردی □ بنیادی □ توسعه ای □ نظری □
دکترا ✳

تاریخ شروع: تیر ۸۴ تاریخ خاتمه: شهریور ۸۶ تعداد واحد: ۲۴
سازمان تامین کننده اعتبار: دانشگاه صنعتی امیر کبیر

واژه های کلیدی به فارسی: پارچه حلقوی تار، سختی خمشی، ساختمان بافت، تراکم بافت و سختی خمشی نخ
واژه های کلیدی به انگلیسی: Warp Knitted Fabric, Bending Rigidity, Fabric Structure & Density, Yarn Bending Rigidity

نظرها و پیشنهادات به منظور بهبود فعالیتهای پژوهشی دانشگاه:

استاد راهنما:

دانشجو: ارتباط بیشتر با صنعت و تعریف پروژه های مورد نیاز با صنعت کشور

امضاء استاد راهنما:

تاریخ:

نسخه ۱: معاونت پژوهشی

نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه و به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

تقدیم به همسر
که صبورانه همراهی ام نمود

تقدیر و تشکر

در اینجا لازم می دانم از زحمات بی شائبه اساتید راهنمای ارجمندم، جناب آقایان پرفسور اصغریان جدی و دکتر راستگو در طول این پروژه تشکر نمایم. همچنین از راهنمایی های دلسوزانه جناب آقای پرفسور امیریات سپاسگذارم.

از همکاری اساتید محترم دپارتمان نساجی دانشگاه کارولینای شمالی آمریکا به ویژه جناب آقایان دکتر پوردیهیمی، دکتر Gorga و سرکار خانم دکتر Banks-Lee نیز کمال تشکر را دارم. در پایان لازم است از همراهی کلیه دوستان، همکاران و مربیان گرامی کارگاه ها و آزمایشگاه های دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه های صنعتی امیرکبیر تهران، صنعتی اصفهان و کارولینای شمالی به ویژه جناب آقایان مهندس مداحیان، مهندس نوروزی و مهندس مرادی و سرکار خانم ها رضایی، قبادی، حدادیان، Gail و Jarvis تشکر نمایم.

کلیه حقوق مادی مرتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران است.

چکیده :

در این تحقیق ارتباط بین سختی خمشی پارچه های حلقوی تاری دو شانہ استاندارد با ساختمان بافت و خصوصیات نخ مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است. این پارامترها شامل فاصله بین حلقه ها در راستای ردیف و رج پارچه، طول آندرلپ حلقه های جلو و عقب و سختی خمشی نخ تشکیل دهنده ساختمان بافت می باشد.

به این منظور یک مدل مکانیکی جهت برآورد سختی خمشی ارائه گردیده که در آن هندسه حلقه در پارچه به کمک دو دسته نخ های صاف و اریب به نمایندگی از نخ ساق ها و آندرلپ ها جایگزین شده است. مقدار سختی خمشی برای پارچه بر اساس این مدل برابر است با مجموع مقاومت خمشی نخ های صاف و اریب در ساختمان بافت که به کمک روش انرژی کرنشی محاسبه می گردد. همچنین فرض شده که نخ ها در پارچه از دو ناحیه سخت و انعطاف پذیر عبور می نمایند. تاثیر این نواحی نیز بر مقدار سختی خمشی پارچه مد نظر قرار گرفته است.

علاوه بر آن سختی خمشی نمونه پارچه ها توسط دو دستگاه آزمایشگاهی (دستگاه تمام اتوماتیک سیکلی خمش، ساخته شده در دانشکده مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران در طول این پروژه و دستگاه خمش کاواباتا، موجود در دانشکده نساجی دانشگاه کارولینای شمالی، آمریکا) اندازه گیری گردید. نتایج به دست آمده از دو روش آزمایش بیانگر این مطلب است که دستگاه ساخته شده در داخل، قابل اعتماد بوده و از ضریب اطمینان خوبی برخوردار می باشد.

در این پژوهش، یک مدل خطی آماری نیز جهت برآورد سختی خمشی پارچه بررسی شده است. مقایسه بین نتایج تئوری، تجربی و آماری حاکی از یک ضریب همبستگی بسیار بالا بین سختی خمشی تخمین زده توسط مدل ریاضی و نتایج واقعی در دو جهت ردیف و رج برای بافت های متفاوت حلقوی تاری می باشد.

