

روشهای اندازه‌گیری قابلیت ترشدن الیاف نساجی و مشکلات آن

Measurement of Textile Fibers Wettability and the Problems Involved

ناهید انصاری*، محمدحقیقت کیش

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۴۱۳

دریافت: ۸۰/۲/۲۶، پذیرش: ۸۰/۱۲/۲۲

چکیده

تعیین میزان ترشوندگی الیاف در اکثر فرایندهای تولید و مصرف نهایی کالای نساجی دارای اهمیت زیادی است. اندازه‌گیری قابلیت ترشدن الیاف اگرچه ساده بنظر می‌رسد، اما همواره مشکلاتی را به همراه داشته است. از این رو، روشهای متعددی برای اندازه‌گیری قابلیت ترشدن الیاف توسط پژوهشگران مختلف ابداع شده است. در این مقاله، ابتدا روشهای مختلف برای تعیین قابلیت ترشدن و زاویه تماس الیاف با مایعات بطور اجمالی تشریح شده و مشکلات هر یک بررسی می‌شود. از میان روشهای مختلف، روش توزین مایع نفوذ کرده در دسته‌الیاف می‌تواند یک روش ساده و کارا تلقی گردد. در این پژوهش از این روش استفاده شده است. نتایج تجربی اندازه‌گیری زاویه تماس آب با الیاف پلی‌استر از راه توزین آب نفوذ کرده به دسته‌نخاست به زمان با نتایج بدست آمده از روشهای بکار برده شده توسط پژوهشگران دیگر مقایسه شده است. با توجه به مطالعات و آزمایشهای انجام شده، بنظر می‌رسد به دلیل تقریبهای متفاوت بکار گرفته شده و تغییرات جزئی ساختار سطحی، نمی‌توان برای هر نوع الیافی یک زاویه تماس مشخص و ثابت مایع - جامد اختصاص داد.

واژه‌های کلیدی: قابلیت ترشدن، زاویه تماس، سطح مشترک لیف - مایع، کشش سطحی، پلی‌استر

Key Words: wettability, contact angle, fiber-liquid interface, surface tension, polyester

مقدمه

حالت کلی ایستا و پویا مطالعه شده است. در حالت ایستا فازهای جامد و مایع در حالت تعادل نسبت به یکدیگرند و در حالت پویا هر دو فاز جامد و مایع با یکی از آنها نسبت به دیگری در حال حرکت است.

قابلیت ترشدن الیاف نیز مانند ترشدن دیگر مواد جامد از اهمیت بسزایی برخوردار است و در اکثر فرایندهای تولید و مصرف نهایی

قابلیت ترشدن مواد جامد به وسیله مایعات و چگونگی آن به صورت نسبی نشان دهنده انرژی آزاد سطح ماده جامد است. میزان ترشدن سطح جامد بطور بیوسنه به وسیله مایع یکی از ابزارهای مناسب برای مطالعه انرژی سطح است [۱]. درباره موضوع ترشدن جامدات دو

* مسئول مکاتبات: پیام نکال | Ansarin@cie.aut.ac.ir

حالت تعادل روی سطحی صاف، یکنواخت، نفوذناپذیر و غیر قابل تغییر شکل معتبر است، ولی بطور گسترده در مطالعه ترشدن و نفوذ مایعات در منسوجات بکار رفته است [۴، ۱].

در بعضی مطالعات مربوط به ترشدن و نفوذ مویستگی، زاویه تماس به عنوان عامل اصلی در فرایند ترشدن معرفی شده، اما با وجود نقش حساس زاویه تماس در تشخیص خصوصیات سطح، زاویه تماس دلیل ترشدن نیست بلکه نتیجه ترشدن تلقی شده است [۴، ۳]. همان گونه که اشاره شد زاویه تماس، زاویه خط مماس به سطح مشترک مایع - هوا و سطح مشترک مایع - لیف است (شکل ۲). به عبارت دیگر، زاویه تماس در ناحیه‌ای بسیار کوچک (مقیاس مولکولی) از مرز تماس سه منطقه لیف - هوا، لیف - مایع - مایع - هوا بوجود می‌آید. بنابراین، زاویه تماس را می‌توان به صورتهای مختلفی مانند زاویه تماس ذاتی یا واقعی (واقع در فاصله کوچکی از مرز تماس لیف - هوا - مایع)، زاویه تماس تعادلی (زاویه تماس بر مبنای رابطه یانگ - دوپری برای سیستمهای ایده‌آل) و زاویه تماس ظاهری (زاویه تماس مشاهده شده بطور تجربی با استفاده از میکروسکوپ) در نظر گرفت. این نمایز مورد توجه برخی پژوهشگران [۳، ۵] بوده است.

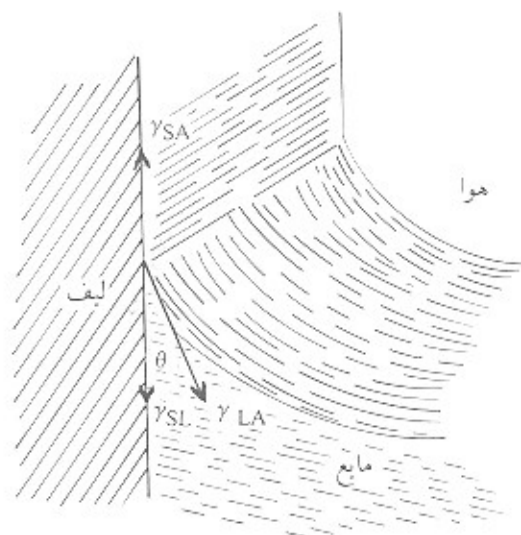
اندازه‌گیری مستقیم زاویه تماس ذاتی ناممکن نظر می‌رسد. عموماً نتایج اندازه‌گیری زاویه تماس ظاهری به جای زاویه تماس ذاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما، به علت سطح ناصاف الیاف تفاوت زیادی بین این دو مقدار وجود دارد. ناهمواری در سطح الیاف و دیگر عواملی مانند ناهمگن بودن سطح و جذب مایعات در انرژی سطح الیاف تغییر ایجاد می‌کند. در چنین سطوحی زاویه تماس ظاهری دارای پسماند می‌شود. عموماً زاویه تماس ظاهری

مواد لیفی شکل مورد توجه قرار می‌گیرد [۳-۱]. قابلیت ترشدن الیاف بستگی به ماهیت شیمیایی سطح الیاف و هندسه الیاف بویژه ناهمواریهای سطحی الیاف دارد.

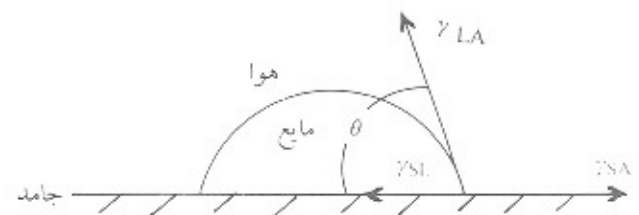
ترشدن لیف نتیجه جایگزینی سطح مشترک لیف - هوا با سطح مشترک لیف - مایع است. در صورتی که هیچ نیروی خارجی در ترشدن لیف دخالت نداشته باشد، کشش سطحی مایع و تمایل اولیه لیف به مایع قابلیت ترشدن خود به خود لیف را در حالت تعادل ترمودینامیکی با مایع نوجیه می‌کند. تعادل ایستای یک قطره مایع با سطح جامد عموماً به وسیله رابطه یانگ - دوپری (Young Dupree) (معادله ۱) و با در نظر گرفتن تعادل نیروها در جهت افقی (شکل ۱) بیان می‌گردد.

