دراسة الخواص المورفولوجية لألياف الصوف السورية

د.محمد تركاوي

ملخص :

إن تركيب ألياف الصوف أكثر تعقيداً من الألياف النسيجية الأخرى . تم قص ألياف من أماكن مختلفة من جسم الخروف. اعتمدنا في دراستنا على برامج معالجة الصور imag j في تحليل البنية السطحية لليف الصوف حيث أظهرت الصور المجهرية السطوح الحرشفية لليف الصوفي.

إن ألياف مؤخرة الخروف تمتلك قطراً أكبر من باقي الألياف. أجريت الدراسة على خراف بأعمار فتية و أخرى هرمة و تبين أن الخروف الصغير يمتاز بنعومة عالية مقارنة بالخروف ذو الأربع سنوات و يظهر الفارق جلياً في الأطراف حيث يبلغ مقدار التفاوت ما يقارب micron 25 .

يتميز السطح الخارجي لليف الخروف الهرم بحراشف واضحة مكتملة النمو على عكس الخروف الفتي الذي يمتاز بعدد كبير من الحراشف الغير ناضجة في واحدة الطول .

تأليف :

د.م: محمد تركاوي

كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – قسم هندسة الغزل والنسيج

Mobile : 0947898858 – Email : mturkawi@hotmail.com

الكلمات المفتاحية : ليف الصوف ، البنية المورفولوجية ، قطر الليف ، سطح الليف .

Abstract

The wool fibers have a more complicated structure than other texile fibers.

Fibers have been taken from different parts of sheep corp. we use a picture treatment program imag j for analyzing the surface structure of wool fiber.

The SEM shows the scaly surface of wool fiber.

The diameter of backside sheep fiber is bigger than the other parts.

The study includes a little sheep and an old sheep and it has been shown that The little sheep has more finer fiber in comparison with the four -year sheep. the difference is quite distinct in the legs which reachs 25 micro.

The external surface of old sheep wool fiber has obvious full mature scales on contrary of young sheep which has a great numbers of immature scales per the length unite.

. **Key words :** wool fiber، morphology structure ، diameter fiber ، fiber surface

1- مقدمة:

يعتبر الإنتاج الحيواني في مختلف أنحاء العالم ذو مكانة هامة في الاقتصاد الزراعي، ويعتبر الصوف أحد المنتجات الهامة للثروة الحيوانية حيث يحتل مركزاً مرموقاً في اقتصاد العديد من البلدان .

الصوف Wool ببساطة هو تلك الشعيرات التي تغطي أجسام بعض الحيوانات و له أنواع. أما الشعيرات التي تنمو على أجسام الحيوانات فتعطي مسميات أخرى مثل الموهير لماعز الأنجورا ، الوبر من الجمال ، الشعر من حيوانات اللاما والماعز.....

استخدم الإنسان الصوف منذ قديم الزمن في تغطية جسده وذلك عندما استعمل جلود الحيوانات التي كان يصطادها حيث تعلم كيف ينتزع الشعر وينسجه لصنع ملابسه.

دلت الاكتشافات على أن الإنسان الأول كان على إلمام بعمليات غزل الصوف ونسجه إذ كان قدماء المصريين و اليونان يقومون بعمليات الغزل و النسج داخل المنازل .وقد برع الرومان في عمل أقمشة متنوعة السماكات من الصوف. [11]

تربى في ايطاليا و نيوزلندا و بلجيكا و اسبانيا أغنام المرينو التي يعد صوفها من أجود الأصواف وذلك لأنه يتميز بنعومة عالية. تعد اسبانيا حالياً أكثر بلدان العالم إنتاجاً لهذا النوع من الصوف.

لم تهتم البلاد العربية لدى تربيتها للأغنام بصوف الأغنام و ذلك لخشونته و سوء نوعيته و تركز اهتمامها على اللحم كما لا يمكن لسلالات الأغنام ذات الصوف ذو النوعية الجيدة المقدرة على العيش في البيئة الصحراوية ، و لذلك تركزت الصناعات النسيجية الصوفية في الدول العربية على إنتاج السجاد و البسط.

يحظى الصوف بأوفر قدر من المزايا التي تتصف بها الأنواع الأخرى من الألياف حيث أنه:

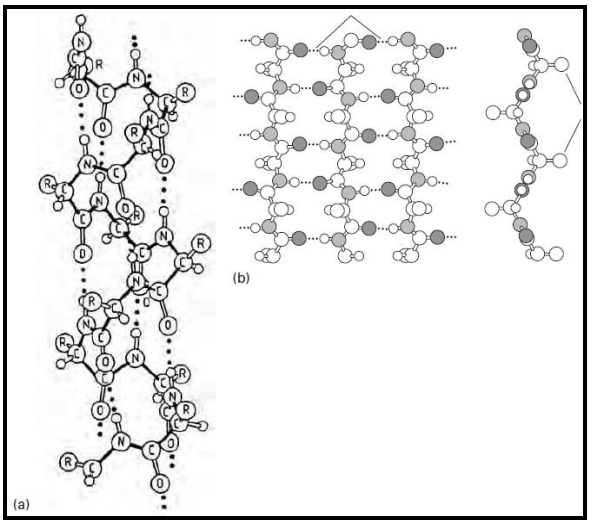
- يساعد على تحمل تقلبات الجو
- عازل جيد للحرارة لاحتجازه حجم أكبر نسبياً من الهواء ضمن شعيراته.

- ذو قدرة عالية على امتصاص الماء.
- عاكس جيد للضوء.
- يمرر الأشعة فوق البنفسجية.
- قابليته للتلبيد جيدة لوجود الحراشف Scales والانثناءات Crimps .
- خواصه الكيماوية جيدة فهو لا يتأثر بالكحول أو البنزين أو الإيثير إلا على درجات حرارة عالية.
- لا يميل للاحتراق وتسهل صباغته ويحتفظ بالصباغ لمدة طويلة.
- عازل جيد للكهرباء وفي نفس الوقت مولد جيد للكهرباء الساكنة. [12]
- يتحمل الحرارة العالية (فقط إذا زادت عن 100 درجة مئوية فإنه يبدأ في التحلل ويأخذ لونا مصفراً). [11]

إن الشكل المورفولوجي لشعر الإنسان يشبه بشكل كبير للصوف المغطي لجسم الأغنام. يمتلك الصوف بنية فيزيائية معقدة أكثر من الألياف الأخرى. يحتوي الصوف على البروتين و الكيراتين المكونة من 18 حمض أميني α ذات الصيغة H2N.CHR.COOH . الشكل(1)

يمكننا اعتبار الألياف الصوفية من وجهة نظر جزيئية بأنها ألياف مركبة حيث تتكون من ألياف (fibril) و مادة المحفظة الحاوية لألياف (fibril) ولكلا المادتين التركيب الكيميائي نفسه حيث تكون كلا المادتين متصلتان و مترابطتان فيزيائياً و كيميائياً. [1]

بالنظر إلى تركيب البروتين الداخلي للصوف فإن (fibrils) يتضمن بنية بروتينية مركبة ذات تركيب غير نظامي (شاذ).