کلید واژه ها: پارچه حلقوی تاری (*Warp Knitted Fabric*)، سختی خمشی (*Bending Rigidity*)، ساختمان

بافت (*Fabric Structure*)، تراکم بافت (*Fabric Density*) و سختی خمشی نخ (*Yarn Bending Rigidity*).

علائم اختصاری

گرم	<i>g</i>
متر	<i>m</i>
درجه سانتیگراد	°C
رطوبت نسبی	RH
شانه جلو	FB
شانه عقب	BB
تعداد ردیف در در یک سانتیمتر	WPC
تعداد رج در یک سانتیمتر	CPC
فاصله بین دو رج بر حسب سانتیمتر	<i>c</i>
فاصله بین دو ردیف بر حسب سانتیمتر	<i>w</i>
۴۸۰ رج	<i>rack</i>
سانتیمتر	<i>cm</i>
عکس سانتیمتر	<i>cm-l</i>
میلی نیوتن	<i>mN</i>
طول نخ مصرفی شانه راهنمای نخ جلو	Run-in FB
طول نخ مصرفی شانه راهنمای نخ عقب	Run-in BB
تعداد آندرلپ شانه جلو	<i>n_f</i>
تعداد آندرلپ شانه عقب	<i>n_b</i>

فهرست مطالب

فصل اول : مطالعات انجام شده

- 2 (1-1) مطالعات انجام شده بر روی رفتار خمشی پارچه
- 12 (2-1) دستگاه های اندازه گیری رفتار خمشی پارچه
- 12 (1-2-1) آزمایش طول خمش (Peirce Stiffness Tester)
- 12 (2-2-1) آزمایش حلقه (Loop Test)
- 13 (3-2-1) دستگاه کاواباتا (Kawabata Evaluation System)
- 14 (4-2-1) دستگاه خمش سیکلی (Cyclic Bending Tester)
- 15 (5-2-1) دستگاه اندازه گیری زیر دست به روش ساده (Fast system)
- 15 (6-2-1) دستگاه خمش دینامیکی (On-line Measurement of Fabric Bending)
- 16 (7-2-1) دستگاه چند منظوره آزمایش پارچه (Multipurpose Fabric Tester)
- 16 (8-2-1) روش آزمایش حفره (Digital Pneumatic Stiffness Tester)
- 17 (9-2-1) آزمایش خستگی خمش (Bending Fatigue Tester)
- 17 (10-2-1) آزمایش سنجش صوت پارچه (Sound Generator Tester)
- 18 (3-1) فرضیات انجام شده در مدل کردن پارچه

فصل دوم : پژوهش های تجربی

- 20 (1-2) نحوه تهیه نمونه ها و مراحل استراحت و تکمیل
- 22 (2-2) نحوه انجام آزمایش های خمش
- 27 (3-2) نتایج تجربی، بحث و بررسی

فصل سوم : پژوهش های تئوری

- 34 (1-3) فرضیات انجام شده
- 34 (1-1-3) هندسه بافت
- 38 (2-1-3) فرضیات انجام شده در مورد خصوصیات پارچه و نخ مصرفی
- 39 (2-3) ارائه مدل مکانیکی ساختمان بافت حلقوی تار
- 40 (1-2-3) سختی خمشی یک واحد میله اریب
- 43 (2-2-3) سختی خمشی یک واحد میله ترکیبی
- 45 (3-3) بررسی سختی خمشی پارچه با استفاده از مدل مکانیکی
- 45 (1-3-3) محاسبه سختی خمشی پارچه در جهت ردیف
- 48 (2-3-3) محاسبه سختی خمشی پارچه در جهت رج
- 50 (4-3) بحث و بررسی پیرامون نتایج بدست آمده از مدل مکانیکی
- 58 (5-3) مدل آماری