$$\gamma_{SA} - \gamma_{SL} = \gamma_{LA} \cos \theta \quad (1)$$

در معادله ۱، γ کشش سطحی فازهای در تماس با هم و S ، L و A به ترتیب نشان دهنده محیطهای جامد، مایع و هوا و θ زاویه تماس بین دو فاز مایع و جامد است. عبارت $\gamma_{LA} \cos \theta$ نشان دهنده نیروی چسبندگی مایع به جامد یا به تعبیر پژوهشگران [۳]، قابلیت ترشدن ویژه است که تفاوت دو نیروی موثر دیگر و تغییر در انرژی آزاد در هنگام جابه‌جایی سطح تماس جامد - گاز با جامد - مایع را نوجیه می‌کند. از آنجا که روش مستقلی برای اندازه‌گیری نیروهای γ_{SL} و γ_{SA} موجود نیست، تأیید تجربی معادله ۱ با مشکل مواجه می‌شود. همچنین، مشکلاتی در مورد رابطه ایستای تعادل نیروها مطرح است که در هنگام متعادل گرفتن انرژی سطوح باید به آن توجه کرد [۴]. اگر $\gamma_{SL} > \gamma_{SA}$ باشد، $\cos \theta$ مثبت و زاویه تماس بین $90^\circ - 180^\circ$ درجه خواهد بود و اگر $\gamma_{SL} < \gamma_{SA}$ باشد، $\cos \theta$ منفی و زاویه تماس بین $180^\circ - 90^\circ$ درجه می‌گردد. بنابراین، با افزایش قابلیت ترشدن زاویه تماس کاهش می‌یابد و بیشترین حد ترشدن زمانی است که زاویه تماس برابر صفر شود. با اینکه معادله ۱ فقط برای قطره‌ای در



شکل ۲- نمای سه بعدی از سطح تماس عمودی لیف با مایع.



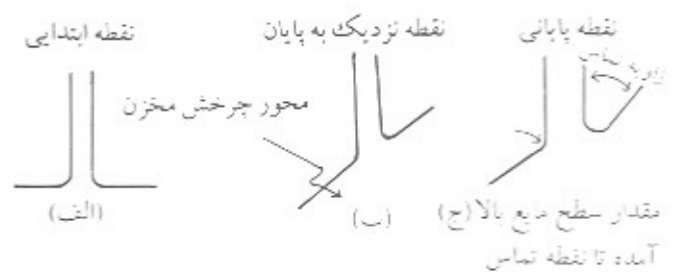
شکل ۱- نمای فرضی از حالت تعادل یک قطره مایع روی یک سطح جامد مسطح [۱].

وجود ندارد [۱]. از این رو، می توان به وسیله مشاهده مستقیم مرز تماس قطره مایع و سطح جامد به نتایج دقیق و تکرارپذیر دست یافت. این روش در مورد جامداتی که ساختار لیفی شکل دارند به علت انحناى ثانویه (مربوط به مدور بودن لیف) و همچنین انحناى سطح تماس مایع با لیف دارای دقت کمی است [۵]. انحناى سطح تماس مایع با لیف به سبب قطر بسیار کم لیف بسیار بزرگ و در دو جهت مختلف است.

بر اساس مشاهده و اندازه گیری مستقیم، آدام و شوت [۶]، زاویه تماس لیف پشم را با آب و محلول دارای شونده بدست آوردند. صفحه نگهدارنده لیف را در داخل ظرف مایع چنان تغییر مکان دادند تا مایع در حالت افقی در تماس با لیف قرار گیرد. سپس، زاویه (واقع در فاز مایع) بین سطح صفحه دربرگیرنده لیف و سطح مایع را اندازه گیری کردند. در طرح دیگری گریند استاف [۷]، صفحه دربرگیرنده نمونه لیاف پلی استر را به داخل مایع فرو برده و خط مرزی ناحیه ای که مایع در تماس با لیاف بود را به وسیله میکروسکوپ مشاهده کرد (شکل ۳ الف). سپس، ظرف دارای مایع چنان چرخانده شد تا سطح مایع کاملاً هم سطح با مرز تماس مایع با لیف گردد (شکل ۳ ج). در نتیجه زاویه بین لیف و مایع همان زاویه تماس بحساب آمد [۷]. در جدول ۱ نتایج حاصل از روش مذکور به نتایج پژوهشگران دیگر

جدول ۱ - نتایج تجربی اندازه گیری زاویه تماس آب با لیف پلی استر از چند مرجع مختلف.

| شماره مرجع | زاویه تماس آب با لیاف پلی استر (درجه) | روش اندازه گیری |
|------------|--|---|
| ۷ | $\theta_1 = 79 - 81$ $\theta_2 = 58 - 55$ | مشاهده مستقیم زاویه تماس وقتی لیف در جهت عمود بر سطح آب وارد شده است. |
| ۹ | $\theta_1 = 79$ $\theta_2 = 74$ | مشاهده مستقیم زاویه تماس وقتی نخ در جهت عمود بر سطح آب وارد شده است. |
| ۲۰ | $\theta_1 = 81.3 - 83.5$ | نیروی ترشیدن |
| ۲۴ | $\theta_1 = 68.35 - 68.45$ | نیروی ترشیدن |
| ۳۷ | $\theta_1 = 61.7 - 76$ | توزین آب نفوذ کرده به دسته نخها |
| ۴۲ | $\theta_1 = 80.57 - 81.23$ | ذکر نشده است |
| ۴۳ | $\theta_1 = 90$ | نیروی ترشیدن |



شکل ۳ - مرز تماس مایع - لیف در زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه (الف) قبل از چرخش ظرف مایع، (ب) در حین چرخش ظرف مایع (ج) همسطح شدن مایع و مرز تماس مایع - لیف [۷].

حاصل از پیشروی مایع (۱) بیشتر از زاویه تماس ناشی از پسروی (۲) است. از این رو، در مباحث مربوط به نفوذ اغلب زاویه تماس ناشی از پیشروی مایع اختیار می شود. از طرفی، چون ترشیدن لیف تحت تأثیر یک زاویه تماس پیشرونده ثابت نبوده و بستگی به زاویه تماس بیوبای ناشی از سرعت حرکت نقطه ای مایع در تماس با لیف دارد، بدیهی است که زاویه تماس بویا کاملاً متفاوت با زاویه تماس ظاهری حالت پستای مایع - لیف بوده و تابع سرعت حرکت مایع، تابع زمان یا هر دو است [۱، ۳].

قابلیت ترشیدن لیف به دو صورت مورد مطالعه پژوهشگران قرار گرفته است: یکی زمانی که حالت تعادل پستای لیف و مایع نسبت به یکدیگر برقرار است و دیگری حالتی که یکی از دو فاز مایع یا لیف یا هر دو در حرکت باشند. توجه یکسان و تجربیات مشابه برای هر دو حالت فوق حواکس نیست و پژوهشگران قابلیت ترشیدن لیف در دو حالت پستا و بویا را بطور جداگانه بررسی کرده اند [۱].

در بخش تجربی این پژوهش، زاویه تماس در حالت ایستا مورد توجه قرار گرفته است. برای نشان دادن مشکلاتی که در این اندازه گیری وجود دارد، روشهای مختلف ابتدا بطور اجمالی بررسی شده است تا شواهد کافی برای منشاء تغییرات دنی فراهم آید.

