



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل
كلية العلوم

دراسة تأثير الظروف البيئية في متراكبات البولي اثيلين عالي الكثافة المدعم بأسود الكربون

رسالة تقدم بها
نجاح كاظم عليان المسعودي
الى كلية العلوم في جامعة بابل
وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير علوم في الفيزياء

بإشراف

أ.م. د بلقيس محمد ضياء الدباغ
الجامعة التكنولوجية

أ.م. د فيصل علي البصام
جامعة بابل

تشرين الأول 2004 م

رمضان 1425 هـ

الخلاصة

إن الهدف من البحث هو دراسة تأثير الظروف البيئية (الأشعة فوق البنفسجية والرطوبة ودرجة الحرارة) في الخواص الميكانيكية والحرارية لنماذج من أنابيب البولي اثلين عالي الكثافة المدعم بأسود الكربون, المستخدمة في عمليات الري الزراعية والمصنعة في الشركة العامة للصناعات الميكانيكية/ قسم الري بالرش، حيث أن هذه النماذج من الأنابيب كانت حبيباتها من مناشئ (فرنسية، بلجيكية، دنمركية وإماراتية) لاختيار أفضلها ملائمة للظروف البيئية العراقية. ولأجل ذلك تم تحضير عدة عينات بأبعاد مختلفة وتم تقطيعها حسب المواصفات القياسية العالمية (ISO, ASTM) لإجراء الفحوصات الميكانيكية والحرارية عليها، وتم تعريضها لأشعة UV بطول موجي مقداره 320nm وشدة إشعاعية مقدارها 2.3 W/m^2 ولفترات (100) و(200) و(300) ساعة لدراسة تأثير الخواص الميكانيكية والحرارية بها، كما عرضت للرطوبة لمدد (4) و(8) و(12) أسبوعاً وفي درجة حرارة المختبر 23°C ودرس تأثيرها على الخواص المذكورة أعلاه، كما درست الخواص في درجات حرارة مختلفة 23°C و 40°C و 50°C ولمدة ساعة واحدة.

بينت نتائج البحث أن الخواص الميكانيكية والحرارية للنماذج والمتمثلة ب(الشد، معامل المرونة، متانة الانحناء، إجهاد القص، مقاومة الصدمة، الصلادة، الانضغاطية، الزحف ومعامل التوصيل الحراري) قد زادت قيمها بعد تعرضها لمدة (100) ساعة لأشعة UV عما هي عليه قبل التأثير، لكن لوحظ انحدار في قيمها بعد مرور (200) و(300) ساعة من التشعيع، كما لوحظ بان هنالك زيادة في قيم الخواص المذكورة أعلاه بعد تعرض النماذج للرطوبة لمدة (4) أسابيع عما هي عليه قبل التأثير، لكن حصل نقصان في تلك القيم بعد زيادة فترة الترطيب لمدة (8) و(12) أسبوعاً. أما تأثير درجة الحرارة في قيم الخواص المذكورة فإنها أدت إلى نقصانها بعد رفع درجة الحرارة من 23°C إلى 40°C ثم إلى 55°C عدا مقاومة الصدمة ومعامل التوصيل الحراري فهنالك زيادة في قيمها بزيادة درجة الحرارة.

لقد لوحظ إن تأثير الظروف البيئية في قيم الخواص الميكانيكية والحرارية كان متباينا اذ أن تأثير درجة الحرارة كان الأكثر تليها الرطوبة ثم أشعة UV ضمن الظروف المختبرية المستخدمة.

إن هذه النماذج من الأنابيب كان تحملها للظروف البيئية العراقية مختلفا فقد وجد ان النموذج البلجيكي هو الأفضل يليه النموذج الفرنسي ثم النموذج الدنمركي وأخيرا النموذج الإماراتي.

Abstract

The object of this work is to study the effect of the environmental conditions (ultra violet as well as humidity and temperature) on the mechanical and thermal properties of samples of tubes made of high density polyethylene inforced with carbon black which are employed in agriculture irrigation processes and which are manufactured at the general company for mechanical industries/department of spray irrigation. The origins of the raw materials from which these tubes are made are (French, Belgian, Denmark and Arab United Emirates), to choose the most convenient one suitable for the Iraq environments.

To achieve the objectives of this research, several samples of different dimensions were prepared and were cut in accordance with the international standard measurements (ISO, ASTM) to carry out mechanical and thermal tests. These samples were subjected to UV with wavelength (320)nm and radiation intensity of (2.3) W/m² for different periods (100,200,300) hours to study the response of mechanical and thermal properties. Samples are also subjected to humidity for different periods (4,8,12) weeks at (23)°C to observe its effects on the aforementioned properties. The under test properties were also studied at different temperatures (23,40,55)°C for a period of one hour.

Results obtained showed that the values of mechanical and thermal properties of the samples (tensile, modulus of elasticity, flexural strength, shear stress, impact strength, hardness, compression, creep and coefficient of thermal conductivity), increased after (100) hours to UV exposure as compared with untreated samples, but a decrease in these values was observed after treatment for (200,300) hours. Also an increase in the values was observed after subjection to humidity for (4) weeks, but a decrease in these values was recorded after increasing the humidation periods to (8,12) weeks. Increasing the temperature from (23)°C to (40)°C and finally to (55)°C caused a decrease in the values of the properties except impact strength and coefficient of thermal conductivity which showed an increase with increasing temperature.

It was observed that the effect of environmental conditions on mechanical and thermal properties was different. Temperature was the most effective factor followed by humidity and then UV, under the laboratories conditions used.

Also it was found that the Belgian sample was the best under Iraq environmental conditions followed by the French and Denmark and finally that of Arab United Emirates.

قائمة بالرموز والمصطلحات

| معنى الرمز | الرمز | معنى الرمز | الرمز |
|--|-------------------|------------------------------------|----------------|
| معامل المرونة (معامل يونك) | E | درجة البلمرة | n |
| متانة الانحناء | F.S. | بولي اثيلين عالي الكثافة | HDPE |
| اجهاد القص | τ | بولي اثيلين ذو كثافة عالية جداً | VHDPE |
| مقاومة الصدمة | I.S. | بولي اثيلين واطئ الكثافة | LDPE |
| صلادة برينل | H _{Br} | بولي اثيلين ذو كثافة واطئة جداً | VLDPE |
| قطر الاثر (الكره) | D | بولي كلوريد الفاينيل | PVC |
| مضغوطة المادة | ϵ_{com} | النظام القياسي الدولي الموحد | ISO |
| ثابت الزحف | k | الجمعية الاميركية لاختبارات المواد | ASTM |
| كمية الحرارة | Q | المجهر الالكتروني الماسح | SEM |
| عزم القصور الذاتي لمساحة المقطع | I | الاشعة فوق البنفسجية | UV |
| درجة الحرارة | T | درجة الانتقال الزجاجي | T _g |
| الزمن | t | القوة | F |
| نصف قطر القرص | r | المساحة | A |
| الطاقة الحرارية المارة عبر ملف التسخين لوحدة الزمن | IV | الاجهاد | σ |
| كمية الطاقة الحرارية المارة عبر وحدة المساحة لكل ثانية | e | الطول النهائي للعينة | L |
| معامل التوصيل الحراري | K | الطول الابتدائي للعينة | L _o |
| اقصى قوة مسلطة | F _{max.} | التغير في طول العينة | ΔL |
| متانة الشد القصوى | UTS | الاتفعال | ϵ |
| سمك العينة | d | عرض العينة | b |
| التعجيل الارضي | g | الكتلة | M |

قرار المشرفين على الرسالة

نشهد بان إعداد هذه الرسالة الموسومة (دراسة تأثير الظروف البيئية في
مترابكات البولي اثيلين عالي الكثافة المدعم باسود الكربون) جرى تحت اشرافنا في
قسم الفيزياء / كلية العلوم / جامعة بابل وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير علوم في
الفيزياء.