نتیجه گیری

منابع

ضمائم

فهرست شکل ها

فصل اول : مطالعات انجام شده

- شکل 1-1: مدل هندسی ساختمان حلقوی پودی ۳
- شکل 1-2: مدل رئولوژی Olofsson شامل یک جزء اصطکاکی و یک جزء الاستیک ۳
- شکل 1-3: مدل رئولوژی بدست آمده از سری قرار دادن مدل Olofsson ۴
- شکل 1-4: مدل رئولوژی خمش پارچه ۴
- شکل 1-5: نمای شماتیک از قرار گیری لایه الیاف در نخ ۵
- شکل 1-6: نمای شماتیک از خم شدن دو ناحیه ای پارچه ۶
- شکل 1-7: روش Chord در حل مسئله تیر یکسرگیردار Pierce ۷
- شکل 1-8: مدل SPY برای ساختمان حلقوی پودی ساده ۸
- شکل 1-9: نحوه تعیین زاویه θ 9
- شکل 1-10: شکل شماتیک از دستگاه Peirce Bending Tester ۱۲
- شکل 1-11: نمایی از حلقه های متفاوت جهت محاسبه طول خمش نمونه ۱۳
- شکل 1-12: نمایی شماتیک از دستگاه اولیه KES-FB-2 ۱۴
- شکل 1-13: شکل شماتیک از دستگاه Cyclic Bending Tester ۱۴
- شکل 1-14: نمای شماتیک از دستگاه Bending Meter ۱۵
- شکل 1-15: نمای حلقه ها و پارامترهای اندازه گیری شده ۱۵
- شکل 1-16: نمای دستگاه Multipurpose Fabric Tester ۱۶
- شکل 1-17: نمایی از دستگاه تست خستگی خمشی پارچه ۱۷
- شکل 1-18: نمای دستگاه سنجش صوت پارچه ۱۷

فصل دوم : پژوهش های تجربی

- شکل 2-1: نمونه منحنی هیستریزس خمشی بافت حلقوی تاری ۲۳
- شکل 2-2: جهت ردیف و رج خمش ۲۴
- شکل 2-3: نحوه خمش پارچه در حالت زیر نویس f ۲۵
- شکل 2-4: منحنی های خمش در جهت ردیف با شروع متفاوت رو و پشت فنی ۲۶
- شکل 2-5: مقایسه بین نتایج بدست آمده از دو روش ACBT و KES-FB در جهت ردیف ۳۱
- شکل 2-6: مقایسه بین نتایج بدست آمده از دو روش ACBT و KES-FB در جهت رج ۳۱
- شکل 2-7: ضریب ارتباط بین دو روش ACBT و KES-FB در جهت ردیف ۳۲
- شکل 2-8: ضریب ارتباط بین دو روش ACBT و KES-FB در جهت رج ۳۲

فصل سوم : پژوهش های تنوری

- شکل 3-1: نمای حلقه در بافندگی حلقوی تاری ۳۴
- شکل 3-2: ساختمان بافت پارچه های استاندارد دو شانه 3۶
- شکل 3-3: مدل هندسی ارائه شده برای بافت های حلقوی تاری دو شانه استاندارد ۳۷
- شکل 3-4: ساختمان پارچه حلقوی تاری و نواحی سخت و انعطاف پذیر در مدل مکانیکی ۳۹

فهرست شکل ها

- شکل ۳-۵: نمای شماتیک از خمش خالص
شکل ۳-۶: خمش خالص در میله صاف و اریب
شکل ۳-۷: نمای شماتیک از میله ترکیبی تحت خمش خالص
شکل ۳-۸: نحوه تجزیه بافت حلقوی تاری در جهت ردیف
شکل ۳-۹: زاویه آندرلپ دو شانه با رج
شکل ۳-۱۰: نمایی از حلقه های بافت با اشاره به نواحی سخت در راستای ردیف و رج
شکل ۳-۱۱: نحوه تجزیه بافت حلقوی تاری در جهت رج
شکل ۳-۱۲: زاویه آندرلپ دو شانه با ردیف
شکل ۳-۱۳: مقایسه نتایج تئوری و تجربی سختی خمشی در جهت ردیف
شکل ۳-۱۴: مقایسه نتایج تئوری و تجربی سختی خمشی در جهت رج
شکل ۳-۱۵: ضریب همبستگی بین نتایج تئوری و تجربی ABCT سختی خمشی در جهت ردیف
شکل ۳-۱۶: ضریب همبستگی بین نتایج تئوری و تجربی KES-FB سختی خمشی در جهت ردیف
شکل ۳-۱۷: ضریب همبستگی بین نتایج تئوری و تجربی ABCT سختی خمشی در جهت رج
شکل ۳-۱۸: ضریب همبستگی بین نتایج تئوری و تجربی KES-FB سختی خمشی در جهت رج
شکل ۳-۱۹: ضریب همبستگی بین نتایج تئوری و تجربی ABCT سختی خمشی در جهت رج برای ساختمان بافت های یک آندرلپی شانه عقب
شکل ۳-۲۰: ضریب همبستگی نتایج تئوری و تجربی KES-FB سختی خمشی در جهت رج برای ساختمان بافت های یک آندرلپی شانه عقب
شکل ۳-۲۱: مقایسه نمودارهای بدست آمده از دو مدل تئوری و پیش بینی آماری