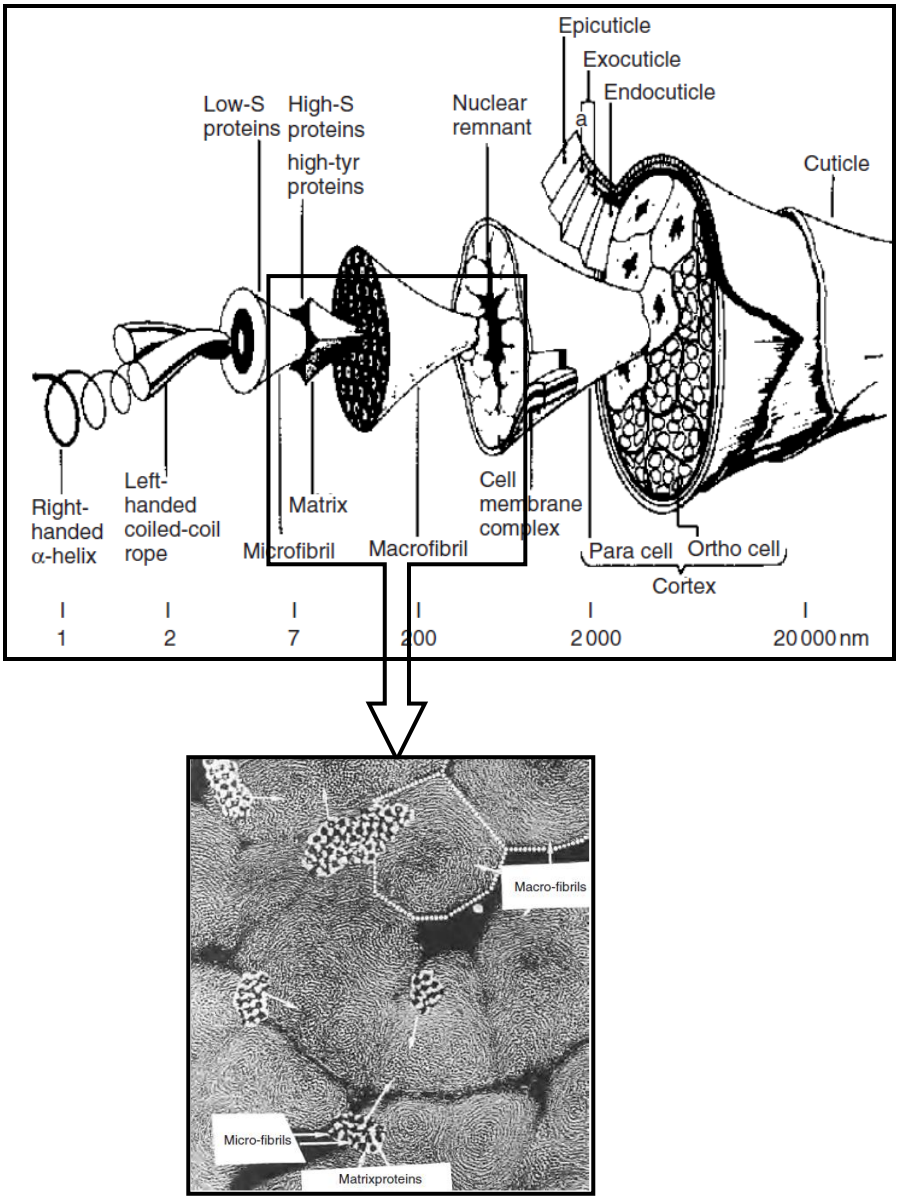


الشكل 1: البنية الكيميائية لليف الصوف

2-توضع و تركيب البنية الشكلية لمكونات الصوف :

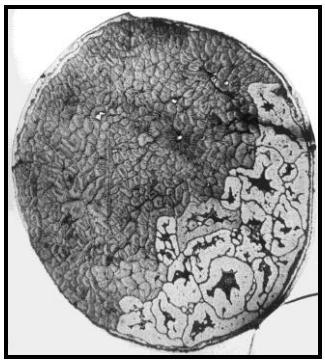
composition and structure of morphological components of) (wool):

يوضح الشكل(2) الشكل الكلاسيكي للتوضع المورفولوجي لشعيرة الصوف حيث أن الشعيرة محاطة بخلايا البشرة (cuticle) و تتألف من أربع طبقات على الأقل و سميت هذه الطبقات بالترتيب (epicuticle, the A-layer) و (B-layer of the exocuticle)و(endocuticle) و تكون البشرة محاطة بكتلة مركبة من خلايا لحائية لها شكل مغزلي و مصطفة مع محور الليف مع نهايات مهدبة متقاطعة مع بعضها البعض و تكون كل من خلايا اللحاء و خلايا البشرة مفصولة عن بعضها البعض بما يعرف بالأغشية الخلوية هذا الغشاء الخلوي المعقد يضمن روابط بين خلوية قوية و متماسكة . [1]



الشكل 2 : الشكل الكلاسيكي للتوضع المورفولوجي لشعيرة الصوف و كذلك صورة مجهرية لمقطع عرضي لخلايا الطبقة الخارجية

يوضح الشكل (2) صور مجهرية لمقطع عرضي لخلايا اللحاء و التي تبين توضع خلايا (macrofibrils) باتجاه محور الليف ، إن (macrofibrils) تتألف بحد ذاتها من مئات من (microfibrils) و بشكل عام عند تلطيخ الليف بنترات الفضة داخل محلول الأمونيا فإنه يمكن التمييز بين نوعين من خلايا اللحاء التي تتلطخ بشكل متباين و هي الخلايا التي تبدو بلون فاتح و تسمى (orthocortex cells) و الخلايا التي تبدو أكثر قتامة و تسمى (paracortex cells) . الشكل (3)



الشكل 3 **:** مقطع عرضي لخلايا اللحاء تظهر فيها خلايا orthocortex و خلايا paracortex