التوقيع
الاسم: د. بلقيس محمد ضياء
المرتبة العلمية: استاذ مساعد
التاريخ: / / 2004

التوقيع
الاسم: د. فيصل علي مصطفى
المرتبة العلمية: استاذ مساعد
التاريخ: / / 2004

توصية رئيس قسم الفيزياء

بناءً على التوصيات المتوافرة، ارشح هذه الرسالة للمناقشة

التوقيع
الاسم: د. طالب هادي قدوري
المرتبة العلمية: استاذ مساعد
التاريخ: / / 2004

المحتويات

| الصفحة | الموضوع | التسلسل |
|--------|---------|---------|
|--------|---------|---------|

| الفصل الأول (الجزء النظري) | | |
|------------------------------|--|-----------|
| 1 | مقدمة عامة | 1-1 |
| 2 | مفاهيم أساسية | 1-2 |
| 2 | علم البوليمر | 1-2-1 |
| 3 | عمليات البلمرة | 1-2-2 |
| 4 | درجة البلمرة | 1-2-3 |
| 4 | تصنيف البوليمرات | 1-3 |
| 4 | البوليمرات المعتمدة على التركيب البنائي | 1-3-1 |
| 6 | البوليمرات المعتمدة على تجانس البوليمر | 1-3-2 |
| 6 | مصادر البوليمرات | 1-4 |
| 7 | الأواصر الأولية والقوى الجزئية في البوليمرات | 1-5 |
| 7 | الأواصر الأولية (الكيميائية) | 1-5-1 |
| 8 | القوى الجزيئية | 1-5-2 |
| 9 | المواد المترابطة | 1-6 |
| 9 | المادة الأساس | 1-6-1 |
| 10 | مواد التقوية | 1-6-2 |
| 12 | التقوية بالألياف | 1-6-2-1 |
| 13 | التقوية بالمشتتات | 1-6-2-2 |
| 13 | التقوية بالقشور | 1-6-2-3 |
| 14 | التقوية بالدقائق | 1-6-2-4 |
| 15 | السطح البيني وقوة التلاصق | 1-6-3 |
| 17 | البولي اثيلين | 1-7 |
| 17 | تطور صناعة البولي اثيلين | 1-7-1 |
| 18 | تصنيف البولي اثيلين | 1-7-2 |
| 18 | البولي اثيلين عالي الكثافة | 1-7-2-1 |
| 20 | استخدامات البولي اثيلين عالي الكثافة | 1-7-2-1-1 |
| 21 | المضافات المستخدمة مع البولي اثيلين | 1-7-3 |
| 21 | المضادات للأكسدة | 1-7-3-1 |
| 21 | عوامل مانعة للالتصاق | 1-7-3-2 |
| 21 | عوامل انزلاقية | 1-7-3-3 |
| 21 | اسود الكربون | 1-7-3-4 |
| 22 | طرائق تصنيع المترابكات ذات الأساس البوليمري | 1-8 |
| 22 | القولبة بالكبس | 1-8-1 |
| 23 | القولبة بالقذف (الحقن) | 1-8-2 |
| 23 | القولبة بالنفخ | 1-8-3 |
| 23 | التصنيع بواسطة البثق | 1-8-4 |
| 25 | صناعة الأنابيب بواسطة البثق | 1-8-4-1 |
| 26 | الخواص الميكانيكية للمواد المترابطة البوليمرية | 1-9 |
| 27 | الإجهاد – الانفعال | 1-9-1 |
| 28 | العلاقة بين الإجهاد والانفعال | 1-9-1-1 |
| 29 | متانة الانحناء | 1-9-2 |

| | | |
|---|--|----------|
| 32 | مقاومة الصدمة | 1-9-3 |
| 33 | الصلادة | 1-9-4 |
| 34 | مقاومة الانضغاط | 1-9-5 |
| 35 | الزحف | 1-9-6 |
| 37 | الخواص الحرارية | 1-10 |
| 37 | الموصلية الحرارية | 1-10-1 |
| 39 | تأثير الظروف البيئية في الخواص الفيزيائية للبوليمرات | 1-11 |
| 40 | تأثير الأشعة فوق البنفسجية في خواص البوليمرات ومتراكباتها | 1-11-1 |
| 42 | طرائق تعرض المادة البوليمرية ومتراكباتها للأشعة فوق البنفسجية | 1-11-1-1 |
| 43 | تأثير الرطوبة في خواص البوليمرات ومتراكباتها | 1-11-2 |
| 45 | تأثير درجة الحرارة في خواص البوليمرات ومتراكباتها | 1-11-3 |
| 47 | الدراسات السابقة | 1-12 |
| 49 | هدف البحث | 1-13 |
| الفصل الثاني (الجزء العلمي) | | |
| 50 | المواد المستخدمة | 2-1 |
| 51 | تحضير العينات | 2-2 |
| 52 | عينات اختبار الشد | 2-2-1 |
| 53 | عينات اختباري الانحناء ومتانة الانحناء | 2-2-2 |
| 54 | عينات اختبار الصدمة | 2-2-3 |
| 55 | عينات اختبار الانضغاط | 2-2-4 |
| 56 | عينات اختبار الزحف | 2-2-5 |
| 57 | عينات اختبار الموصلية الحرارية | 2-2-6 |
| 58 | الأجهزة المستخدمة | 2-3 |
| 58 | جهاز اختبار الشد | 2-3-1 |
| 59 | جهاز اختبار الانحناء | 2-3-2 |
| 60 | جهاز اختباري متانة الانحناء والانضغاط | 2-3-3 |
| 61 | جهاز اختبار الصدمة | 2-3-4 |
| 62 | جهاز اختبار الصلادة | 2-3-5 |
| 63 | جهاز اختبار الزحف | 2-3-6 |
| 64 | جهاز اختبار الموصلية الحرارية | 2-3-7 |
| 65 | جهاز التجوية | 2-3-8 |
| 66 | الفرن الحراري | 2-3-9 |
| 67 | تقنية امتصاص الماء | 2-4 |
| الفصل الثالث (النتائج والمناقشة) | | |
| 68 | اختبار الشد | 3-1 |
| 71 | اختبار الانحناء | 3-2 |
| 79 | اختبار متانة الانحناء | 3-3 |
| 85 | اختبار الصدمة | 3-4 |
| 88 | اختبار الصلادة | 3-5 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 91 | اختبار الانضغاطية | 3-6 |
| 95 | اختبار الزحف | 3-7 |
| 106 | اختبار الموصلية الحرارية | 3-8 |
| | الفصل الرابع (الاستنتاجات والتوصيات) | |
| 110 | الاستنتاجات | 4-1 |
| 111 | التوصيات | 4-2 |
| 112 | المصادر | |
| 117 | الملحق - A | |

الفصل الأول

Chapter One

الجزء النظري

(Theoretical Part)

1-1 مقدمة عامة (General Introduction)

لقد ظهر من المعلومات التاريخية أن سكان وادي الرافدين اول من عرف المتراكبات البوليمرية واستخدمها ، اذ تم استخدامها في تسليح طبقات البناء بألياف القصب عند بناء الزقورات وذلك لتثبيت طبقات البناء الضخمة [1] .

اما البابليون فقد استخدموا القصب والبردي مع مادة القير في بناء الزوارق و التي ما زالت تستخدم في الوقت الحاضر في مناطق الاهوار و التي تعد الجيل الاول للزوارق ، اما المصريون القدماء فقد اضافوا القش الى الطين في تصنيع الطابوق لمنع من التشقق في اثناء عملية التجفيف [2] .