فهرست جداول

فصل دوم : پژوهش های تجربی

- ۲۱ جدول ۱-۲: مشخصات و جزئیات نمونه ها و علائم اختصاری مربوط به هر نوع بافت
- ۲۸ جدول ۲-۲: پارامترهای خمشی اندازه گیری شده توسط دستگاه ACBT $(mN/cm^2) cm^{-1}$
- ۲۹ جدول ۳-۲: پارامترهای خمشی اندازه گیری شده توسط دستگاه KES-FB-2 $(mN/cm^2) cm^{-1}$

فصل سوم : پژوهش های تئوری

- ۵۰ جدول ۱-۳: سختی خمشی تئوری و تجربی برای بافت های مختلف $(mN/cm^2) cm^{-1}$
- ۵۳ جدول ۲-۳: ضرایب همبستگی بین نتایج مختلف بدست آمده برای سختی خمشی
- ۵۳ جدول ۳-۳: نتایج آنالیز واریانس برای بافت های مختلف
- ۵۸ جدول ۴-۳: نتایج بررسی مدل آماری سختی خمشی

فصل اول

مطالعات انجام شده

۱-۱) مطالعات انجام شده بر روی رفتار خمشی پارچه:

پارامتر سختی خمشی پارچه نقش بسیار مهمی را در آویزش، زیر دست و راحتی پوشش پارچه و البسه ایفاء می نماید و به همین علت رفتار خمشی پارچه در کارهای متعددی تاکنون مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته شده است.

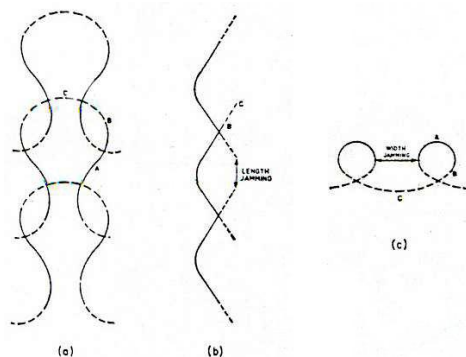
رفتار خمشی پارچه ابتدا توسط Pierce در سال ۱۹۳۰ مورد توجه قرار گرفت. وی توانست سختی خمشی پارچه را با اندازه گیری طول خمش نمونه تحت تأثیر وزن خودش بدست آورد. همچنین او چندین روش دیگر جهت اندازه گیری طول خمش پارچه های خاص مانند پارچه های لخت ابداع نمود که به روش های حلقه معروف می باشند [1].

در سال ۱۹۶۴، Livesey و Owen با پیشنهاد یک فرمول ریاضی، ارتباط بین سختی خمشی پارچه و مقاومت خمشی الیاف متشکل آن را مورد بررسی قرار دادند و ملاحظه نمودند که تاب و موج نخ در پارچه را می توان به کمک مدلی شبیه به فنر (helix) تخمین زد [2]. آنها برای محاسبه سختی خمشی helix، معادله زیر را بدست آوردند:

$$B_H = 1 / \left\{ (1 + \alpha^2 r^2)^{1/2} \times \left[\frac{1}{B_F} + \frac{\alpha^2 r^2}{2(1 + \alpha^2 r^2)} \left(\frac{1}{G_F} - \frac{1}{B_F} \right) \right] \right\} \quad (1-1)$$

که B_F سختی خمشی الیاف، G_F سختی پیچشی الیاف، r شعاع فنر و α زاویه پیچش فنر در واحد طول می باشد که $\alpha r = \tan \theta$ و θ زاویه helix است.