روشهای اندازه گیری زاویه تماس

اندازه گیری زاویه تماس به روش مشاهده مستقیم و اندازه گیری در مرز تماس؛ روش مشاهده مستقیم برای ارزیابی ترشیدن سطوح صاف و همسانگرد مطرح شده است. در چنین مواقعی مانند شکل ۱، وقتی یک قطره روی سطح جامد قرار می گیرد مشاهده و اندازه گیری زاویه تماس چندان مشکل نیست. زیرا نیروی آزاد سطح در همه جهات یکسان است و تفاوتی در قسمت‌های مختلف خط مرزی مایع - جامد - هوا

جدول ۲- مشخصات نمونه ها.

| کد نمونه | نوع نخ | نمره نخ (تکس) | تاب در متر نخ |
|----------|------------------------------------|---------------|---------------|
| A | پلی استر حلقه ای (عمل شده با سود) | ۵۶/۲ | ۲۹۰/۱ |
| B | پلی استر حلقه ای (عمل نشده با سود) | ۶۳ | ۲۹۰/۱ |
| C | پلی استر حلقه ای | ۶۵/۸ | ۴۳۶/۶ |
| D | پلی استر چرخانه ای | ۵۲/۳ | ۷۲۲/۴ |

وسيله پژوهشگران مختلف [۱۴-۱۱، ۵] مورد مطالعه قرار گرفته است.

در سیستمهایی که موینگی سهم موثرتری نسبت به نیروی جاذبه در وجود آوردن شکل فطره دارند (نسبت شعاع لیف به طول لوله موین بسیار کوچک است)، شکل برش طولی فطره در امتداد لیف تابعی از چهار عامل قطر تک رشته (d)، طول فطره (L)، حداکثر قطر فطره (Y max) و زاویه تماس (θ) است (شکل ۴).

یاماکی و کاناایاما [۱۲] اختلاف فشار بین فاز مایع و هوا (ΔP) را با استفاده از رابطه لاپلاس (معادله ۲) تابع کشش سطحی مایع (γ_{LA}) و شعاعهای اصلی انحنا (R₁، R₂) سطوحی نشان دادند که صفحات آنها روی سطح فطره بر هم عمودند.

$$\Delta P = \gamma_{LA} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

شعاع انحنای R₁ از معادله ۳ بدست می آید.

$$R_1 = - \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2} \frac{2}{d^2} \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3)$$

R₂ هم تابعی از y است که بستگی به x دارد. با توجه به شکل ۴، اگر صفحه T₁ عمود بر منحنی y = f(x) در نقطه A و صفحه T₂ عمود بر محور x ها در نظر گرفته شود مقدار R₂ برابر y/cos θ و به صورت معادله ۴ در می آید [۱۲].

$$R_2 = y \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

از جمع بندی معادله های ۲ تا ۴ معادله کلی ۵ بدست می آید که در آن γ_{LA} برای هر مایع مشخص ثابت بوده و از آنجا که حل تحلیلی معادله ۵ ممکن نیست، از این رو به روشهای عددی یا کمک شرایط اولیه و با استفاده از رایانه این معادله حل می شود.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = - \frac{\Delta P}{\gamma_{LA}} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2} + \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] / y \quad (5)$$

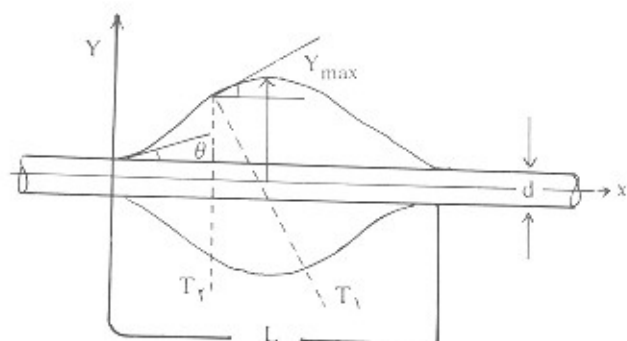
یاماکی و کاناایاما بر اساس معادله ۵، زاویه تماس رزینهای ایوکسی را با لیاف مختلف مانند کربن، پلی اتیلن، پلی وینیل کلرید، پلی کربنات، نابلون ۶، شیشه و کاپولیمر استال بدست آوردند [۱۲].

معادله دیفرانسیل ۵ بیان کننده شکل دایره ای و نشان دهنده شکل

مقایسه شده است. شش سال بعد گریند استاف و پاتیرسون [۸] نشان دادند که به علت پدیده تفرق در نوارمرزی مشاهده همسطح شدن مایع و مرز تماس مایع - لیف مقدور نیست و به همین دلیل نتایج تجربی در مورد لیاف دقیق و تکرارپذیر نیست.

هالیز و همکاران [۹] بر اساس مشاهده مستقیم، زاویه تماس آب با نخهای مختلف را بدست آوردند. بیرون و همکاران [۱۰] نیز پس از اصلاح روش گریند استاف [۸]، زاویه تماس لیاف پشم با بوتانول را اندازه گیری کردند.

اندازه گیری زاویه تماس بر مبنای شکل فرادرومرفتن یک فطره از مایع در اطراف تک رشته و تحلیل ریاضی شکل فطره، مایعات در اطراف یک لیف استوانه ای بدون در نظر گرفتن اثر جاذبه تمایل به حفظ شکل شلغمی (undulloid) متفان نسبت به محور لیف دارند که این موضوع در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۱]. این شکل بستگی به اندازه فطره مایع روی لیف داشته و گاهی بر حسب چگونگی فراگیری فطره مایع روی لیف و اندازه فطره شکل صدف (Clamshell) پدیدار می گردد [۱۱]. بر اساس شکل شلغمی فطره مایع با لیف، استوانه ای بودن آن و نبود نیروی جاذبه، زاویه تماس به



شکل ۴- مقطع یک فطره روی لیف استوانه ای شکل [۱۲].

لیف کم باشد، افزایش دقت اندازه گیری مستلزم وجود قطرات کوچک مایع روی آن است و در صورتی که زاویه تماس زیاد باشد، بهتر است اندازه قطره در اطراف تک رشته بزرگ باشد. از طرفی، نمودارهای حاصل از محاسبات انتگرال بیضی شکل نشان داد که تغییر زاویه تماس تأثیر بسیار کمی در حجم و سطح قطره در تماس با لیف نسبت به طول قطره در اطراف آن دارد [۱۴]. از دیگر محدودیتهای این روش، محاسبات بر اساس شکل متقارن قطره (شلغمی) در اطراف تک رشته است. نتایج آزمایشهای تجربی نشان می دهد که در زاویه های تماس بیشتر از ۶۰ درجه فقط شکل صدفی در اطراف لیف بوجود می آید [۱۴]. از این رو، در محدوده زاویه تماس ۱۲۰-۶۰ درجه استفاده از این معادلات ریاضی ناممکن بنظر می رسد.

در پژوهش دیگری اوگاوا و ابکیدا [۱۵] پس از اصلاح معادله کارول [۵] معادله دیگری ارائه دادند که در آن زاویه تماس به اندازه قطره و ظرافت لیف بستگی نداشت. سپس، زاویه تماس اتیلن گلیکول را با الیاف کربن بطور تجربی اندازه گیری و با نتایج تجربی کارول و روش مشاهده مستقیم مقایسه کردند [۱۵]. در این مقایسه نشان دادند که نتایج آنها از دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. کومار و هارتلند [۱۶] نیز پس از حل عددی معادله دیفرانسیلی شکل قطره روی یک لیف جدولهایی را تهیه کردند که در آن بستگی زاویه تماس با طول، سطح و حجم مایع در تماس با لیف با قطرهای مختلف محاسبه شد. در این محاسبات تأثیر وزن قطره مایع در نظر گرفته شده است [۱۶].