تعرف المادة المتراكبة على انها خلق مادة جديدة من مادتين أو اكثر من خلال اضافات معينة لتدعيم المادة الاساس لتكوين خصائص و مواصفات جيدة [3] ، بذلك يظهر لنا أن مصطلح المواد المتراكبة قديم العهد ، الا ان التقنيات الحديثة و المواد المتراكبة المتنوعة لم تتحقق الا بحلول القرن العشرين وبصورة خاصة بعد اكتشاف البوليمرات [4] ، حيث ظهر مصطلح المتراكبات المتقدمة (Advanced Composites) في تحضير مواد متراكبة معينة تمتلك خواص متميزة تفوق تلك المتراكبات الاولية نورد منها ما يلي [5] [6] [7] :

- 1- القوة و المتانة
- 2- مقاومة للمواد الكيميائية و الرطوبة
- 3- انخفاض الكثافة
- 4- مقاومة لدرجات الحرارة
- 5- خواص عزل كهربائي و حراري جيد
- 6- إمكانية التشكيل بأشكال و أحجام مختلفة بسهولة
- 7- صلادة سطحية عالية
- 8- كلفة قليلة نسبياً .

تمتاز المعادن و كل السبائك بانها قوية و متينة الا انها ذات كثافة عالية بينما تعد البوليمرات مواد منخفضة الكثافة الا انها تفتقر الى القوة و المتانة [7] [8]، لذلك كان ابتكار المواد البوليمرية المتراكبة بمثابة الخطوات الاولى من اجل بلوغ الخواص المثالية المرغوب فيها في الصناعات [9] .

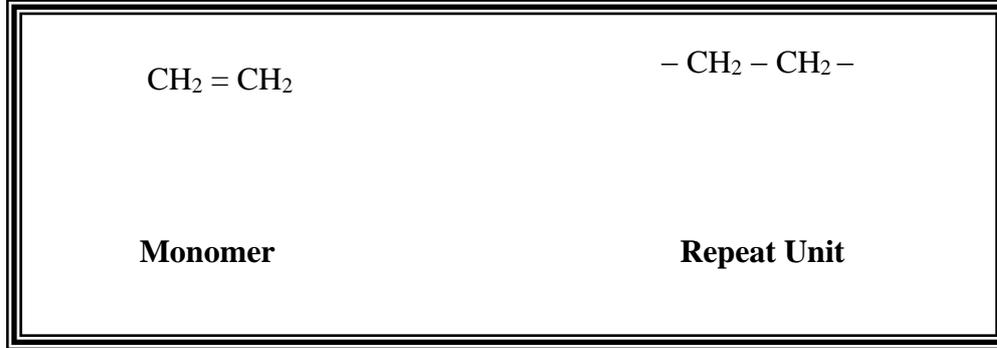
ان دراسة تأثير الظروف البيئية من (إشعاع و رطوبة و درجة حرارة) في الخواص الميكانيكية و الحرارية للمواد المتراكبة ذات الاساس البوليمري تعد من الدراسات المهمة جدا وذلك لأن اغلب تطبيقات هذه المواد تكون في البيئة الخارجية كأجزاء المباني و الطائرات و القوارب و حاويات المياه و انابيب الري، و بذلك تعد من اكثر المواد عرضة للظروف البيئية المختلفة، لذا فان دراسة تأثير هذه الظروف أصبح ضروريا لقياس مدى تحملها لمثل هذه الظروف و التي تمثل عوامل التحلل للمادة [9] [10] [11] .

يتضمن هذا الفصل أهم المفاهيم الخاصة بعلم البوليمر و اساسيات التدعيم و الخواص الميكانيكية و الحرارية للمواد المتراكبة .

1-2 مفاهيم اساسية

1-2-1 علم البوليمر (Polymer Science)

يعرف علم البوليمر بأنه علم الجزيئات الكبيره (Macromolecules) و التي تبني بتكرار وحدات كيميائية صغيرة تدعى المونمرات (Monomers) حيث كل وحدة من هذه الوحدات تمثل الوحدة الاساسية لبناء البوليمر و التي تكون مرتبطة مع بعضها باواصر كيميائية ، مثلا الوحدة البنائية لبولي اثلين هي $-CH_2-CH_2-$ اما المونمر فهو الاثلين $CH_2=CH_2$ [4] :



إن كلمة بوليمر هي من اصل يوناني فكلمة (Poly) تعني متعدد و كلمة (Mer) تعني الجزء او الوحدة لذا فان كلمة (Polymers) تعني متعدد الاجزاء او الوحدات [12] .

1-2-2 عمليات البلمرة (Polymerization Process)

ان عملية البلمرة هي عملية تحويل الجزيئات الصغيرة ذات الوزن الجزيئي الواطي (المونمرات) الى مواد ذات اوزان جزيئية عالية من دون حدوث اي تغيير في التركيب الاساسي للجزيئات [13] ، لقد قام العالمان فلوري (Flory , 1953) و كارثيرس (Carthers , 1940) بتقسيم عمليات البلمرة الى مجموعتين هما :

1- بلمرة الإضافة (Addition Polymerization)

وتسمى كذلك تفاعلات النمو المتسلسل (Chain – Growth Polymerization) فيكون حامل السلسلة عبارة عن ايون او مادة تحمل الكتروناً غير مزدوج يدعى بالجذر الحر (Free Radical) و يتكون الجذر الحر من تحلل جزيئية مادة ما تكون غير مستقرة تسمى بالبادئ (Initiator) و يستطيع الجذر الحر ان يتفاعل عن طريق فتح الاصرة المزدوجة لتكوين جزيئية اخرى تبقى محتوية على الكترون غير مزدوج وفي وقت قصير جدا تضاف جزيئات المونيمرات الى السلسلة الثانية و في النهاية يتكوّن جذران من الجذور الحرة حيث يفني احدهما الآخر و يصحب ذلك تكوين جزيئية او اكثر من المادة البوليمرية [4] .

في هذه العملية يتكوّن البوليمر من المراحل الاولى للبلمرة ومن امثلة بوليمرات الاضافة البولي اثلين [12] ، و المثال الاتي يوضح هذه الالية في بلمرة الاثلين لتكوين البولي اثلين :



2- بلمرة التكثيف (Condensation Polymerization)

وتسمى ايضا تفاعلات النمو الخطوي (Step Growth) وهي تحدث في المركبات واطئة الوزن الجزيئي ويكون التفاعل بين جزيئين تحتوي على مجاميع وظيفية متعددة و تنتج جزيئية اكبر ايضاً تحتوي على مجاميع وظيفية متعددة و من الممكن ان يرافق هذه العملية نبذ جزيئية ماء و تستمر هذه العملية الى ان يستنفذ احد المتفاعلات كلياً [4] ، [12] . وفي هذه

العملية يتكون البوليمر في المراحل الاخيرة للبلمرة اي عكس تفاعلات الاضافة و من امثلة بوليمرات التكتيف هي البولي استرات و البولي يوريثانات [14] .

3-2-1 درجة البلمرة (Degree of Polymerization)

يمكن تحديد طول السلسلة البوليمرية بعدد الوحدات المتكررة في السلسلة الكبيرة و هذا يدعى بدرجة البلمرة (n) ومنها يمكن حساب الوزن الجزيئي للبوليمر حيث ان :
الوزن الجزيئي للبوليمر = درجة البلمرة (n) x الوزن الجزيئي للوحدة المتكررة.
وتعرف البوليمرات ذات درجة البلمرة الكبيرة (n) تقرب من عشرة الاف او اكثر في بعض الحالات بالبوليمرات ذات الوزن الجزيئي العالي (High Molecular Weight Polymers) أي التي تتراوح اوزانها الجزيئية بين (10^4 gm/mole – 10^6 gm/mole) اما البوليمرات ذات درجة البلمرة الصغيرة ($n \approx 1-50$) فتعرف بالبوليمرات ذات الوزن الجزيئي الواطئ (Oligomers) [13] .