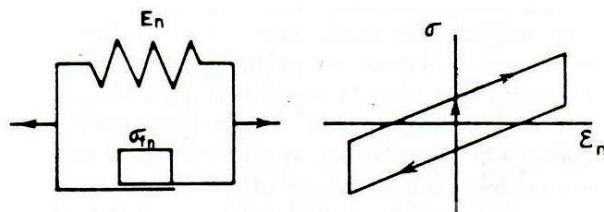
در مطالعات بعدی، Hamilton و Postle با استفاده از ایده پیشنهاد شده توسط Livesey و Owen, در پارچه حلقوی ساده یک رو سیلندر فرض کردند که هر رج در پارچه شامل دو helix مطابق شکل زیر می باشد [۳]:



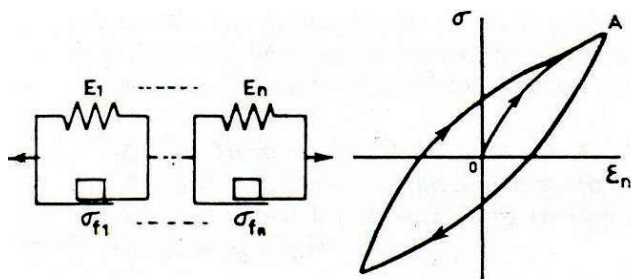
شکل 1-1: مدل هندسی ساختمان حلقوی پودی [۳].

به هر حال آنها اختلاف زیادی بین نتایج تجربی بدست آمده برای خمش پارچه و داده های پیش بینی شده به کمک مدل ارائه شده بدست آوردند و فرضیه در نظر گرفتن نقاط سخت در محل تماس دو helix با یکدیگر را موجب بروز این اختلاف دانستند.

در ادامه کار، آنها با سری قرار دادن چندین مدل ساده رئولوژی که قبلاً توسط Olofsson ارائه شده بود، توانستند نتایجی نزدیکتر با آزمایش های انجام شده برای پارچه های تحت استراحت کامل بدست آورند [۴].

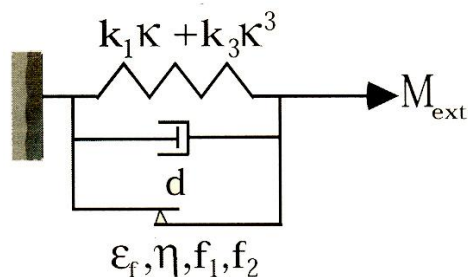


شکل 1-2: مدل رئولوژی Olofsson شامل یک جزء اصطکاکی و یک جزء الاستیک [۴].



شکل 3-1: مدل رئولوژی بدست آمده از سری قرار دادن مدل Olofsson [۳].

همچنین مدل رئولوژی دیگری نیز مطابق شکل 4-1 در دانشگاه واترلوکانادا جهت پیش بینی خمش در پارچه مورد استفاده قرار گرفت که شامل یک فنر خطی، یک فنر با نسبت توان سه تغییرات فاصله، یک دمپر و یک المان اصطکاکی می باشد [۵].

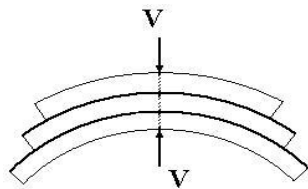


شکل 4-1: مدل رئولوژی خمش پارچه [۵].

در کار دیگری، De Jong, Postle و Dhingra به بررسی سختی خمشی نخ و تأثیر آن بر روی سختی خمشی پارچه پرداختند و عوامل مؤثر بر رفتار خمشی پارچه را، ضخامت آن، وزن واحد پارچه، موج رفتگی نخ ها در ساختمان بافت و دانسیته نخ ها بیان نمودند.

آنها نشان دادند که در پارچه، B_F/B_Y (سختی خمشی پارچه در واحد تار و B_Y سختی خمشی نخ) همواره از مقدار یک بیشتر خواهد بود و دریافتند که مقدار موج رفتگی نخ ها در ساختمان بافت بر این نسبت مؤثر می باشد [۶].

در پژوهشی دیگر، Grosberg بیان نمود زمانی که نخ در ساختمان پارچه خم می شود، الیاف در داخل آن شروع به سرخوردن نموده و بر اصطکاک غلبه می نمایند. این مسئله به صورت لایه ای در نخ مطابق شکل ۵-۱ رخ می دهد که الیاف سطح بیرونی کشیده و لایه درونی فشرده می گردند [۷].