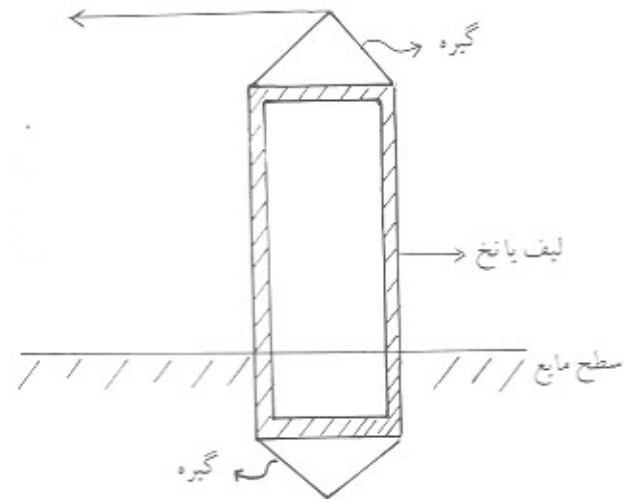
اندازه گیری زاویه تماس به روش اندازه گیری نیروی ترشدن در اثر فرورودن عمودی قسمتی از لیف در مایع؛ اساس این روش بر مبنای مطالعات ویلهلمی [۱۷] است که به وسیله پژوهشگران مختلف [۲۱-۱۸] برای تعیین قابلیت ترشدن الیاف و زاویه تماس مورد استفاده قرار گرفته است. در صورتی که بک لیف به طور عمودی در ظرف دارای مایع وارد شود، توسط نیروی F کشیده می شود که از معادله ۶ بدست می آید.

$$F = \gamma P \cos \theta \quad (6)$$

در این معادله P محیط لیف در مرز تماس سه فاز مایع - لیف - هوا، γ کشش سطحی مایع و θ زاویه تماس مایع با لیف است. قابلیت ترشدن (W) یا به تعبیر بعضی پژوهشگران [۱۸، ۱۹، ۲۲، ۲۳]، نیروی چسبندگی لیف و مایع به وسیله معادله ۷ بیان می گردد.

$$W = \gamma \cos \theta = \text{محیط لیف} / \text{نیروی وارد بر هر لیف} \quad (7)$$

اتصال به ترازوی حساس



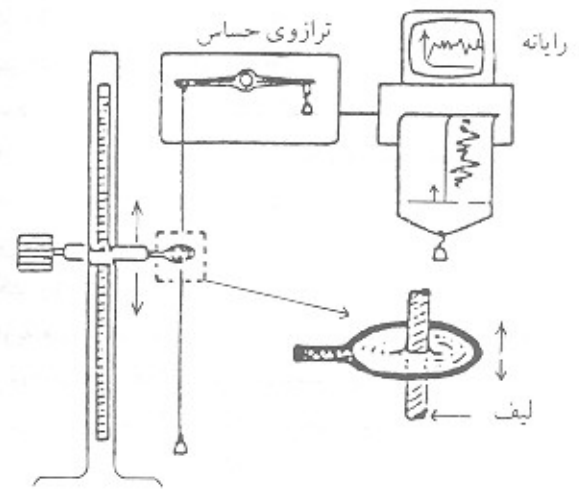
شکل ۵- گیره نگهدارنده نمونه الیاف و نخهای انعطاف پذیر [۱۸]

قطره به صورت کره ای در اطراف لیف است. بنظر می رسد این موضوع از نظر یاماکی و کاتایاما پنهان مانده است، زیرا اگر دایره ای به شعاع $R = \sqrt{x^2 + y^2} = 2\gamma/P$ در نظر گرفته شود در معادله ۵ صدق می کند. به عبارت دیگر، معادله فقط وقتی صادق است که قطر لیف به سمت صفر میل کند یا قابل چشمپوشی باشد. بنابراین، تمایل فیزیکی لیف با مایع در معادله منظور نشده است و بر حسب تغییر در ظرافت الیاف، زاویه نیز تغییر می کند.

کارول [۵] نیز با چشمپوشی از نیروی جاذبه وارد بر قطره تشکیل شده به دور یک تک رشته و ثابت گرفتن اختلاف فشار در سرتاسر سطح قطره در اطراف آن، حالت تعادل قطره را با استفاده از رابطه لاپلاس مطالعه کرد و نشان داد که حجم قطره و سطح در برگیرنده تک رشته به وسیله قطره مایع در مقایسه با طول L دارای تأثیر کمتری بر زاویه تماس است و با در دست داشتن مشخصات شکل قطره شامل بیشترین ارتفاع قطره نسبت به محور تک رشته (x_1) ، شعاع آن (x_2) ، طول احاطه شده تک رشته به وسیله مایع (L) (شکل ۴) و حل معادله های مربوط مقادیر طول در تماس با قطره، سطح قطره مایع در برگیرنده لیف و حجم قطره در اطراف تک رشته و اختلاف فشار در سطح قطره مایع را با نسبت بیشترین ارتفاع قطره نسبت به محور تک رشته به شعاع آن یعنی $(\theta = x_1 / x_2)$ در زاویه های تماس مختلف (۶۰-۹۰) بدست آورد. سپس، نتایج تجربی یک قطره روغن را با الیاف نایلون ۶۶، پلی استر، موی اسب در یک محیط آبی با معادله های بالا مطابقت داد و نشان داده شد [۵] که دقت این روش بستگی به قطر الیاف و همچنین اندازه قطره دارد. چنانچه زاویه تماس بین مایع و

محاسبه محیط آن از طریق اندازه گیری قطر، قابلیت تر شدن بدست آمد [۱۹، ۱۸]. کالینز [۱۸]، از این روش برای تعیین قابلیت تر شدن پنبه با مایعات مختلف استفاده کرد [۱۸].

همچنین، میلر و بانگ [۱۹] برای تعیین زاویه تماس مایعات مختلف با الیاف متفاوت، این روش را مورد استفاده قرار دادند. با اینکه روش یاد شده بطور گسترده برای تعیین زاویه تماس الیاف مختلف با مایعات مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است [۲۳-۲۶، ۲۱-۱۹، ۴]. ولی نتایج بدست آمده از زاویه تماس با نتایج روشهای مستقیم و تحلیل ریاضی شکل قطره تفاوت دارد. به نظر کارول [۱۴]، این اختلاف می تواند ناشی از تغییرات کم وزنی و خطا در هنگام توزین و همچنین عدم دسترسی صحیح به محیط لیف در تماس مایع باشد.

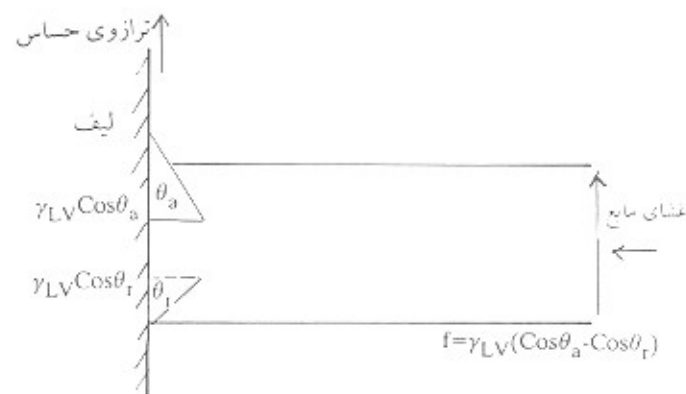


شکل ۶- اندازه گیری قابلیت تر شدن با روش غشای مایع و ترتیب قرار گیری اجزا [۲۷].