3-1 تصنيف البوليمرات

1-3-1 البوليمرات المعتمدة على التركيب البنائي

(Polymers Dependent on Structure)

تصنف البوليمرات اعتماداً على التركيب البنائي الى [12] [13] :

1-البوليمرات الخطية (Linear Polymers)

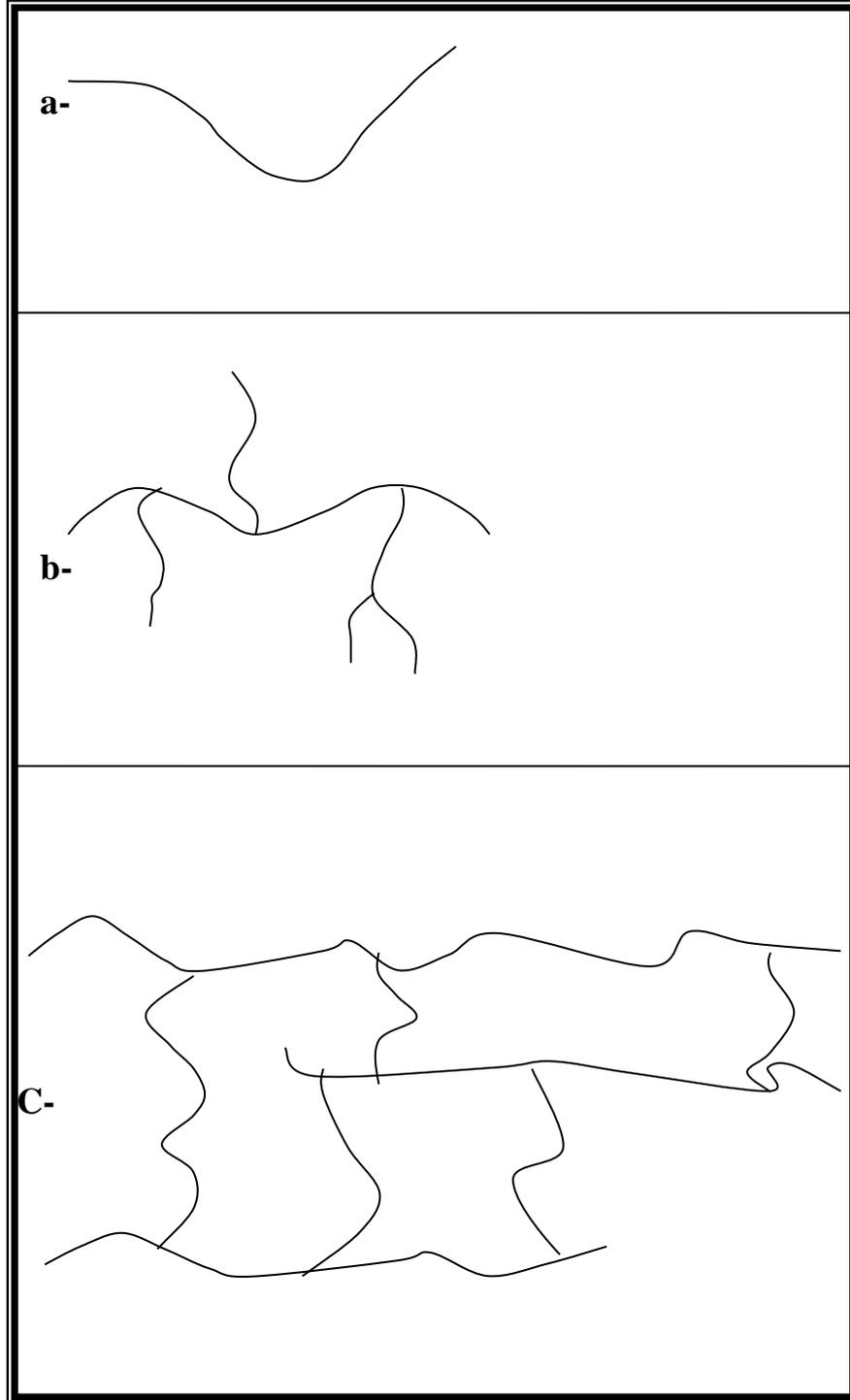
وفيهما تكون جزيئات البوليمر في بعد واحد وتكون على هيئة سلسلة مستمرة كما في الشكل (1-1-a) ومثال ذلك البولي اثلين عالي الكثافة.

2-البوليمرات المتفرعة (Branched Polymers)

وفيهما تكون البوليمرات على شكل سلسلة طويلة و متفرعة كما في الشكل (1-1-b) ومثال ذلك البولي اثلين واطئ الكثافة.

3- البوليمرات المتشابكة (Cross Linked Polymers)

وفيهما تكون البوليمرات على شكل سلاسل طويلة ذوات ثلاثة ابعاد يتصل بعضها مع بعضها الاخر بشبكة معقدة من الاواصر الكيميائية كما في الشكل (1-1-c) ومثال ذلك المطاط.



الشكل (1-1) يمثل أشكال السلاسل البوليمرية [4]

a- بوليمر خطي

b- بوليمر متفرع

c- بوليمر متشابك

1-3-2 البوليمرات المعتمدة على تجانس البوليمر

(Polymer Dependent on Homogeneity of Polymer)

تصنف البوليمرات اعتماداً على تجانس الوحدات المتكررة الى [12] [14]:-

1- البوليمرات المتجانسة (Homopolymers)

وفيهما تكون الوحدات البنائية للبوليمر من نوع واحد كما في بولي ثيرفتالات الاثلين .

2- البوليمرات المشتركة (Copolymers)

وفيهما تكون الوحدات البنائية للبوليمر اكثر من نوع كما في بوليمر (ستايرين - بيوتادايين) .

3- البوليمرات المركبة (Composite Polymers)

هي اضافة بعض المواد الى البوليمرات المتجانسة بغية تغيير في بعض خصائصها وادخال صفات جديدة عليها مثل البولي اثلين مضافاً اليه اسود الكربون (Carbon Black) موضوع البحث.

4-1 مصادر البوليمرات (Polymers Sources)

للبوليمرات مصدران رئيسيان هما [12] [15]:

1- البوليمرات الطبيعية (Natural Polymers)

وهي مركبات مصدرها اما نباتي او حيواني كالخشب و القطن و المطاط الطبيعي و الصوف و الجلد و الحرير الطبيعي و من المواد الغذائية التي تعد بوليمرات طبيعية هي النشا و البروتين و السليلوز [12] .

2- البوليمرات الصناعية (Synthetic Polymers)

وهي البوليمرات التي يتم تحضيرها من مركبات كيميائية بسيطة و تمثل معظم البوليمرات المهمة صناعياً ومنها البلاستيكات ، الجلود الصناعية ، اقمشة النايلون وبعض الاصباغ و غيرها [12] [16] .

5-1 الاواصر الاولية و القوى الجزيئية في البوليمرات

(Primary Bonds and Molecular Forces)

1-5-1 الاواصر الاولية (الكيميائية) (Primary Bonds)

هي الاواصر المسؤولة عن ربط ذرات سلاسل البوليمرات و من اهمها [4] [16]:-

1- الاصرة الايونية (Ionic Bond)

ان التوزيع الالكتروني للذرة الاكثر استقراراً هو الذي يحتوي على ثمانية الكترونات في مدارها الخارجي و التي تسمى (Octet) ويمكن الحصول على هذا التركيب بواسطة منح الالكترونات من ذرة الى اخرى كما في المعادلة التالية :-

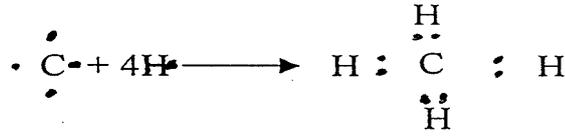


2- الاصرة الفلزية (Metallic Bond)

هي الاصرة التي تتكون من ايونات تحمل شحنات موجبة مغمورة في سحابة من الالكترونات ذوات الشحنة السالبة و التي تكون حرة الحركة .