شکل 1-۵: نمای شماتیک از قرار گیری لایه الیاف در نخ [۷].

وی خم شدن را به صورت مجزا در هر لایه فرض نمود و کوپل خمشی B/ρ را جهت خم شدن هر لایه در نظر گرفت که در نهایت برای مجموع لایه ها رابطه زیر بدست آمد:

$$\begin{aligned} M - M_0 &= B/\rho \\ M_0 &= \frac{1}{8} \mu v d \end{aligned} \quad (2-1)$$

که در آن M ممان خمشی، M_0 کوپل اصطکاکی، B مدول خمشی، ρ شعاع انحنا، v نیروی فشاری عمودی در محل تقاطع، μ ضریب اصطکاک بین الیاف و d قطر نخ می باشد. در نتیجه Grosberg خمش پارچه را به صورت غیر خطی بیان نمود که خود به دو جزء خطی و غیر خطی ناشی از اصطکاک که قابل پیش بینی می باشد تقسیم می گردد [۷]. معادله (۲-۱) زمانی قابل قبول است که ممان خمشی بر کوپل اصطکاکی اولیه غلبه کند تا پارچه شروع به خم شدن نماید، به عبارت صحیح تر رابطه (۲-۱) به شکل زیر در می آید:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} = 0 & M \leq M_0 \\ M = M_0 + \frac{B}{\rho} & M > M_0 \end{cases} \quad (3-1)$$

شکل دیگر رابطه Grosberg به صورت زیر است:

$$\kappa = \begin{cases} 0 & M \leq M_0 \\ \frac{M - M_0}{B} & M > M_0 \end{cases} \quad (4-1)$$

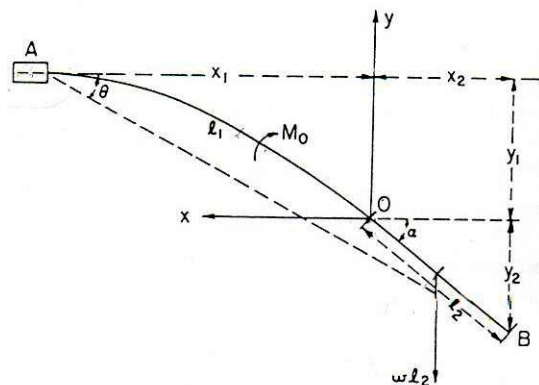
که κ انحنا می باشد.

سپس Abbott نشان داد که تخمین خمش غیر خطی به صورت زیر مناسب تر می باشد [۸].

$$\kappa = \begin{cases} \frac{M - aM_0}{B} & M \leq 2M_0 \\ \frac{M - M_0}{B} & M > 2M_0 \end{cases} \quad (5-1)$$

$$a = \frac{M}{M_0} - \frac{1}{4} \left(\frac{M}{M_0} \right)^2$$

در ادامه این تحقیقات، Grosberg به کمک Swani در تست تیر یکسرگردار پارچه، ناحیه خم شدن را به دو قسمت مستقیم و منحنی مطابق شکل ۱-۶ تقسیم نمودند [۹].



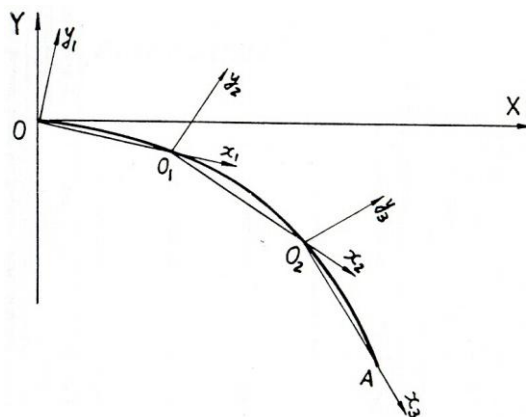
شکل 1-6: نمای شماتیک از خم شدن دو ناحیه ای پارچه [۹].