در صورتی که نمونه مورد نظر از یک طرف به یک نیرو سنج مانند ترازوی الکترونیکی آویخته شده و از طرف دیگر در ظرف دارای مایع، مانند آنچه در شکل ۵ نشان داده شده، قرار گیرد، معادله ۸ نشان دهنده نیروهای اعمال شده در اثر قرار گرفتن لیف در مایع است.

$$m = F_{\text{ش}} + F_{\text{ک}}$$

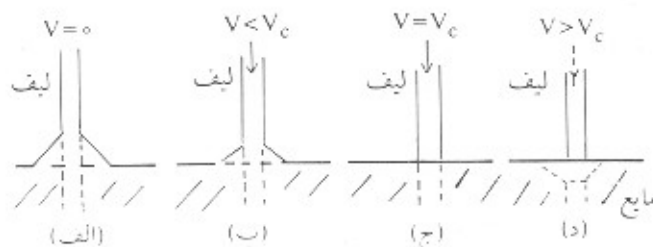
در معادله ۸، m وزن مایع بالا رفته در برگیرنده لیف یا کل نیروی ترکنده، $F_{\text{ش}}$ وزن تصحیح شده برای نمونه خشک و $F_{\text{ک}}$ نیروی حاصل از شناوری لیف و گیره های نیروسنج در مایع است. با در اختیار داشتن نتایج تجربی نیروی وارد بر هر تک رشته و همچنین،



شکل ۷- تجزیه نیروهای حاصل از برهم کنش غشای مایع بالا رفته متصل به لیف [۲۷].

اندازه گیری نیروی تر شدن به وسیله غشای از مایع: در این روش، تک رشته از یک طرف به ترازوی حساس الکترونیکی متصل و از وسط حلقه ای متحرک عبور می کند (شکل ۶). طرف دیگر آن نیز به وزنه مناسب متصل شده و محل لیف در وسط حلقه تنظیم می شود. پس از برقراری حالت اولیه، مایع به آرامی در تماس با حلقه قرار می گیرد و ایجاد یک فیلم یا لایه ای در محیط حلقه می کند.

نیروی تر کردن لیف به وسیله غشایی از مایع بطور پیوسته با حرکت بالارونده با پایین رونده حلقه قابل اندازه گیری و ثبت است. زاویه تماس در دو سطح بالایی و پایینی غشای مایع بوجود می آید و نیروی ثبت شده تابع نیروی حاصل از پیشروی و پسروی غشای در حرکت است. در شکل ۷ نیروهای کشش سطحی وارد بر تک رشته برای غشایی از مایع نشان داده شده است. در ضمن حرکت به سمت بالا، سطح بالایی در حالت پیشروی و سطح پایینی غشای در حالت پسروی است. از این رو، مجموعه مولفه های عمودی بردارهای کشش سطحی $\gamma_{LV} \cos \theta_a$ و $\gamma_{LV} \cos \theta_r$ است که با تک



شکل ۸- تغییر انحناي مایع در اطراف تک رشته در اثر حرکت عمودی آن به داخل مایع [۲۸].

روش پویا برای تعیین قابلیت تر شدن از دقت بیشتری برخوردار باشد. همچنین، این روش به وسیله شیک [۳۰] در مطالعه عوامل موثر بر اصطکاک حاصل از حرکت ایف مختلف در مایعات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرعت لازم برای از بین بردن هلاله آب در تماس با لیف نایلون به جهت آبدوست بودن آن به مراتب از ایف پلی‌استر یا پلی‌پروپیلن و تفلون آنگریزی بیشتر است. بدیهی است که افزایش سرعت لازم برای از بین رفتن هلاله مایع در تماس با سطح جامد، نشان دهنده کم‌تر بودن زاویه تماس مایع و بیشتر بودن قابلیت تر شدن تک رشته به وسیله مایع است.

اندازه‌گیری قابلیت تر شدن به روش شناور شدن - غوطه‌ور شدن: با اینکه روش مستقلی برای اندازه‌گیری انرژی سطح یا کشش سطحی جامد وجود ندارد، می‌توان به روش زیسمان [۳۱] و یا استفاده از مجموعه مایعات هم خانواده با کششهای سطحی مختلف، کشش سطحی بحرانی جامد را تخمین زد [۱، ۳]. زیسمان نشان داد، تنها زمانی که کشش سطحی مایع کمتر از کشش سطحی بحرانی لیف باشد، پخش شدن مایع و ترشیدن سطح جامد بطور کامل انجام می‌گردد. در زاویه تماس صفر بین مایع و جامد، مایع بطور خود به خود بر سطح جامد پخش شده و حداکثر ترشیدن نگاه می‌شود. بنا بر مطالعات یاد شده، پژوهشگران [۳۲، ۳۳] با تعیین غوطه‌ور شدن یا شناور ماندن لیف در مایع و ارتباط آن به کشش سطحی لیف و کشش سطحی مایع به تعیین نسبی قابلیت تر شدن ایف پرداخته‌اند که در ارتباط با زاویه تماس مایع - لیف است. از آنجاکه مفاهیم نظری کشش سطحی بحرانی جامد دارای پیچیدگیهایی است [۳۲، ۳۳] و همچنین، اندازه‌گیری آن مستلزم تعیین زاویه تماس لیف - مایع به یکی از روشهای یاد شده است. مقادیر بدست آمده فقط نسبی بوده و از دقت زیادی برخوردار نیست. فوکس [۳۴] نیز بر مبنای مطالعات بنیادی خود در زمینه تعیین کشش سطحی بحرانی، زمان لازم برای غوطه‌ور شدن کلاف نخ را در مواد فعال در سطح به قابلیت تر شدن ارتباط داد.

تجربی

مواد و دستگاهها

نخه از ایف کوتاه پلی‌استر با نمرد ۱۷ دسی تکس تهیه شدند. از روشهای ریسندگی حلقه ای و چرخانه ای برای تولید نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌های پلی‌استر که به روش ریسندگی حلقه یا چرخانه‌ای تهیه شده‌اند، از نظر ساختاری کاملاً با هم متفاوتند.

رشته به صورت نیروهای مثبت و منفی عمل می‌کنند. با بالا رفتن حلقه، کل نیروی ترشیدن از معادله ۹ پیروی می‌کند.

$$f = P \gamma_{LV} (\cos \theta_a - \cos \theta_r) \quad (9)$$

برای بدست آوردن یکی از زاویه‌های تماس، دیگری باید به روش مستقلی مانند نیروی ترشیدن حاصل از فروبری قسمتی از لیف در مقدار نامحدود مایع معین شود.

روش پویا در فرایندهایی که فاز جامد یا مایع نسبت به دیگری متحرک باشد، حالت تعادل ایستی مایع در تماس با جامد در اثر وجود نیروهای خارجی ناشی از حرکت فاز جامد یا مایع تغییر می‌کند. بنابراین، زاویه تماس پویای دو فاز جامد و مایع مهم می‌شود. پژوهشهای انجام شده بطور عمده در ارتباط با حرکت مایعات تحت تاثیر نیروهای خارجی درون لوله‌های مویین است [۱]. شکل ۸ سطح تماس فاز مایع و جامد به سرعت حرکت فاز متحرک بسیار حساس است و ترشیدن تک رشته بستگی به موقعیت حرکت، نفوذ پذیری آن به سطح مایع و عبور از سطح آن دارد. تغییرات زاویه تماس مایع با لیف هنگام حرکت تک رشته در شکل ۸ نشان داده شده است.