تشبه خلايا البشرة قصاصة ورقية مستطيلة الشكل منحنية بعض الشيء أبعاده (20مكرون) *(30مكرون) أما الثخانة فتتراوح (0.8–0.5 مكرون) و تبلغ نسبة وزن البشرة إلى وزن الليف الصوفي -16–6% . بالنظر إلى المقطع العرضي للألياف الصوفية سوف نلاحظ طبقة وحيدة مفردة من خلايا البشرة تحيط بخلايا اللحاء (orthocortex) بينما خلايا اللحاء (paracortical) فإنها تحاط على الأقل بطبقتين أو ثلاث طبقات من خلايا البشرة و التي يمكن تحديدها بشكل واضح حيث تكون خلايا البشرة الخارجية أثخن من تلك الداخلية و المتوضعة أسفلها. [13]

من أجل الألياف ذات القطر أقل من 15 مكرون تظهر خلايا بشرة مفردة تحيط بجذع الليف على شكل لولبي و هذه الخلايا تكون متداخلة بعض الشيء مع بعضها البعض و تكون كل الخلايا منفصلة بشكل كامل عن خلايا البشرة المتوضعة أسفلها.

خلايا البشرة (paracortex cells) تكون أكبر بنسبة 40% من خلايا (orthocortex) .

يحتوي سطح خلايا البشرة على حموض دسمة مرتبطة بشكل شعاعي و التي تدعى (chiral 18-methyl eicosanoic acid (18-MEA)) و التي ترتبط بروابط من نوع (thioester linkage) و تدعى هذه الطبقة في بعض الأحيان (F-layer).

ومن خلال النظر من المكروسكوب فإن الحموض الدسمة تميل لتشكيل طبقات متداخلة و متكاملة باتجاه السطح أكثر من كونها مستقلة .

إن طبقة البشرة (epicuticle) تتميز بأنها لديها حساسية عالية من المواد القلوية و المواد المؤكسدة و الأوساط الأنزيمية و حيث يتراوح سماكتها 2,5 مكرومتر و هي تشكل حوالي 1% من وزن الليف و تتألف من مجموعة من الحموض الدسمة بما فيها (18-MEA) و بروتينات بالإضافة إلى كربو هيدرات.

3- الخواص الفيزيائية لألياف الصوف:

يمتلك الصوف تركيباً أكثر تعقيداً بين الألياف المستخدمة في النسيج . إن هذا التركيب لشعرة الصوف لديه تأثيراً واضحاً على المواصفات الفيزيائية و لذلك فإن كل آليات التعامل مع شعيرة الصوف أصبحت مفهومة.

إن شعيرة الصوف الأمثل لها مقطع عرضي دائري ، و الأقطار المختلفة لشعيرة الصوف تتراوح مابين (20–40μm)، لكن في الحقيقة المقطع العرضي لشعيرة الصوف أهليلجي تقريباً وليس دائري. يتراوح طول شعيرة الصوف ما بين (5–50cm) أما كثافة شعيرات الصوف حوالي ($1.3 g/cm^3$). [2]

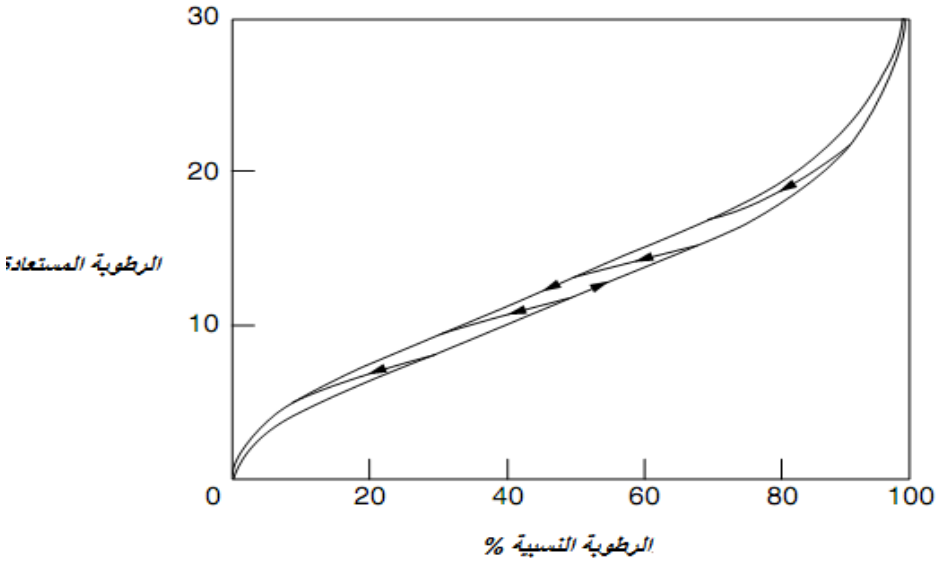
امتصاص الرطوبة:

البروتين الموجود في الصوف يحتوي على _CO.NH_ وعلى مجموعات أخرى محبة للماء. الشكل (4) يظهر التغير في استعادة الرطوبة (كتلة الرطوبة الممتصة/ كتلة الألياف الجافة) مع الرطوبة النسبية . في الظروف المثالية عند درجة حرارة 20 درجة مئوية و رطوبة نسبية 56% فإن القيم المستعادة تتراوح ما بين 14 – 18%.

وجد Perston و Nimkar [3] أن الصوف المتحلل يحتفظ ب 133% من الرطوبة المستعادة عندما يمتص 30سم من الزئبق في الحالة الرطبة ، لكن يحتفظ فقط ب 45% عند عملية الطرد المركزية ل 1000غ لمدة 5 دقائق .

كما نرى في الشكل (4) هناك تراجع في امتصاص الرطوبة ، حيث أن منحني عدم الامتصاص أعلى من منحني الامتصاص . المنحنيات المتوسطة تظهر التغير الكلي من الامتصاص إلى عدم الامتصاص عند رطوبات مختلفة . [3]

وجد Darling و Belding [4] أن استعادة الرطوبة عند الرطوبة النسبية المعطاة تتغير مع الحرارة حيث وصلت عند الرطوبة النسبية 70% (18%) ضمن المجال الحراري من 29 درجة مئوية إلى 4 درجة مئوية ، و تنخفض بعد ذلك إلى 13% عند الدرجة 71 مئوية .