در سال ۱۹۷۱، Abboott، Grosberg و Leaf مدلی را جهت رفتار خمشی پارچه معرفی نمودند. در این مدل آنها فرض کردند که پارچه از تعداد زیادی صفحات نازک تشکیل شده است و از تأثیر نیروهای برشی ایجاد شده حین خمش صرف نظر نمودند. به این ترتیب آنها به بررسی رفتار خمشی به کمک یک سری صفحات موازی با یکدیگر پرداختند [۸]. سپس در سال ۱۹۷۳ آنها با توسعه دو مدل بر روی پارچه های ساده خام و تکمیل شده، به پیش بینی ممان خمشی وارد شده به نمونه ها و مقدار انحنای خمشی ایجاد شده توسط این تئوری پرداختند. همچنین آنها با ایجاد تغییراتی در مدل ارائه شده در سال ۱۹۶۰ توسط Abboott، نتایج تئوری را به مقادیر واقعی نزدیک تر نمودند [۱۰]. Abboott و همکارانش بیان نموده بودند که به دلیل فشار در نقاط تلاقی تار و بود در پارچه می توان قرار گیری نخ در پارچه را به دو ناحیه سخت و انعطاف پذیر تقسیم نمود [۱۱].

همچنین Leaf نیز با ارائه یک مدل کلی برای بیان رفتار خمشی پارچه های تار-پودی با در نظر گرفتن فرضیات کمتری از روش ناحیه سخت استفاده نمود [۱۲].

استفاده از روش انرژی راه حل دیگری بود که جهت بررسی رفتار خمشی پارچه مورد توجه قرار گرفت. Postle و De Jang با به کارگیری روش انرژی به بررسی و مقایسه بین پارچه های مختلف حلقوی و تار-پودی پرداختند. آنها ساختمان بافت پارچه را به کمک پارامترهای بدون بعد به صورت استاندارد درآوردند [۱۳]. در تحقیق بعدی Leaf و همکارانش با استفاده از فرمول انرژی کرنشی و به کارگیری قضیه Castigliano ارتباط بین سختی خمشی پارچه تار و پودی ساده را با پارامترهای نخ به کار گرفته شده در آن از جمله فضای بین نخ ها، موج رفتگی و سختی خمشی نخ ها بدست آوردند. در این مدل انرژی، آنها فرض نمودند که نخ های به کار گرفته شده در ساختمان بافت پارچه غیر قابل فشردگی و ازدیاد طول بوده و رفتاری الاستیک داشته و همچنین با توجه به در نظر گرفتن تکمیل ایده آل پارچه، در ناحیه تقاطع نخ های تار و پودی هیچگونه نیرویی وجود ندارد [۱۴].

در کار دیگری در سال ۱۹۸۸، Wei توانست به کمک روش Chord به آنالیز مسئله تغییر شکل های بزرگ در تیرها بپردازد. در این روش تیری مطابق شکل ۱-۷ به چند قسمت با تغییر شکل های کوچکتر تقسیم می گردد. وی کارهای انجام شده Pierce در حل تیر یکسرگردار را به این روش با سه قسمت کردن آن تکرار کرد که نتایج بدست آمده با نتایج Pierce بسیار شباهت داشت [۱۵].



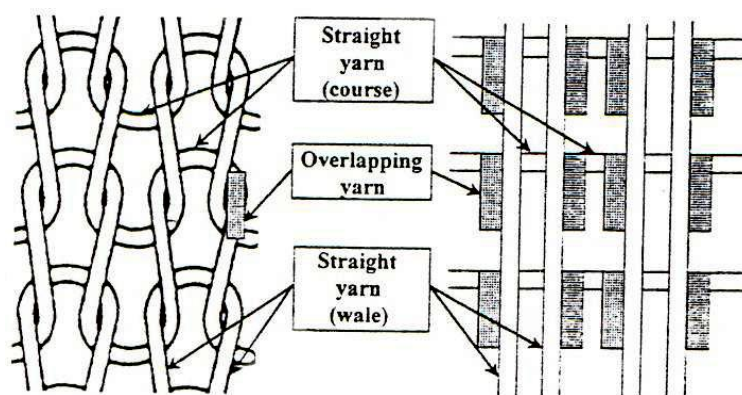
شکل ۱-۷: روش Chord در حل مسئله تیر یکسرگردار Pierce [۱۵].