در صورتی که لیف پس از قرار گرفتن در مایع تر شود، زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه و هلاله بالا رونده مایع از لیف نسبت به سطح مایع مشاهده می‌گردد (شکل ۸ الف). با شروع حرکت لیف به درون مایع، هلاله پایین رفته و زاویه تماس بیشتر از حالت اولیه می‌شود (شکل ۸ ب). در صورتی که سرعت حرکت لیف (V) چنان انتخاب شود که هلاله کاملاً از بین برود، زاویه تماس ۹۰ درجه پدیدار می‌گردد (شکل ۸ ج). بدیهی است که افزایش سرعت تک رشته باعث افزایش زاویه تماس شده و پایین رفتن هلاله از سطح لیف ملاحظه می‌گردد (شکل ۸ د). مطالعه توسط عکس برداری مستقیم از حرکت ایف نایلون به داخل مایع نشان می‌دهد که افزایش زاویه تماس نه بیک مقدار حدی کمتر از ۹۰ درجه می‌رسد و بطور کامل از روند اشاره شده در شکل ۸ پیروی نمی‌کند [۱، ۲۸].

دایا و مبلر [۲۸، ۲۹] با استفاده از روش تجربی یاد شده سرعت لازم برای ایجاد زاویه تماس ۹۰ درجه (V_{۹۰}) یا سرعت لازم برای از بین بردن هلاله (شکل ۸ ج) را در بیک سیستم مایع - لیف بدست آوردند. در این روش، اثر دما، غلظت مایع و نوع مایع را در سرعت لازم برای رسیدن به زاویه تماس ۹۰ مایع با ایف نایلون ۶۶ - پلی‌پروپیلن و پلی‌کربنات مطالعه شد [۲۸، ۲۹]. چون اکثر عملیات نساجی در محفظه‌های آبی با حرکت مایع یا عموماً با حرکت منسوج همراه است، بنظر می‌رسد که در این گونه فرایندها،

جدول ۳- شیب نمودار برای هپتان و عامل ساختار محیط متخلخل نخها.

| کد نمونه | نوع نخ | شیب نمودار (M ² /l) (ضریب تغییرات) | عامل ساختار محیط متخلخل * (2/C ² r _p) |
|----------|--------------------|--|---|
| A | پلی استر حلقه ای | 7/139 × 10 ⁻⁴ (2/6) | 3/24 × 10 ⁻⁴ |
| B | پلی استر حلقه ای | 6/197 × 10 ⁻⁴ (2/9/5) | 3/74 × 10 ⁻⁴ |
| C | پلی استر حلقه ای | 9/803 × 10 ⁻⁴ (2/11/5) | 2/36 × 10 ⁻⁴ |
| D | پلی استر چرخانه ای | 8/408 × 10 ⁻⁴ (2/9/2) | 2/75 × 10 ⁻⁴ |

* میلی زول بر مترمربع در مجذور گرم بر سانتیمتر مکعب در ثانیه بر مجذور گرم تقسیم بر میلی پاسکال ثانیه در مربع گرم.

روش

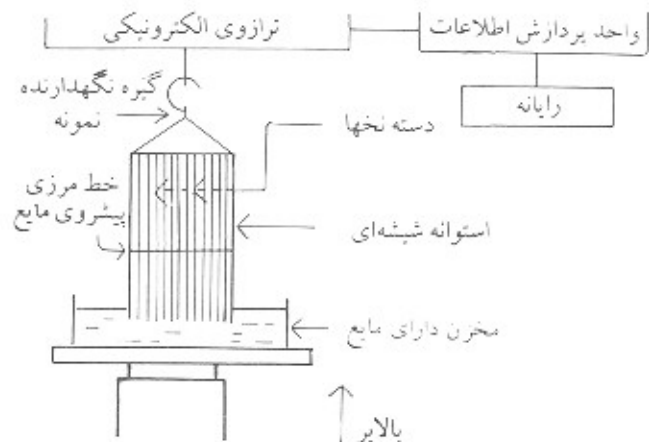
نخمین زاویه تماس به وسیله اندازه گیری وزن مایع نفوذ کرده به دسته نخها نسبت به زمان انجام شد. با استفاده از رابطه عمومی وین برون [35] که ضول پیشروی مایع در یک لوله موئین را نسبت به زمان، تابع مشخصات رئولوژیکی مایع، شعاع موئینگی لوله موئین و تمایل مایع به جداره لوله موئین (زاویه تماس) فرض می کند، وزن مایع نفوذ کرده در لوله موئین در زمانهای مختلف قابل تعیین است. پژوهشگران [36] برای مطالعه گشتش سطحی مواد جامد مانند پودرها و شبکه‌های پلیمری، از وزن مایع نفوذ کرده به فضاهای موئینگی بین ذرات محیط جامد استفاده کرده اند. بنابراین، زاویه تماس را بین مایع نفوذ کرده و محیط متخلخل حاصل از کنار هم قرارگیری الیاف بر طبق معادله ۱۰ قابل تعیین است (ضمیمه ۱).

$$\cos \theta = (2/C^2 r_p) (\eta/\rho^2 \gamma) (M^2/l) \quad (10)$$

در معادله ۱۰، r_p شعاع موئینگی معادل η گرانروی مایع، γ کشش سطحی مایع، M وزن مایع نفوذ کرده به محیط متخلخل حاصل از کنار هم قرارگیری الیاف و نخها، ρ چگالی مایع و C سطح مقطع فضاهای موئین در دسترس مایع است. در معادله ۱۰ از نیروی جاذبه صرفنظر شده و شکل هندسی محیط متخلخل (2/C² r_p) ثابت و جریان مایع در فضاهای خالی به صورت خطی فرض شده است [36] برای نخمین زاویه تماس آب با لیف پلی استر، ابتدا الیاف پلی استر به صورت دسته هایی از نخ های موازی با فشردگی یکسان در یک

مشخصات نمونه ها در جدول ۲ آمده است. نخها ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰°C در حمام ۲g/l شوینده آنیونی و ۱g/l کلسیم کربنات ششو و سپس در دمای معمولی محیط خشک شدند. نمونه A به مدت یک ساعت در محلول ۱۰ درصد سود در دمای ۸۰°C قرار گرفت، پس از شستشو با آب، خشی سازی با محلول ۲ g/l استیک اسید به مدت ۵ دقیقه و شستشوی نهایی با آب انجام شد. در نتیجه، علاوه بر زوده شدن هر نوع مواد تکمیلی، مقدار قابل توجهی از پلی استر نخ A حل شد و سطح جدیدی وجود آمد.

برای تعیین زاویه تماس بوسیله اندازه گیری وزن مایع نفوذ کرده به دسته نخها نسبت به زمان از دستگاه نیروسنج Kruss Tensiometer-K ۱۲ ساخت آلمان استفاده شد.



شکل ۹- اصول کار دستگاه اندازه گیری وزن مایع نفوذ کرده به دسته نخها [37].

جدول ۴- نتایج تجربی شیب نمودار و زاویه تماس محاسبه شده برای نمونه های مختلف با آب خالص و شوینده.

| کد نمونه | شیب نمودار (M^2/l) (ضریب تغییرات) | | زاویه تماس معادل (درجه) | |
|----------|--|-----------------------------------|----------------------------|-----------|
| | آب خالص | آب+شوینده | آب خالص | آب+شوینده |
| A | 1.054×10^{-4} (/۸/۴) | 1.2288×10^{-4} (/۱۵) | ۶۱/۷ | |
| B | 7.734×10^{-4} (/۱۰/۸) | 1.1101×10^{-4} (/۶/۴) | ۶۶/۴ | |
| C | 7.417×10^{-4} (/۱۵/۹) | 1.4144×10^{-4} (/۲۰) | ۷۶ | |
| D | 7.962×10^{-4} (/۹/۳) | 9.118×10^{-4} (/۶/۳) | ۶۹/۷ | |

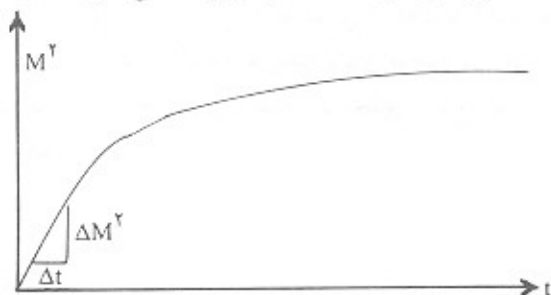
* از تغییر ناچیز گر نیروی و چگالی جرمی در اثر افزودن شوینده به آب صرف نظر شده است.