3- الاصرة التساهمية (Covalent Bond)

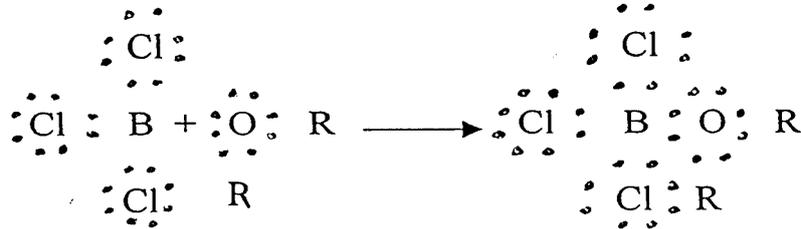
تتكون هذه الاصرة عندما يتشارك زوج او اكثر من الكترونات التكافؤ بين ذرتين حيث تكون اغلفتها الالكترونية مستقرة مثل جزيئة الميثان .



أن هذه الأواصر هي السائدة في البوليمرات .

4- الاصرة التناسقية (Coordinate Bond)

وهي مشابهة للأصرة التساهمية في تكوين مدار الكتروني مستقر ما عدا ان الالكترونين المتشاركين هما من نفس الذرة ومثال ذلك ثالث كلوريد البورون .



حيث R وحدة بوليمر .

وتوجد هذه الاواصر في البوليمرات اللاعضوية .

2-5-1 القوى الجزيئية (Molecular Forces)

هي القوى المسؤولة عن ربط سلاسل البوليمر بعضها مع بعض او بين اجزاء السلسلة الواحدة ولهذه القوى تأثير بليغ على معظم خواص البوليمرات الفيزيائية و الميكانيكية

وتسمى هذه القوى بقوى الاواصر الثانوية (Secondary Bond Forces) وتدعى كذلك بقوى فاندرفال (Van der Waals Forces) ومن هذه القوى [4] [12] [15] [16]:-

1- قوى الاستقطاب (Dipole Forces)

تتجم هذه القوى عن وجود جزيئات مستقطبة او مجاميع مستقطبة في سلسلة البوليمر و يكون لهذه الجزيئات عزم قطبي (Dipole Moment) وهذا يؤدي الى حدوث تجاذب بين الاقطاب المختلفة و ان هذا النوع من القوى يعتمد على درجة الحرارة .

2- قوى الحث (Induction Forces)

يعود سبب هذه القوى الى وجود مجاميع مستقطبة في سلسلة البوليمر حيث تؤثر على ما يحيط بها من مجاميع غير مستقطبة فتؤدي الى حدوث استقطاب جزئي في هذه المجاميع ، ان هذه القوى لا تعتمد على درجة الحرارة .

3- قوى الانتشار (Diffusion Forces)

يرجع مصدر هذا النوع من القوى الى تغير العزم القطبي للجزيئات او المجاميع مع الزمن الا ان محصلة العزم القطبي تكون مساوية للصفر و يرجع سبب هذا التغير في العزم القطبي الى الوضعيات الالكترونية المختلفة التي تتخذها الالكترونات حول نواة كل ذرة مما يؤدي الى اضطراب في المجاميع الالكترونية للذرات المتجاورة وهذه تؤدي الى توليد قوى

جذب تدعى بقوى الانتشار ، ان هذا النوع من القوى موجود في معظم الجزيئات الا ان هذه القوى تختفي في حالة وجود مجاميع او جزيئات مستقطبة قوية و ان هذه القوى لا تعتمد على درجة الحرارة .

4- الأواصر الهيدروجينية (Hydrogen Bond)

وتوجد هذه الاواصر بين الذرات المرتبطة بذرة هيدروجين وذرة حاوية على مزدوج الكتروني و يكون الارتباط من خلال ذرات الهيدروجين وتنشأ هذه الاواصر بين مجموعتين فعاليتين في نفس الجزيئة او تنشأ بين مجموعتين فعاليتين موجودتين على جزئيتين مختلفتين و من اهم المجاميع القادرة على تكوين الاواصر الهيدروجينية هي مجاميع الكربوكسيل $-COOH$ و مجاميع الاميدات $-CONH_2$ و الامينات $-NH_2$ و الهيدروكسيل $-OH$ وغيرها .

1-6 المواد المترابطة (Composites Materials)

هي عبارة عن جمع او ربط مادتين او اكثر لتكوين مادة جديدة تمتاز بصفات جديدة تختلف عن صفات المواد المكونة لها لتكون اكثر ملائمة للتطبيقات الصناعية ، ان صفات المواد المترابطة تعتمد على ثلاثة عناصر رئيسية هي [7] [17] :-

- 1- المادة الأساس (Matrix Material)
- 2- مادة التقوية (Reinforcement Material)
- 3- السطح البيني و قوة التلاصق (Interface and Bonding)

1-6-1 المادة الأساس (Matrix Material)

هي إحدى المكونات المهمة للمادة المترابطة اذ تعد المادة الرابطة لهذه المكونات وتعرف أيضا بالمادة الوسط [18] والتي قد تكون مادة معدنية او سيراميكية او بوليمرية [19] وتكون هي ناقلة للأجهادات التي تتعرض لها المادة المترابطة الى مادة التقوية .
ان مقاومة المادة المترابطة لدرجات الحرارة (Temperature) والتفاعل الكيماوي (Chemical Reaction) وتأثيرات الرطوبة (Influence of Moisture) تعتمد على المادة الأساس [7]، وتتصف المادة الأساس بكونها مادة ذات معامل مرونة قليله وذات صلادة ومقاومة منخفضة مقارنة مع مادة التقوية لذا عند مزج المادة الأساس مع مادة التقوية يمكننا الحصول على مادة مترابطة جديدة ذات مقاومة و صلادة عاليتين، والمهم لدينا في هذا البحث هو جانب المادة اللدائنية اي المادة البوليمرية كمادة اساس وعادة تعرف بالراتنجات (Resins) و تكون على نوعين [20] :-

1- راتنجات اللدائن المطاوعة للحرارة (Thermoplastic Resins)

وهي نوع من انواع المواد اللدائنية و تتكون من سلاسل طويلة جداً و تكون جزيئاتها مترابطة بعضها مع بعض بشكل خطي او متفرع بقوى فاندرفالز (Van der Waals Forces) الضعيفة نسبياً، فعند تسخين هذه المواد فان القوى بين الجزيئات (Inter molecular Forces) تضعف مما يؤدي الى تليينها (Softening) وجعلها مرنة (Flexible) [12] بعدها تتحول الى منصهرات لزجة (Viscous Melts) في درجات الحرارة العالية ، لأن السلاسل البوليمرية في المنصهر تصبح حرة الحركة حيث تعتمد هذه السلاسل اعتماداً كلياً على درجة الحرارة و لهذا السبب يكون المنصهر بهيأة سائل لزج قابل للحركة او التنقل و عند خفض درجة الحرارة تسترجع هذه المواد حالتها الصلبة القوية حيث تنقيد الحركة الانتقالية للسلاسل البوليمرية و تصبح مقتصرة على الحركة الموضعية للسلاسل (Local Motion) [21] و من الامثلة على هذا الصنف من البوليمرات هو

البولي اثلين (Polyethylen) ، البولي ستايرين (Polystyrene) و النايلون (Nylon) [22].

2- راتنج اللدائن المتصلدة حرارياً (Thermosetting Resins)

تترتب (تتشابك) الذرات في الجزيئات بشكل ثلاثي الابعاد مع اتصال عرضي متواتر او متكرر الحدوث (Frequent) بين السلاسل ، اما الاواصر التي تربط جزيئات البوليمر فهي اواصر تساهمية قوية ، ولهذا فان هذه السلاسل تكون غير قابلة للانزلاق الواحدة فوق الاخرى حتى بارتفاع درجة الحرارة فان هذه المواد تكون اقوى وامتن من المواد البوليمرية المطاوعة للحرارة [23] ، لكن مع الارتفاع الكثير لدرجة الحرارة فانها تعاني من تغيرات كيميائية حيث تتشابك السلاسل البوليمرية و تصبح صلدة غير ذائبة وغير قابلة للانصهار وريئة التوصيل للحرارة [7] [12] وإذا ما وصل التسخين الى درجة حرارية كافية لتكسير الاواصر فيحصل التحلل (Degradation) .