در مطالعات اخیر نیز Hu نشان داد که ارتباط خوبی بین سختی خمشی پارچه با ممان خمشی وارده به آن وجود دارد. در این تحقیق سطح مقطع پارچه مستطیلی و وزن خطی پارچه در طول آن ثابت فرض شده است و روابط زیر جهت خمش الاستیک پارچه استفاده گردید:

$$\begin{aligned} M &= B/r \\ B &= EI \end{aligned} \quad (6-1)$$

که در این رابطه M ممان خمشی پارچه، B سختی خمشی پارچه، E مدول یانگ، r شعاع انحناء و I ممان اینرسی سطح مقطع پارچه می باشد [۱۶].
همچنین Choi در تحقیقی دیگر بر روی شش ساختمان بافت حلقوی پودی با سه تراکم مختلف، مشاهده نمود که با افزایش دانسیته پارچه، سختی خمشی (B) و هیستریزس خمشی (2HB) افزایش می یابد. دلیل این مطلب کاهش فضای آزاد حرکتی نخ ها در ساختمان بافت و افزایش اصطکاک بیان گردید [۱۷].

در ادامه این پژوهش ها، Alimaa تأثیر رفتار خمشی نخ بر روی پارچه های حلقوی پودی ساده و ریب را به کمک مدل SPY (Straight Parallel Yarn) مورد بررسی قرار داد. در مدلی که در شکل زیر مشاهده می شود بافت حلقوی به بافت تار-پودی مشابه تبدیل می گردد.
آنها به کمک مدل SPY، به آنالیز تأثیر خصوصیات خمشی نخ و ساختمان پارچه بر روی سختی خمشی پارچه پرداخته و در نهایت معادلات ۱-۷ را ارائه نمودند.



شکل ۱-۸: مدل SPY برای ساختمان حلقوی پودی ساده [۱۸].

$$B_w = B_{YF} \frac{1}{(1-1/2\alpha_w)} 2N_w$$

$$B_c = B_{YF} \frac{1}{(1-1/2\alpha_{c-p})} N_c \quad (7-1)$$

در این روابط B_w و B_c سختی خمشی در جهت ردیف و رج، B_{YF} سختی خمشی یک نخ صاف بعد از استراحت کامل، N_w و N_c تعداد ردیف و رج در واحد cm و α_w و α_{c-p} ضرایب تصحیح هندسی می باشند [۱۸].

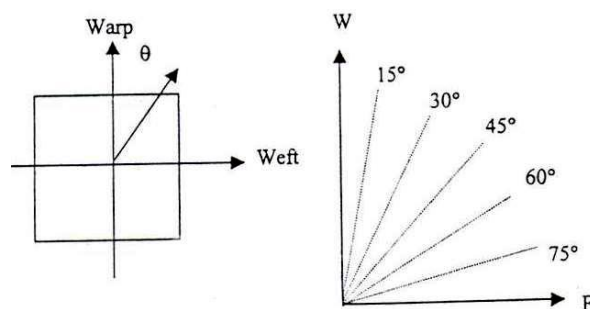
در سال ۲۰۰۳ نیز Ucar با انجام آزمایش های تجربی بر روی پارچه های حلقوی پودی مشاهده نمود که با افزایش فاکتور سفتی (Tightness Factor) و استراحت پارچه، مقاومت آن در مقابل خم شدن افزایش می یابد [۱۹]. همچنین Kang در سال ۲۰۰۴ یک مدل ریاضی پیشنهاد نمود که در آن پارچه به صورت یک تیر نازک پیوسته با رفتار خمشی غیر خطی فرض شده بود [۲۰].

ذکر این نکته لازم است که محققان زیادی علاوه بر اندازه گیری سختی خمشی پارچه به مطالعه در مورد این پارامتر در جهت های مختلف نیز پرداخته اند.

Pierce اولین فردی بود که سختی خمشی را در راستاهای متفاوت پارچه بررسی و رابطه زیر را بدست آورد:

$$B_\theta = \left[\frac{\cos^2 \theta}{\sqrt{B_1}} + \frac{\sin^2 \theta}{\sqrt{B_2}} \right]^{-2} \quad (8-1)$$

که در آن B_1, B_2 و B_θ سختی خمشی در جهت تار، پودی و زاویه θ می باشد که در شکل ۹-۱ نشان داده شده است [۲۱].



شکل ۹-۱: نحوه تعیین زاویه θ [۲۱].