سطح الیاف صرف نظر شده است و به جای کسینوس زاویه تماس حدود ۰/۹۸، مقدار ابرای هپتان در نظر گرفته شده است [۳۷].

نتایج و بحث

شیب نمودار مجذور وزن مایع کاملاً ترکنده هپتان نفوذ کرده به نخها نسبت به زمان از تجربیات بدست آمد. سپس، عامل ساختار محیط حاصل از کنار هم قرارگیری دسته نخها محاسبه شد (جدول ۳).

در ادامه نتایج تجربی شیب نمودار آب خالص و آب همراه با شوینده برای همان نمونه نخها بدست آمد. در نتیجه با مشخص بودن عامل ساختاری هر نمونه، محاسبه زاویه تماس از معادله ۱۰



شکل ۱۰- راهنمای تعیین شیب نمودار (M^2/l) در قسمت خطی [۳۸].

استوانه شیشه ای توخالی با قطری ۲ و طول ۴۰mm فرار گرفتند. انتهای نخها به فاصله تقریبی ۲mm از استوانه شیشه ای بطور کاملاً صاف بریده شد. سپس، استوانه شیشه ای حامل دسته نخها به گیره مخصوص نگهداری نمونه به ترازوی حساس الکترونیکی (Torsion Balance) آویخته شد (شکل ۹). وزن مایع نفوذ کرده از یک طرف سر نخها به درون مجموعه نخها در استوانه شیشه ای در زمانهای مختلف اندازه گیری شد. کلبه مراحل تنظیم دستگاه، محدوده دقت اندازه گیری و ثبت اطلاعات حاصل از نتایج به کمک یک نرم افزار مناسب بدست آمد [۳۷].

نتایج تجربی شیب نمودار (M^2/l) در قسمت خطی برای مایع ترکنده ابده آل هپتان [۳۷، ۳۸] برای نمونه نخها معین گردید (شکل ۱۰). سپس، طبق معادله ۱۰ عامل ساختار محیط متخلخل ($2/C^2$) محاسبه شد. بدین ترتیب تخمین زاویه تماس مایعات دیگر که از خاصیت ترکندگی کامل برخوردار نبودند (مانند آب)، برای نخهای پلی استر با روشهای متفاوت تولید ریسندگی (حلقه ای، چرخانه ای و ذوب ریزی) ممکن شد.

به نظر میسر [۱۹]، با توجه به ارتباط زاویه تماس با مقدار کسینوس آن تا حدود ۱۵ درجه، نسبت یک به یک بین کسینوس زاویه و خود زاویه وجود دارد. با افزایش زاویه تماس در صد افزایش خطا بالایی رود و در ۹۰ درجه به بیشترین مقدار خود می رسد. در محاسبات، از زاویه تماس کم مایع ترکنده هپتان با

ممکن شد. در محاسبات کشش سطحی مایع [۳۷]، چگالی جرمی و گرادیان استخراج شده از مراجع [۳۹، ۳۶] مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۴).

نخهای A، B و C از نظر ساختاری کاملاً با هم متفاوتند و برداشت موینگی متفاوتی از آب دارند [۴۰]. با توجه به جدول ۴، زاویه تماس حاصل آب خالص با نخهای پلی استر به روشهای تولید ریسندگی متفاوت، مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند. این نتایج با مقادیر زاویه تماس آب - لیف پلی استر با روشهای مختلف از مراجع دیگر [۴۳-۴۰، ۲۴، ۱۰] مطابقت لازم را دارد (جدول ۱). عدم یکسانی کامل و تکرار پذیری نتایج برای نخهای مختلف از جنس پلی استر، می‌تواند ناشی از حساسیت زاویه تماس به روش اندازه‌گیری [۵]، انحنا سطح لیف [۵، ۴۰، ۱۹]، ناهمسانگردی و نایکنواخت بودن مشخصات سطحی [۱۹] و شرایط محیط باشد. از این رو، نظر می‌رسد روش بکار گرفته شده در این پژوهش می‌تواند با تقریب خوبی برای تعیین زاویه تماس لیاف مختلف با مایعات متفاوت بکار رود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج پژوهشهای منتشرشده در دسترس در زمینه روشهای اندازه‌گیری قابلیت ترشدن لیاف نساجی توسط مایعات مورد توجه واقع شد. اندازه‌گیری قابلیت ترشدن با زاویه تماس سطح مشترک لیاف و مایعات به علت نایکنواختی سطح لیاف، انحنا هندسی و ماهیت شبیهایی لیاف همواره دارای مشکلاتی است. در روشهایبداع شده همواره از مجموعه عوامل تأثیرگذار برای ساده کردن روابط صرفنظر شده است که موجب عدم دقت و تکرار ناپذیری در این روشهاست. پس از مقایسه نتایج تجربی برای لیاف پلی استر به روشهای مختلف بنظر می‌رسد روش سوزین آب نفوذ کرده به دسته نخهای تشکیل شده از لیاف پلی استر و استفاده از رابطه نظری واش برن برای تخمین زاویه تماس از دقت و تکرار پذیری لازم برخوردار است. با توجه به پیچیدگیهای موجود در زمینه تطبیق روابط نظری با نتایج تجربی، ضرورت تحقیق و شیخ بیشتر در این زمینه احساس می‌شود.

فدردانی

مولفان از زحمات و نظرات کلی دکتر جعفرعلی امیربیات و ویژه تجزیه تحلیل روابط ارائه شده توسط کارول و یماکی تشکر و

فدردانی می‌کند. همچنین، از زحمات دکتر کارینا گروتد از مرکز تحقیقات پلیمر شهر درسدن آلمان فدردانی می‌شود.

ضمیمه ۱:

با توجه به رابطه عمومی واش برن در صورتی که وزن مایع نفوذ کرده در لوله موین به جای طول پیشروی منظور گردد معادله به صورت کلی زیر در می‌آید [۳۵]

$$L^* = (r_c \cdot r_e \cdot \cos \theta) / (2\eta) \cdot t$$

$$M = \rho V = \rho L C$$

$$L^* = M^* / \rho^* C^*$$

معادله واش برن با احتساب وزن مایع نفوذ کرده [۳۷]:

$$M^* / \rho^* C^* = (r_c \cdot t / \eta) \cdot \gamma \cdot \cos \theta$$

$$\cos \theta = (M^* / t) \cdot (\eta / C^* r_c) \cdot (\rho^* / \gamma)$$

در این معادله ها C سطح مقطع فضاهای موین، M وزن مایع، t شعاع موینگی معادل V، حجم مایع نفوذ کرده، L طول پیشروی و ρ چگالی جرمی مایع است.

مراجع

1. Miller B.: "Wetting of Fibers", *Surface Characteristics of Fibers and Textile Materials*, (Part II), Schrick M. J. (Ed.), Marcel Dekker, New York, 1977.
2. Chatterjee P.K. and Nguven H.V.: "Mechanism of Liquid Flow and Structure Property Relation": *Absorbency*, Chatterjee P. K. (Ed.), Elsevier Science B.V., 1985.
3. Kissa E.: "Wetting and Wicking", *Tex. Res. J.*, 66, 660, 1996.
4. Muller B.: "Experimental Aspects of Fiber Wetting and Liquid Movement Between Fibers".