الشكل 4: التغير في الرطوبة المستعادة للصوف مع الرطوبة العادية

عندما يمتص الصوف الماء فإن الانتفاخ برمته يكون بالعرض (يتغير نصف القطر) مع تغير بسيط في الطول . الحجم الإجمالي يزداد أصلاً بمقدار أقل من حجم الماء الممتص . يظهر الجدول(1) قيم نصف قطر ليف الصوف وكذلك مقدار الانتفاخ عند مقادير مختلفة من الرطوبة .

الجدول 1 : تغير الكثافة و نصف قطر شعيرة الصوف عند قيم مختلفة للرطوبة

الرطوبة المستعادة %	0	2	5	7	10	15	20	25	30	33
الرطوبة النسبية %	0	2.5	15	27	42	68	85	94	98.5	100
الانتفاخ العرضي %	0	0.66	1.82	2.62	4.00	6.32	8.88	11.7	14.6	16.3
حجم الانتفاخ %	0	1.57	4.24	6.10	9.07	14.3	20.0	26.2	32.8	36.8
الكثافة(g/cm3)	1.304	1.310	1.314	1.315	1.315	1.313	1.304	1.291	1.277	1.268

يفسر هذا السلوك للألياف بافتراض أن بعض أو كل الماء يمتص بواسطة المحفظة ، بسبب وجود مجموعات محبة للماء. و هذا يؤدي إلى زيادة المساحة الجانبية بين الألياف ، التي لم تتغير أطوالها .

امتصاص الحرارة :

يبين الجدول (2) قيم للطاقة الحرارية اللازمة لترطيب الصوف (كمية الحرارة التي تنطلق عندما يبتل الصوف بشكل كامل) وذلك عند مقادير مختلفة من الرطوبة. انطلاقا من ذلك يتم حساب درجات الحرارة المختلفة للامتصاص، أي الحرارة المنطلقة عند امتصاص غرام واحد من الماء . الروابط الأولية للماء مع المجموعات المحبة للماء تؤدي لنشوء كمية كبيرة من الحرارة ، و يكون التأثير قليل عند الاقتراب من حد الإشباع. [14]

الجدول 2 : الطاقة الحرارية اللازمة لامتصاص الصوف الماء

الرطوبة المستعادة %	0	5	10	15	20	25	30	33
الرطوبة النسبية %	0	15	42	68	85	94	98.5	100
حرارة الترطيب(kj/kg)	101	64.5	38.1	20.5	10.0	4.19	1.13	0
حرارة الامتصاص (kj/kg)	854	624	431	276	159	100	41.9	33.5

5- الخواص الميكانيكية لألياف الصوف:

أجريت دراسة الخواص الميكانيكية لألياف الصوف بواسطة Max Feughelman [5] حيث يشترط البحث ألا تكون الشعيرة مجهدة أكثر من 30% لمدة أكثر من 1 ساعة . حيث تعود الشعيرة إلى الحالة الأصلية عند نقعها بالماء عند درجة حرارة 52 درجة مئوية لمدة 1 ساعة .

تم إجراء الاختبار على شعيرات مأخوذة من خراف مرباة منزلياً وذلك بهدف تثبيت العوامل المتغيرة و المؤثرة في الخواص على الشعيرة الواحدة أو بين الشعيرات.

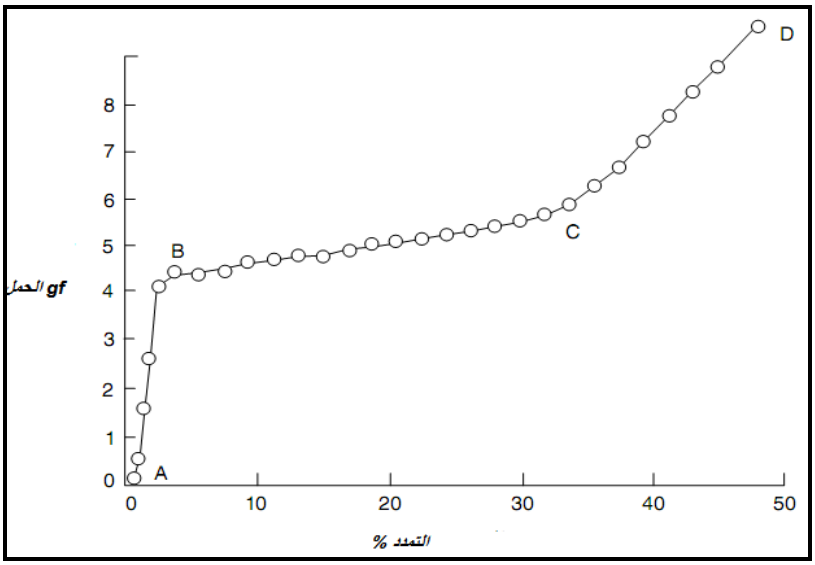
يظهر الشكل (5) منحني الحمل و الانفعال من أجل ليف صوف رطب . يمكننا تقسيم هذا المنحني إلى أربع مناطق و هي :

– المنطقة الأولى : حيث تحتاج هذه المنطقة لإجهاد منخفض لتمدد التجعدات بالقرب من A .

– المنطقة الثانية : تتميز بزاوية ميل مرتفعة و هي المنطقة المرنة ذات صلابة مرتفعة تنتهي عند B.

– المنطقة الثالثة: ينخفض ميول المنحني عند تجاوز النقطة B و تعتبر هذه المنطقة ذات خواص مرنة لدنة حتى الوصول للنقطة C .

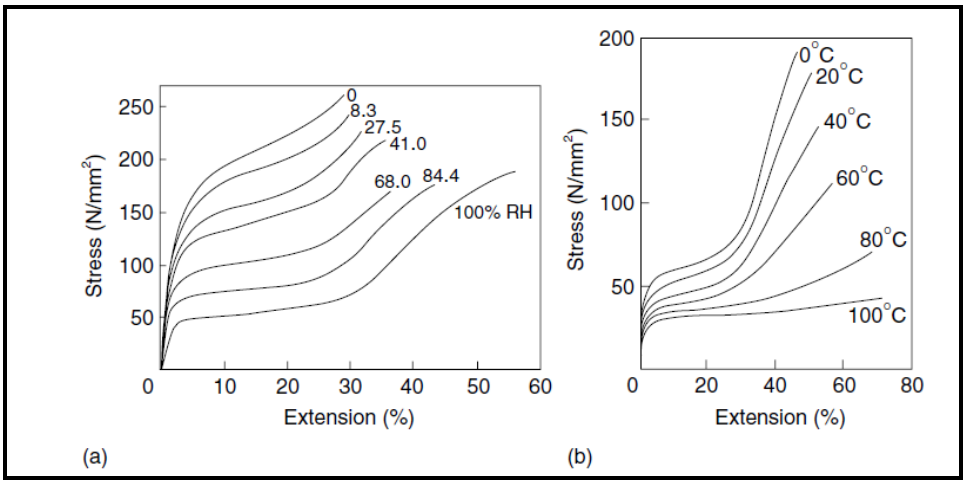
– المنطقة الرابعة: تزداد صلابة الليف من جديد حتى الانهيار عند D .