ومن الامثلة على هذا النوع من البوليمرات هو راتنج الايبوكسي (Epoxy) وراتنج البوليستر (Polyster) وراتنج الامينو (Amino) وغيرها [24].

2-6-1 مواد التقوية (Reinforcement Materials)

وهي المواد التي تعمل على تقوية مادة الاساس و بالتالي تقوية المادة المترابكة وتتصف مواد التقوية بمواصفات حيث تكون اكثر قوة و صلابة من المادة الاساس ويمكن أن تحسن العزل الحراري ومقاومة التآكل الكيماوي وتقليل او زيادة التوصيل الكهربائي [25] ، ان مواد التقوية تكون مختلفة المصادر فبعضها يأتي من المواد المعدنية الطبيعية او المواد العضوية او العضوية التركيبية وفيما يلي نظره عامة على هذه المواد [26] :-

1- مواد مائنة معدنية طبيعية

يدخل في هذا الصنف كبريتات الكلس والكرافيت وسليكات الالمنيوم ومسحوق المعادن (نحاس ، برونز ، ألمنيوم) وغيرها.

2- مواد مائنة عضوية طبيعية

كدقيق الخشب و فول الصويا و غلاف جوز الهند و الياف من السليلوز (كالقطن والجوز) وغيرها .

3- مواد مائنة عضوية تركيبية

يدخل في هذا الصنف الالياف التركيبية (كالنايلون و بولي استر) وكذلك بقايا مواد الراتنجات نفسها [27].

ان صفات المواد المترابكة البوليمرية تحددها صفات المواد المضافة (مواد التقوية) الى البوليمر وطبيعة دقاتها و طبيعة التداخل بين البوليمر والمضاف و كذلك النسبة المئوية الوزنية للمواد المضافة والتي تؤدي دوراً كبيراً في الخواص الميكانيكية للمادة المترابكة البوليمرية كما موضح في الجدول (1-1) [12].

الجدول (1-1) يبين بعض الخواص الميكانيكية للبولي اثلين عالي الكثافة بعد اضافة ألياف الزجاج و بنسب وزنية مختلفة [12].

| النسبة المئوية الوزنية للألياف الزجاجية (%) | | | | خواص البولي اثلين عالي الكثافة |
|---|------|------|------|--------------------------------|
| 30 | 20 | 10 | 0 | |
| 69.8 | 60.9 | 41.8 | 25.5 | قوة الشد Tensile Strength |

| | | | | |
|------|------|------|------|--|
| | | | | (نيوتن /م ²) × 10 ⁶ |
| 84.7 | 67.2 | 44.2 | 20.7 | قوة اللوي Flexural Strength (نيوتن /م ²) × 10 ⁶ |
| 54.9 | 40.3 | 24.3 | 8.6 | معامل اللوي Flexural Modulus (نيوتن /م ²) × 10 ⁶ |
| 130 | 129 | 116 | 71 | درجة حرارة التشوه Deformation Temperature تحت قوة 4.6×10 ⁵ (نيوتن / م ²) |
| 1.7 | 2.8 | 4.0 | 18.1 | قوة التصادم Impact Strength (مقيسة بواسطة الكرات الساقطة) (نيوتن م.) |

أن مواد التقوية تكون على عدة انواع منها :-

1-6-2-1 التقوية بالألياف (Fibers Reinforcement)

وهي إحدى مواد التقوية التي تعرف بأنها تراكيب خيطية تمتاز بخواص ميكانيكية عالية وتستخدم لتقوية المادة الأساس حيث إنها تعمل على زيادة مقاومة الصدمة والشد وتحسن من الخواص الميكانيكية بشكل عام لأن الألياف تحمل تقريباً كل الاجهاد المسلط على المادة المترابطة مما يجعل الألياف أقوى انواع التقوية الأخرى .

ان الألياف بصورة عامة تكون دائرية المقطع بالرغم من انها في بعض الاحيان تملك اشكالا اخرى ذات مقطع مربع او مستطيل او سداسي [28] ، هنالك عدد من العوامل المؤثرة في المواد المترابطة المقواة بالألياف منها :-

1- طول الليف الفاعل (Effective Fiber Length)

اذ يجب استعمال طول ليف مناسب ويكون مستمراً أو مقطعاً بأطوال (3-50mm) لكي لا يحصل الكسر عند نهايتي الليف ويدعى هذا الطول بالطول الحرج للليف [5] [29].

2- قطر الليف (Fiber Diameter)

إذ كلما قل قطر الليف اصبح احتمال وجود عيوب اقل وبالتالي يحدث تحسن كبير في الخواص الميكانيكية وتتراوح اقطار الألياف المستخدمة للتقوية بين (7 - 100 μm) .

3- توجيه الليف (Fiber Orientation)

إذ كلما قلت زاوية التوجيه زادت الخواص الميكانيكية للمادة المترابطة .

4- ترتيب الليف (Fiber Arrangement)

إذ يمكن أن يكون الليف مرتباً باتجاه واحد او باتجاهين او بعدة اتجاهات وبشكل عشوائي او منتظم [5] ، اذ تمتلك المواد المترابطة بالألياف خواص اتجاهية لذا فان اتجاه تأثير الاجهاد نسبة الى اتجاه ترتيب الليف عامل مهم ومؤثر في الخواص الميكانيكية [5] [23] .

5- الكسر الحجمي (Volume Fracture)

إذ عند زيادة الكسر الحجمي للألياف تزداد مقاومة الشد للمادة المترابطة وقد لوحظ بان خواص المترابكات تبدأ بالانخفاض عندما يتجاوز الكسر الحجمي للألياف المقدار (0.6) بسبب أن هنالك ضعفاً في الترابط بين الألياف والمادة الأساس من جهة والليف مع الليف الآخر من جهة ثانية و تكثر الفجوات عند النسب العالية وعند الكسر الحجمي المنخفض للألياف تسلك المادة المترابطة سلوك المادة الأساس [30] .

وهنالك انواع كثيرة من الألياف المستخدمة في تدعيم (تقوية) مادة الأساس منها [31] [32]:-

- 1- الألياف الفلزية : كاسلاك النحاس و اسلاك التكنستن .
- 2- الألياف السيراميكية : كالألياف الزجاج و كاربيد السليكون او الكربون
- 3- الألياف البوليمرية : كالألياف الكفلر

2-2-6-1 التقوية بالمشتمات (Dispersion Reinforcement)

ينتج هذا النوع من المواد المترابكة عن طريق تشتيت او توزيع دقائق مستقرة ذات احجام صغيرة في المادة الاساس حيث تعتمد ميكانيكية التدعيم لهذا النوع من المواد بالدرجة الاساس على قطر (حجم) الدقائق و الذي يتراوح بين (0.01 - 0.1 μm) وتكون موزعة في الوسط بتركيز حتمي لا يتعدى 15% أو أقل [33] ، ان الخواص الميكانيكية للمواد المترابكة من هذا النوع تكون عادة متماثلة في جميع الاتجاهات (Isotropic) وذلك لكون الدقائق موزعة بشكل عشوائي في المادة الاساس ، وبذلك تعمل على زيادة حد المرونة والتقليل من اجهادات التشويه ومن أهم الأمثلة على ذلك اكاسيد الفلزات مثل اكاسيد الالمنيوم (Al_2O_3) التي تمتاز بتحملها للأجهاد واستقرارها الحراري العالي حيث تشكل هذه الدقائق عقبات امام حركة الانخلاعات عند الدرجات الحرارية العالية [7] .