- Absorbency*, Chatterjee P.K. (Ed.) , Elsevier Science, B.V., 1985.
5. Carroll B. J., "Accurate Measurement of Contact Angle , Phase Contact Areas, Drop Volume and Laplace Excess Pressure in Drop on Fiber Systems", *J. Colloid Interface Sci.*; **57**, 488 , 1976.
 6. Adam N. K. and Shute H. L.: "The Determination of Contact Angles on Thin Wires or Single Textile Fibers"; *Wetting and Detergency*; Harvey , London, 53 R., 1937
 7. Grindstaff T. H.: "A Simple Apparatus and Technique for Contact- Angle Measurement on Small-Denier Single Fiber" *Tex. Res. J.*; **39** , 958 , 1969
 8. Grindstaff T.H. and Patterson H.T.; " A Common Error of Contact Angle Measurements on Fibers Using the Level Surface Method". *Tex. Res. J.*; **45**, 760, 1955.
 9. Hollies N.R.S. Kaessinger M.M. and Bogaty H.; " Water Transport Mechanism in Textile Materials" Part II, *Tex. Res. J.*; **26**, P820, 1956.
 10. Byrne K.M., Roberts M.W. and Ross J.R.H., "The Critical Surface Tension of Wool " *Tex. Res. J.*; **49**, 34, 1979
 11. Minor F.W. , Schwartz A.M. , Wulkow E.A. and Buckles L. C. : "The Migration of Liquids in Textile Assemblies" part II, *Tex. Res. J.* ; **29**, 931, 1959
 12. Yamaki J. I. and Katayama Y.: "New Method of Determining Contact Angle Between Monofilament and Liquid", *J. Appl. polyn. Sci.* , **19** , 2897, 1975
 13. Carroll B.J. , " The Determination of Contact Angle of a Liquid Droplet on a Thin Fiber" *Tex. Res. J.* ; **47** , 561, 1977.
 14. Carroll B.J. : "Deposition of Liquid Drops on a Long Cylindrical Fiber", *Tex. Res. J.* , **58**, 495 , 1988.
 15. Ogawa T. and Ikeda M.: "Determination of the Contact Angle of a Liquid Droplet on a Carbon Fiber", *J. Adhesion* ; **43**, 69, 1993.
 16. Kumar and A Hartland S "Shape of a Drop on a Vertical Fiber" , *J. Colloid Interface Sci.* , **124**, 67, 1988
 17. Wilhelmv J., "Ueber die Abhangigkeit der Capillaritats-Constaten des Alkohols von Substanz and Gestalt des Benetzten Festen Korpers", *J. Ann. Phys.* , **119** , 117, 1863
 18. Collins G. E.: " A Surface Tension Method for Measuring the Perimeters of Fibers and the Contact Angles of Liquids Against Fibers", *J. Text Inst.* , **38**, (T) 73, 1947
 19. Miller B. and Young R.A.: " Methodology for Studying the Wettability of Filaments", *Tex. Res. J.* ; **45**, 359, 1976.
 20. Minor F. W., Schwartz A. M., Wulkow E. A. and Buckles L. C.: " The Migration of Liquids in Textile Assemblies" part III, *Tex. Res. J.*; **29**, 940, 1959
 21. Penn L.S. , Nitta C.K. and Rebenfeld L. : "The Effect of Drawing on the Wettability of Polyethylene Terephthalate Filaments", *Tex. Res. J.*; **51**, 774, 1981.
 22. Adamson A.W.; *Physical Chemistry of Surfaces*, 5th. Ed., John Wiley, New York, 1990
 23. Kamath Y.K., Dansizer C.J. and Weigmann H.-D. "Surface Wettability of Human Hair", *J. Appl. Polym. Sci.* , **29**, 1010 , 1984
 24. Hsieh Y. L. and Yu B.: " Liquid Wetting, Transport and Retention Properties of Fibrous Assemblies" part I, *Tex. Res. J.*; **62**, 677, 1992.
 25. Carrion-Fite F. J. : "Dynamic Wetting of Nylon 66 Using Aqueous Solutions of Anionic, Nonionic, And mixed Surfactants", *Tex. Res. J.* , **64**, 1, 49, 1994
 26. Kamath Y.K., Hornby S. , Weigmann H.-D. and Wilde M.F.: " Wicking of Spin Finishes and Related Liquids into Continuous Filament Yarns", *Tex. Res. J.* , **64** 33, 1994.
 27. Kamath Y.K., Dansizer C.J., Hornby S. and Weigmann H.-D., "Surface Wettability Scanning of Long Filaments by a Liquid Membrane Method", *Tex. Res. J.* , **57**, 205 , 1987.

28. Dyba R. V. and Miller B.: "Dynamic Measurement of the Wetting of Single Filaments" *Tex. Res. J.* : **40** , 884, 1970.
29. Dyba R.V. and Miller B. : "Dynamic Wetting of Filaments in Solutions", *Tex Res.J.*: **41**, 978, 1971.
30. Shuck M. J., " Friction and Lubrication of Synthetic Fibers" *Tex. Res.J.* : **44**, 758 ,1974.
31. Zisman W.A.: *Contact Angle, Wettability and Adhesion*. Gould R.F. (Ed.), *Advances in Chemistry Series* Am. Chem. Soc. Washington, D.C., **43**, 1 , 1964.
32. Bateup B. O. , Cook J.R. , Feldtman H. D and Fleischfresser B. E.: " Wettability of Wool Fibers", *Tex. Res. J.*: **46**, 720 ,1976.
33. Ward T.T. and Benerito R. R.: "Testing Based on Wettability to Differentiate Washed and Unwashed Cotton Fibers" *Tex. Res. J.* : **55**, 40, 1985.
34. Fowkes F.M.: " Role of Surface Active Agents in Wetting", *J. Phys. Chem.*: **57**, 98, 1953.
35. Washburn E.W., "The Dynamic of Capillary Flow", *Phys. Rev.*: **17**, 273 ,1921.
36. Grundke K., Bogumil T., Geitzelt T., Jacobasch H.-J. , Kwok D. Y and Neumann A.W.: " Wetting Measurement on Smooth , Rough and Porous Solid Surfaces", *Progr. Colloid Polym. Sci.*, **101**, 58 ,1996.
37. انصاری ن.، پایان نامه دوره دکتری، "تاثیر ساختار مجموعه لیفی در برداشت آب به وسیله مویزگی"، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۸۰-۱۳۷۹.
38. Troger J., Lunkwitz K., Grundke K. and Burger W., "Determination of the Surface Tension of Microporous Membranes Using Wetting Kinetics Measurements", *Colloids Surfaces, A: Physicochem Eng. Aspects* **134** , 299, 1998.
39. Lide D.R.: *Handbook of Chemistry and Physics*: CRC , 1992.
40. انصاری ن. و حقیقت‌کیش م.، "شیوه انتقال آب در نخ"، *مجله علوم و تکنولوژی پلیمر*، سال هشتم، شماره دوم، صفحه ۷۸ تا ۸۳.
41. Zeronian S. H., Collins M. J., Kim M. S. and Warren L. J., "Wetting of Polyester and Cotton Fabrics with a Nonionic Surfactant Solution", *Textile Chem. Color.*: **18**, 4, 15, 1986.
42. Sanders E.M. and Zeronian S.H.: "An Analysis of the Moisture-Related Properties of Hydrolyzed Polyester", *J. Appl. Polym. Sci.*: **27**, 4477, 1982.
43. Hsieh Y.L., Miller A. and Thompson J.: " Wetting, Pore Structure and Liquid Retention of Hydrolyzed Polyester Fabrics", *Tex. Res. J.*, **66**, 1, 1, 1996.