الشكل 5 : منحني الحمولة و الانفعال لألياف الصوف عند الدرجة 20 درجة مئوية .

في الاختبارات على مختلف الألياف ، هناك اختلافاً قليلاً في النقاط B و C عند الانفعال 2% و 30% على التوالي ، لكن انفعال الانهيار يتغير بشكل أكبر ويصبح هذا التغير أقل عند عدم وجود نقاط ضعف أو أذى في الليف المختبر. [10]

إن انفعال الانهيار ضمن المجال 50–60% هو انفعال نموذجي للشعيرات الجيدة . إن الاختلاف على كامل طول الشعيرة يغير شكل المنحني ، لأن الأجزاء الرفيعة تستطيل بسهولة أكبر من الأجزاء الثخينة بالنتيجة فإن أجزاء من الليف سوف تعاني من انفعال أكبر في المنطقة اللدنة ، بينما الأجزاء الأخرى تبقى في المنطقة المرنة (بداية التصلب) و تدخل اللدونة عند الحمولة الكبيرة.يظهر الشكل (6) أن منحني الإجهاد و الانفعال يتغير بتغير الرطوبة و الحرارة حيث ينخفض معامل المرونة مع زيادة الرطوبة. إن زيادة الحرارة تؤدي إلى انخفاض الإجهاد و يكون هذا التغير كبيراً ضمن المجال 40 و 80 ^{o}c [9] [8] .

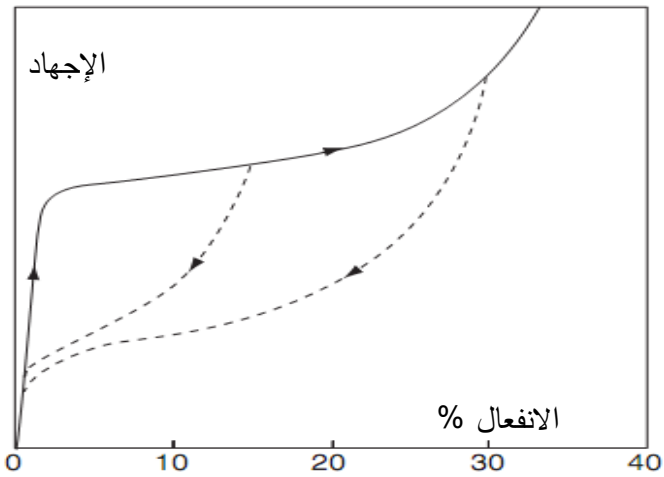


الشكل 6: تغير منحني الإجهاد – الانفعال مع تغير شروط الاختبار a) تاثير الرطوبة عند درجة حرارة الغرفة b) تأثير درجة الحرارة من أجل الصوف الرطب.

6- سلوك الاسترجاع :

شكل منحني الإجهاد – الانفعال للصوف في حالة الشد ليس نفسه للبوليميرات . لذلك فإن التغيرات عند B و C تكون حادة نوعاً ما . يكون سلوك الرجوعية مختلف بشكل كامل ، ففي أغلب البوليميرات ليس هناك رجوعية من الحالة اللدنة .

في الصوف الرطب ، كما نرى في الشكل (7) هناك رجوعية كلية من الانفعال حتى 30% . لكن الرجوعية تتبع منحني مختلف و تنضم لمنحني الانفعال عند 3/1 (ثلث) إجهاد الخضوع. [6] [7]

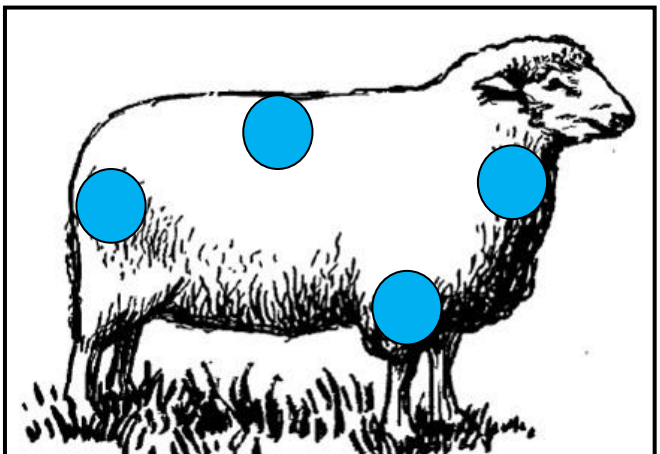


الشكل 7 : منحني الإجهاد–الانفعال للصوف الرطب في حالة التمدد و الرجوع .

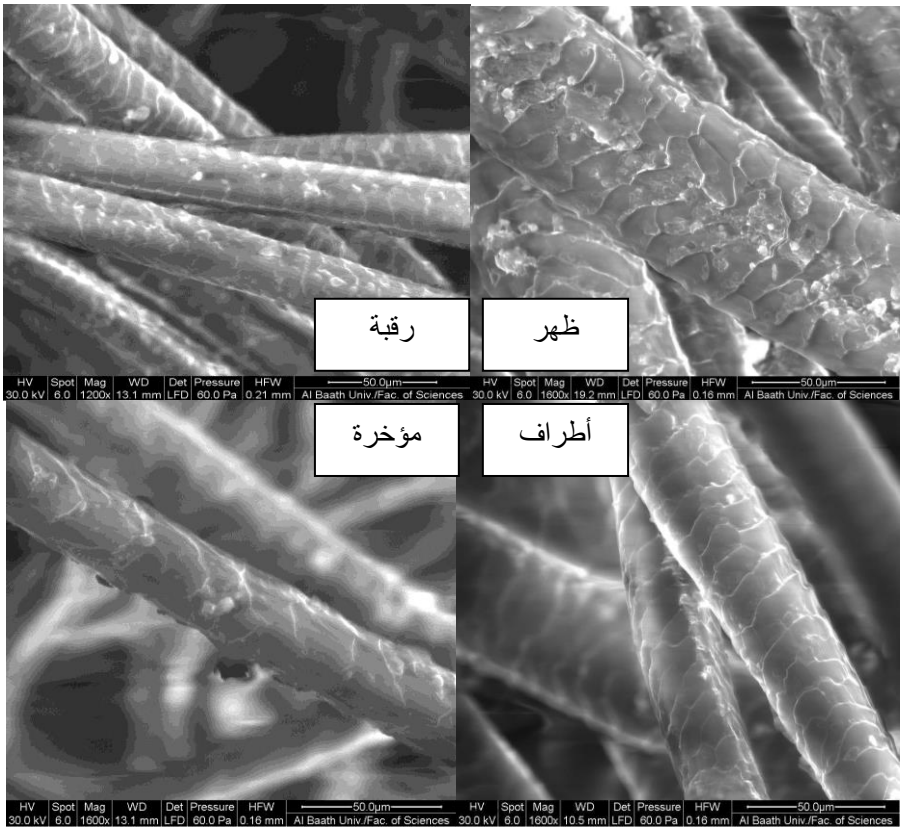
7–الجانب العملي:

تم أخذ عينات من مناطق مختلفة من جسم الحيوان (الرقبة، الظهر ، الأطراف، المؤخرة) الشكل (8). بالإضافة إلى أخذ عينات من نوعين مختلفين من الحيوانات الأول عمره 25 يوم و الثاني عمره أربع سنوات و الخراف من منطقة حمص ذات المناخ المتوسط الرطب حيث تم تصويرها بالمجهر الالكتروني في كلية العلوم و بالتالي تم الحصول على صور دقيقة ذات مقياس رسم معلوم و الذي سنستخدمه لاحقاً في الحسابات.

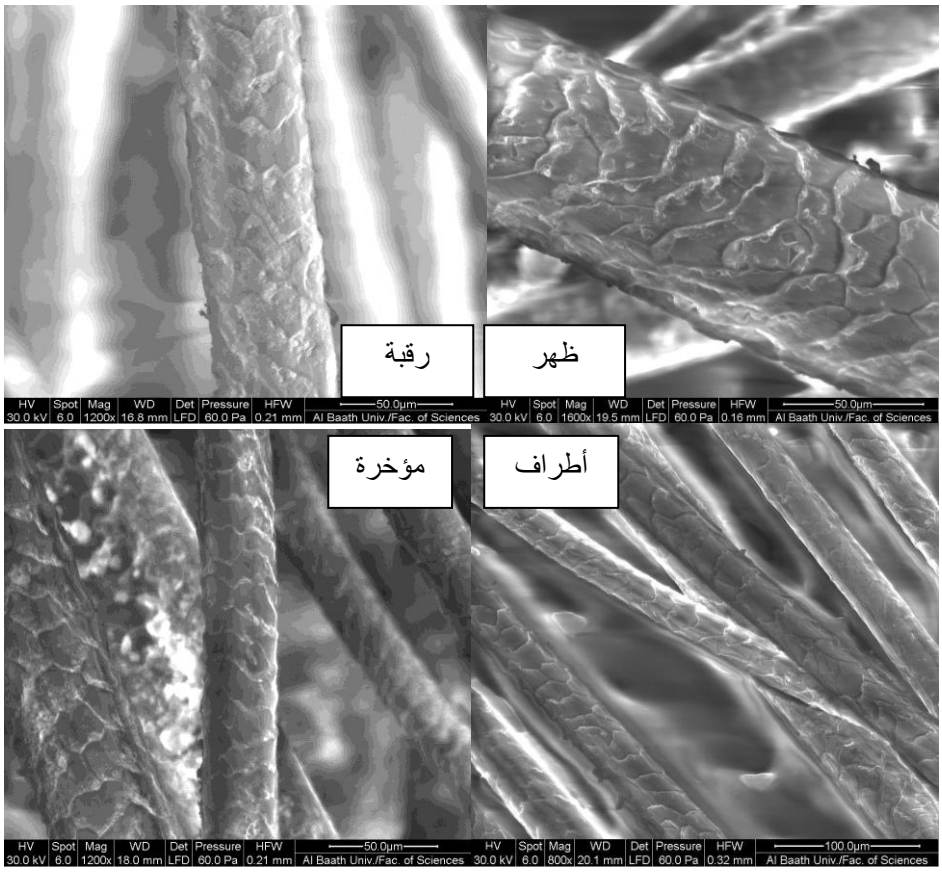
تمت الدراسة باستخدام برنامج معالجة الصور imag j لتحليل صور الألياف المقتطعة بشكل علمي و دقيق. حيث تم الاعتماد على هذا البرنامج في قياس الأقطار و كذلك عدد الحراشف في واحدة الطول. الشكل (11) الشكل (12)