3-2-6-1 التقوية بالقشور (Flake Reinforcement)

المواد المترابكة المدعمة بالقشور (وهي صفائح رقيقة) تطبيقات عديدة إذ يستعاض بها عن الالياف حيث توضع القشور في المادة الاساس بشكل طبقات متوازية تعطي خواص متماثلة في اتجاهين ضمن الطبقة الواحدة. إن شكل القشور غالباً ما يكون بشكل مستو مما يجعل تراصفها بشكل قريب بعضها من بعض ضمن المادة الاساس وبذلك يعطي نسبة مئوية عالية في تقوية المادة المترابكة لكل مساحة مقاطع معينة ، ويمكن استخدام القشور المعدنية كمادة مقوية لمادة اساس غير معدنية لتحسين التوصيلية الحرارية والكهربائية للمترابكات بينما يمكن استخدام قشور الزجاج او المايكا لتقليل التوصيلية الحرارية و الكهربائية [17] . إن خواص المواد المترابكة المدعمة بالقشور تعتمد بشكل كبير على نسبة القطر المكافئ للقشور الى سمكها اذ تحصل اكبر تقوية عندما تكون النسبة عالية وكذلك تعتمد التقوية على قوة التلاصق بين القشور والمادة الأساس، هذان العاملان مهمان وضروريان لضمان انتقال الاجهادات المسلطة من المادة الاساس الى القشور وذلك لمنع او تقليل حدوث انفصال القشور عن المادة الاساس ، وهنالك استخدامات تدخل فيها المواد المترابكة المقواة بالقشور مثل استعمال قشور المايكا في الدوائر الالكترونية و استخدام قشور الزجاج مع الالبيوكسي لصنع زعانف الموازنة و المقدمة المخروطية للفذائف [24] [34] .

4-2-6-1 التقوية بالدقائق (Particulate Reinforcement)

وهي مواد مشابهة للمواد المترابكة المدعمة بالتشتت ولكن قطر الدقائق يزيد عن ($1\mu\text{m}$) وكسرها الحتمي يصل الى اكثر من 25% ، إن توزيع الدقائق في المادة الاساس يكون بشكل عشوائي ولذلك فالمقاومة و بقية الخواص للمادة المترابكة تكون متماثلة [35]. إن نوع هذه الدقائق اما فلزية او لافلزية ويعتمد على حجمها لغرض زيادة مقاومة الزحف وتحسين معامل التمدد الحراري ومقاومة الصدمة ويطلق على هذا النوع من المواد المقوية بالحشوات (Fillers) وتكون هذه المواد على عدة اشكال منها الكروية والقشرية والابرية والخيطية وتعتمد خواص المواد المترابكة على خواص الحشوات وكسرها الحتمي [36] . ان الدقائق تنقسم الحمل المسلط مع المادة الاساس اي لها القابلية على حمل الاجهاد المسلط على المادة المترابكة [29] ، من هذا يمكن اعتبار المواد المترابكة المقواة بالدقائق تسلك سلوكاً وسطياً (بين المواد المقواة بالتشتيت والمواد المقواة بالالياف)، لذلك ففي المواد التي تكون فيها الدقائق صغيرة جدا ، تكون آلية التقوية باعاقبة حركة الانخلاعات فقط ولهذا كل التحميل يقع على المادة الاساس ، اما في الالياف فتكون هي العنصر الرئيسي لتحمل الاجهاد و الغرض من المادة الاساس هو لنقل ذلك الاجهاد الى الالياف [29] .

تقسم المادة الأساس التي يمكن تقويتها بهذا النوع من التقوية الى [28] : -

1- **المواد ذات الأساس المعدني** : يتم إضافة دقائق من مواد سيراميكية صلدة لمادة أساس معدنية او سبائكية [23] [29] ، حيث تمتلك المادة المقوية مقاومة انضغاط وصلادة عاليتين لكنها هشّة ، اما مادة الأساس المعدنية فتكون اقل مقاومة لكنها ذات مطيلية عالية ، وخير مثال على ذلك هو اضافة دقائق من كاربيد التنكستن الى مادة الأساس المعدنية من الكوبلت او النيكل للحصول على مادة متراكبة ذات متانة وصلادة عاليتين [23] .

2- **المواد ذات الأساس البوليمري** : لغرض تحسين بعض خواص المواد البوليمرية، تضاف بعض الدقائق الى المادة الأساس التي يمكن بها تقليل كلفة المنتج عن طريق استبدال بعض المواد الغالية الثمن بمواد بديلة لمثل هذا النوع [29] ، إن بعض الانواع يمكن بها زيادة الخواص وبعضها الآخر غير ممكن وهذا يرجع الى الاعتماد على حجم الدقائق وطريقة ومقدرة المادة الأساس على نقل الاجهاد الى الدقائق وذلك لأن آلية التقوية هو اعاقه حركة الانخلاعات ونقل الإجهاد [37] ، ان اهم اقسام البوليمرات المستعملة كأساس هي :

1- **فينول - فورمالديهايد** : يقوبل هذا النوع بالضغط والحرارة للمسحوق البوليمري الذي ينتج بطريقة التكتيف ويعد الاستعمال التقليدي لهذا النوع هو العوازل الحرارية والكهربائية [28].

2- **بوليمرات الايبوكسي والبوليستر** : ينتج هذا النوع بطريقتين فاذا كان البوليمر سائلاً يضاف المصلد وينتج ببلمرة الاضافة والطرقه الثانية هي كون البوليمر عبارة عن مسحوق وتحصل البلمرة بتسليط ضغط عال ، ان اهم استعمالات هذا النوع هو العوازل الكهربائية والصناعات الإنشائية والآلات المختلفة [28] .

3- **بوليمرات المطاوعة للحرارة** : وتتضمن هذه المواد البولي اثلين والبولي بروبيلين والبولي كلوريد الفايثيل التي تصنع بواسطة القوالبه بالبيتق وتستعمل هذه المواد بعد بنقها الى قضبان وأنابيب وشرائح أيضا [28] .

3-6-1- **السطح البيئي وقوة التلاصق (Interface and Bonding)**

يعرف السطح البيئي بانه السطح الرابط بين مواد التقوية ومادة الأساس إذ يمكن ان يكون هنالك نوع من عدم الاستمرارية للخواص الميكانيكية و الفيزيائية والكيميائية ويقصد بعدم الاستمرارية هو وجود اختلاف في التركيب البلوري ومعامل المرونة والكثافة وفي معامل التمدد الحراري .. الخ من جانب الى اخر [37] .

ان الية نقل الاجهاد من المادة الأساس الى مواد التقوية وهي المبدأ الاهم لتقوية مادة الأساس بمواد وذات معامل مرونة ومقاومة عاليتين تعتمد بالدرجة الأساس على قوة الربط بين هذه المواد اذ بانعدام هذا الربط لا يكون هنالك نقل للاجهاد وبالتالي تسلك مواد التقوية كفجوات داخل المادة الأساس [38] ، بالاضافة إلى ان سلوك السطح البيئي يؤثر من كيفية فشل المادة والشغل اللازم لتشققها وتمزقها [39] .

إن خواص السطح البيئي تعتمد بالدرجة الأساس على امكانية وقابلية المادة الأساس على تبليل مواد التقوية (في حالة كون المادة الأساس سائلة في اثناء تصنيع المواد المترابكة) وهذه الخاصية تسمى بقابلية التبليل (Wettability) ويمكن تعريفها بانها المدى الذي يمكن للسائل عنده ان ينتشر على سطح صلب .

إن زيادة هذه الخاصية بين المادة الأساس ومواد التقوية يوفر زيادة في مساحة التماس البيئية بين هاتين المادتين والتي عن طريقها يتم نقل القوة (الاجهاد) بالاضافة إلى قابلية التبليل يعتمد السطح البيئي بينهما على نوع الربط (Bond) بين المادتين اللتين يقع السطح البيئي عندهما ومن اهم انواع الربط هي [7] [34] [38] :

1- **الربط الميكانيكي (Mechanical Bonding)**

ويمكن أن يحدث عن طريق شكل كلا المادتين، فقد تحوي كلا المادتين على ثقوب او شقوق تتغلغل او تتداخل المادة بها كما في لصق الخشب او الورق [38] ، ويعتمد على مقاومة او تأثير

الاحتكاك أو خشونة السطح بين المادتين، ان خشونة السطح تزيد من قابلية التبليل وبالتالي زيادة مساحة التماس [40] .