الشكل 8: أماكن الاقتطاع في الخروف

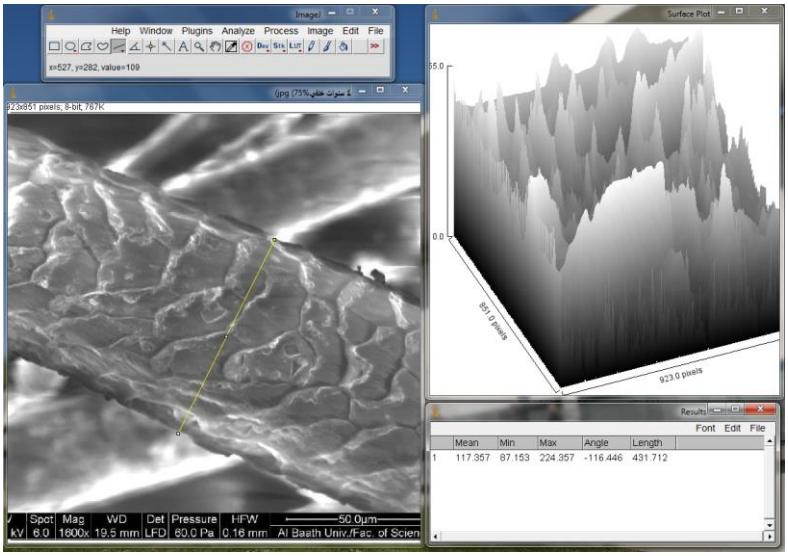


الشكل 9: الصور المجهرية لخروف عمره 25 يوم

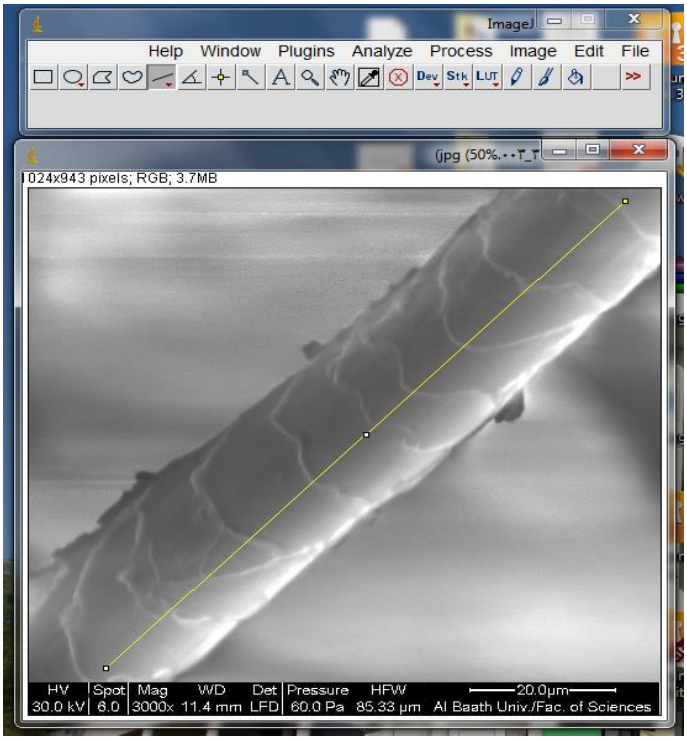


الشكل 10 : الصور المجهرية لخروف عمره أربع سنوات

يتأثر الشكل المورفولوجي لألياف الصوف بمكان أخذ العينة و كذلك عمر الخروف. و لهذا قمنا باقتطاع العينات من أماكن مختلفة و متباعدة من جسم الخروف و هي الرقبة ، الأطراف ،الظهر و المؤخرة. كما تم أخذ عمرين مختلفين و هما خروف فتي لا يتجاوز عمره 25 يوم و خروف هرم بعمر 4 سنوات.

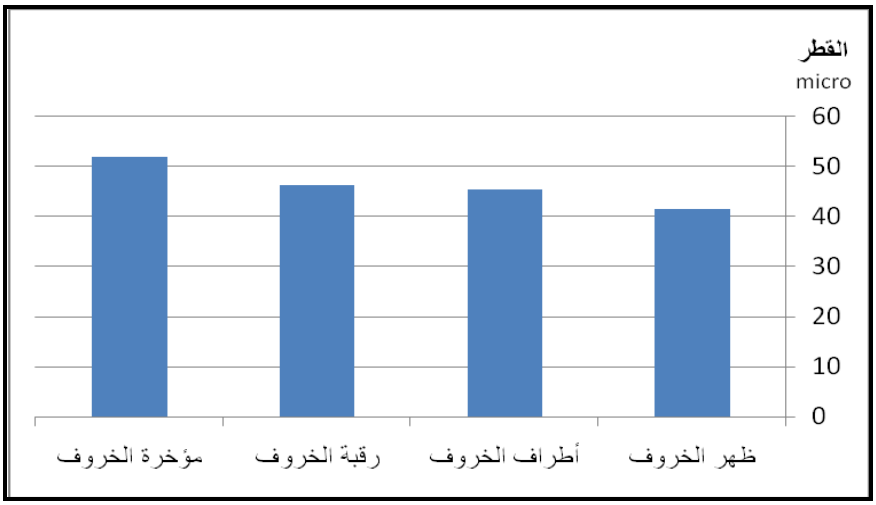


الشكل 11: طريقة قياس القطر على برنامج imag j

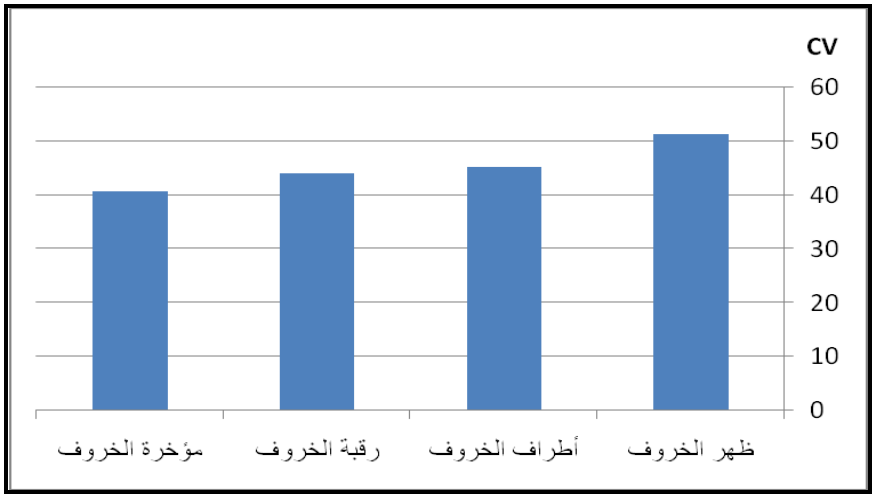


الشكل 12 : طريقة قياس عدد الحراشف في واحدة الطول على برنامج imag j

7-1 تأثير مكان اقتطاع العينة من جسم الخروف ذو الأربع سنوات على قطر شعيرة:



الشكل 13 : تأثير مكان الاقتطاع على قطر الليف



الشكل 14 : معامل الاختلاف حسب مكان الاقتطاع

يظهر الشكل (13) تأثير مكان اقتطاع العينات على قطر ليف الصوف. حيث تبين أن ألياف مؤخرة الخروف تمتلك قطراً أكبراً من باقي أجزاء الخروف.

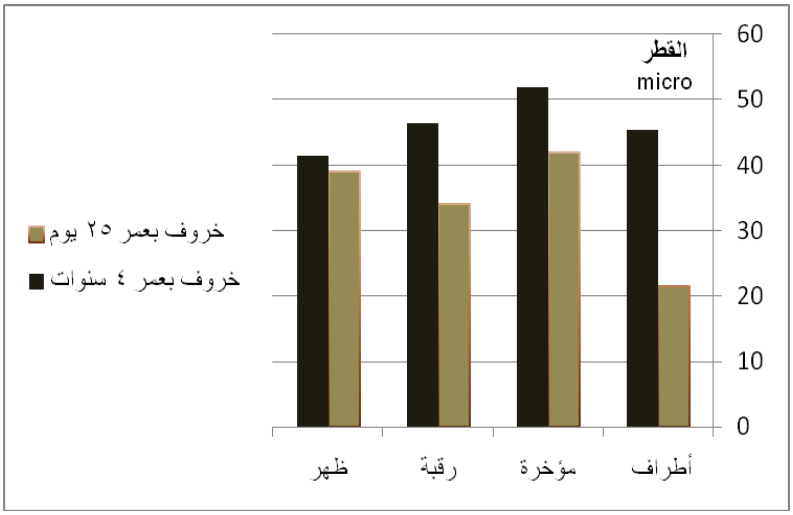
كما يظهر الشكل السابق أن شعيرات الظهر تمتاز بأنها الأنعم حيث يصل قطر الشعيرة إلى مرتبة 40 ميكرون و ذلك بالنسبة للخروف ذو الأربع سنوات.

إن معامل الاختلاف المبين في الشكل (14) يظهر عدم انتظامية قطر شعيرة الصوف في كافة أنحاء جسم الخروف حيث تراوح معامل الاختلاف بين 40 و 50 .

أنّ أقطار شعيرات المؤخرة متقاربة في قيمها مقارنة مع باقي الألياف المقتطعة من أماكن أخرى.

7-2 تأثير عمر الخروف على قطر الشعيرة:

يظهر الشكل (15) تأثير عمر الخروف على قطر الليف وذلك من أجل خراف بأعمار فتية و أخرى هرمة. يظهر الشكل الاختلاف في قطر الليف بين عمرين مختلفين من الخراف حيث يظهر لنا أن الخروف الصغير يمتاز بنعومة عالية مقارنة بالخروف ذو الأربع سنوات. كما يظهر الفارق جلياً في الأطراف حيث يبلغ مقدار التفاوت ما يقارب 25 ميكرون.



الشكل 15 : تأثير عمر الخروف على قطر الشعيرة

3-7 تأثير عمر الخروف على عدد الحراشف في واحدة الطول:

الشكل 16 : تأثير عمر الخروف ومكان الاقتطاع على عدد الحراشف

يظهر الشكل (16) عدد الحراشف في واحدة الطول على كامل طول الشعيرة حيث تبين الصور المجهرية أن شعيرة الخروف الصغير تمتلك عدد أكبر من الحراشف غير ناضجة في واحدة الطول.

و يظهر الفارق جلياً في ألياف الأطراف حيث يصل الفارق لثلاث حراشف في السنتيمتر. من خلال المخطط البياني السابق يمكننا القول بأن أكثر المناطق كثافة في عدد الحراشف في واحدة الطول هي الرقبة أياً كان عمر الخروف.

إن الصور المجهرية تظهر كثافة كبيرة في الحراشف غير الناضجة على كامل طول الشعيرة للخروف الصغير . لتبدأ هذه الحراشف بالنمو خارج جسم الشعيرة مع تقدم الخروف بالعمر. كما لا يحتوي السطح الخارجي للشعيرة على كثير من البقايا الدهنية مقارنة بليف الخروف ذو الأربع سنوات حيث يتميز السطح الخارجي للشعيرة بحراشف واضحة مكتملة النمو كما يحتوي السطح الخارجي على بقايا دهنية واضحة بكميات أكبر إضافة إلى وجود بعض الشوائب المكتسبة.

8- الخلاصة:

أجريت الدراسة على أغنام عواس و هي الأنواع الأكثر انتشارا في الجمهورية العربية السورية . وقد بين الدراسة أن تأثر الشكل المورفولوجي لشعيرة الصوف بمكان أخذ العينة و كذلك عمر الخروف. إن تركيب شعيرات الصوف أكثر تعقيداً من الألياف النسيجية الأخرى . وقد أظهرت الصور المجهرية السطوح الحرشفية لشعيرة الصوف. إن شعيرات مؤخرة الخروف تمتلك قطراً أكبر من باقي الشعيرات. كما تمت الدراسة على خراف بأعمار فتية و أخرى هرمة و تبين أن الخروف الصغير يمتاز بنعومة عالية مقارنة بالخروف ذو الأربع سنوات. كما يظهر الفارق جليا في الأطراف حيث يبلغ مقدار التفاوت ما يقارب 25 micron .

يتميز السطح الخارجي لليف الخروف الهرم بحراشف واضحة مكتملة النمو على عكس الخروف الفتي الذي يمتاز بعدد كبير من الحراشف الغير ناضجة في واحدة الطول .

يحتوي السطح الخارجي على بقايا دهنية واضحة بكميات أكبر إضافة إلى وجود بعض الشوائب المكتسبة.

المراجع (reference) :

1) Wool: Science and technology, J E McIntyre, Woodhead Publishing Ltd 2002

2) Morton W E and Hearle J W S, physical properties of textile fibers 3rd edition. The textile institute, Manchester, 1993.

3) Preston J M and Nimkar M V, 'Measuring the swelling of fibres in water', J.Text. Inst., 1949, 40, P674–88.

4) Darling R C and Belding H S, 'Textile yarns: moisture absorption at low temperatures', Industr. Eng. Chem., 1946, 328, 524–9.

5) Feughelman M, Mechanical Properties and Structure of Alpha-keratin Fibres, UNSW Press, Sydney, 1997.

6) Collins J D and Chaikin M ,The stress-strain behavior of dimensionally and structurally non-uniform wool fibers in water, text. Res. J 1965, 35, 777-87.

7) Collins J D and Chaikin M, structural and non-structural effects in the observed stress-strain curve for wet wool fibers, J. Text .Inst., 1968,59,379-400.

8) Katz S M and Tobolsky A V, Wool fibers: relaxation of stress, Text, Res, J. 1950, 20, 87-94.

9) Chapman B M , The bending stress- strain properties of single fibers and the effect of temperature and relative humidity, J . Text. Inst., 1973, 64, 312-27.

10) Carnaby G A and Grosberg P, the mechanics of the relaxation of wool carpet yarns, part 1: Theoretical analysis, J. Text. Inst,. 1977, 68, 24- 32.

11) Chapman B M, ‘A review of the mechanical properties of keratin fibres’, J.Text. Inst., 1969, 60, 181–207.

12) Hearle J W S,‘Capacity, dielectric constant and power factor of fibre assemblies’, Text. Res. J., 1954, 24, 307–21.

13) Feughelman M, ‘Two-phase structure for keratin fibres’, Text. Res. J., 1959, 29,223–8.

14) Darling R C and Belding H S, ‘Textile yarns: moisture absorption at low temperatures’,Industr. Eng. Chem., 1946, 328, 524–9.