2- الربط الكيميائي (Chemical Bonding)

يعد هذا الربط من اقوى انواع الربط ولغرض الحصول على سطح بيني يملك مقاومة قص (Shear Strength) تقارب مقاومة المواد المكونة للمواد المترابكة يصار الى استعمال هذا النوع من الربط [7] [38] .

ان الربط الكيميائي يكون على نوعين :-

1- النوع الاول : يكون عن طريق القوى الجزيئية بين المادة الاساس ومادة التقوية ، ان كفاءة هذا النوع من الربط تعتمد على نوع الاصرة الكيميائية بين الجزيئات فقد تكون هذه الاواصر ايونية او معدنية او تساهمية [38] وتزداد كفاءة هذا الربط كلما زادت قابلية التبليل بين المادة الاساس ومادة التقوية [37] .

2- النوع الثاني : هو الذي يحصل بين السطحين نتيجة انتقال الجزيئات او الذرات من مادة إلى أخرى وهذه العملية يتم السيطرة عليها بواسطة خاصية الانتشار (Diffusion) اي انه قد يحصل الربط نتيجة انتقال بعض ذرات مادة الاساس إلى الشبكة الجزيئية لمادة التقوية او بالعكس يحصل بشكل متبادل بين الاثنين [38] .

7-1 البولي اثلين (Polyethylene)

7-1-1 تطور صناعة البولي اثلين

يعد البولي اثلين من البوليمرات المهمة صناعياً وينتج صناعياً وعلى مقياس ضخم جداً في العديد من المجمعات البتروكيمياوية في العالم [12] .

في عام (1898) قام Pechmann بتحضير مادة مشابهة تماماً للبولي اثلين من الداى أزو ميثان في الايثرو لكن بسبب غلاء هذه المادة أصبح هذا البوليمر غير تجاري [41].

ان البداية الحقيقية للمواد البلاستيكية الاولييفينية كانت في عام (1933) من Faecett E.W و R.O. Gibson من مختبرات (ICI) في انكلترا من خلال اكتشاف بلمرة الاثيلين في مفاعل الضغط تحت ضغوط عالية ودرجات حرارية مرتفعة فوجدا تكون البولي اثلين تحت هذه الظروف [12] ، ثم طورت هذه الفكرة وبدأ الانتاج التجاري للبولي اثلين الواطئ الكثافة في شركة (ICI) عام (1940) [41] .

وفي عام (1952) اكتشف مساعد كارل زيكلر من معهد (Max-Planck) في المانيا العامل المساعد (المتكون من تفاعل مركبات العناصر الانتقالية مع المركبات الفلزية العضوية) الذي يمكن بواسطة بلمرة الاثيلين في درجات الحرارة الاعتيادية وتحت الضغط الجوي تحويله إلى البولي اثلين عالي الكثافة [12] ، وفي الخمسينات طورت شركة (Phillips) وشركة (Standard Oil) طرائق جديدة لبلمرة الاثيلين باستخدام الاكاسيد الفلزية المسندة كعوامل مساعدة وباستخدام ضغوط وسطية تتراوح بين تلك المستخدمة في شركة (ICI) والمستخدمه في طريقة زيكلر، تعتمد طريقة (Phillips) على استخدام اوكسيد الكروم المحمل على السليكا أو السليكا - الومنيا ، اما طريقة الزيت القياسي (Standard Oil) فقد استخدم في البداية اوكسيد النيكل المستند على الكاربون المنشط (Activated Carbon)، أما الطريقة المعروفة الان فهي استخدام اوكسيد الموليبيديوم المسند على الالومينا (اوكسيد الالمنيوم) .

وقد طورت أيضا طرائق لبلمرة الاثيلين في الطور الغازي من شركة (BASF) وشركة (Union Carbide) [12] [41].

1-7-2 تصنيف البولي اثلين

(Classification of Polyethylene)

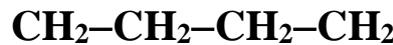
يصنف البولي اثلين حسب المواصفة (1981) (ASTM D1248) تبعاً لكثافته إلى خمسة اصناف وكما موضح في الجدول (1-2) [42].

الجدول (1-2) يوضح اهم اصناف البولي اثلين اعتماداً على كثافته [42].

| NO | Density gm/cm ³ | Common name | Symbol |
|----|----------------------------|--------------------------------|--------|
| 1 | 0.885-0.914 | Very Low Density polyethylene | VLDPE |
| 2 | 0.915-0.925 | Low Density polyethylene | LDPE |
| 3 | 0.926-0.940 | Medium Density polyethylene | MDPE |
| 4 | 0.941-0.959 | High Density polyethylene | HDPE |
| 5 | 0.960 and higher | Very High Density polyethylene | VHDPE |

1-7-2-1 البولي اثلين عالي الكثافة HDPE

يسمى ايضاً البولي اثلين الخطي Linear polyethylene اعتماداً على التركيب الجزيئي للبولي اثلين حيث يكون :-



يعد التبلور (Crystallinity) في البولي اثلين دالة لعدد التفرعات على طول السلسلة اذ عند التفرعات الكثيرة يقل التبلور بشكل كبير وعندما تزداد درجة التفرع بصورة كبيرة جداً فإن البولي اثلين يصبح غير متبلور، في البولي اثلين عالي الكثافة يكون عدد التفرعات اقل من (5) تفرعات لكل (1000) ذرة كاربون في السلسلة الواحدة وبذلك تكون نسبة التبلور حوالي 95 % اضافة إلى ذلك فإنه يحتوي بين(2.5-0.1) أصرة مزدوجة لكل (1000) ذرة كاربون في السلسلة [43].

توجد عدة طرائق مطورة لانتاج البولي اثلين العالي الكثافة وتختلف هذه التكنولوجيات من حيث الجوهر في العوامل المساعدة المستخدمة وظروف البلمرة واهمها هي [4][12]:-

1- تكنولوجية زيكلر (Ziegler Technology)

يستخدم نوعان من الطرائق الانتاجية لبلمرة الاثلين حسب تكنولوجية زيكلر هما :-

أ- طريقة الدقائق العالقة (Slurry Process)

يستعمل في هذه الطريقة سائل هيدروكاربوني لا يذوب فيه البولي اثلين عند درجة حرارة البلمرة مثل الهكسان (Hexane) او البنتان (Pentane) وتجري البلمرة بوجود عوامل مساعدة غير متجانسة اي غير ذائبة في وسط التفاعل ، تتكون هذه العوامل المساعدة عادة من هاليدات التيتانيوم والكيلات الالمنيوم وتعتمد انتاجية هذه الطريقة على الكثافة الظاهرية للدقائق العالقة [14] .

ب- طريقة البلمرة في المحاليل (Solution Process)

يستعمل في هذه الطريقة سائل هيدروكاربوني يذيب البوليمر عند درجة حرارة البلمرة وتستخدم في هذه الطريقة عوامل مساعدة متجانسة (ذائبة) او غير متجانسة (غير ذائبة) تعتمد انتاجية هذه الطريقة على لزوجة المحلول (Viscosity) اذ تعتمد اللزوجة على تركيز البوليمر في المحلول والوزن الجزيئي للبوليمر المذاب، إن البوليمر المنتج بتكنولوجية زيكلر يكون عادة ملوثاً ببقايا العامل المساعد لذلك يجب فصله عن البوليمر لانه يؤثر على ثباته الحراري (Thermal Stability) وثباته الضوئي (Photo Stability) وتؤدي إلى تلوينه في اثناء عملية تصنيعه وللتخلص من بقايا العامل المساعد تتبع احدى الطرائق التالية [42] :-

- 1- استخدام مذيب مناسب للعامل المساعد لا يذوب فيه البوليمر ومن المذيبات المألوفة لهذا الغرض هي الكحولات ثم يفصل البوليمر عن المذيب اما بواسطة الترشيح او باستخدام اجهزة الطرد المركزي .
- 2- يذوب البوليمر في مذيب غير صالح لاذابة العامل المساعد ثم يفصل العامل المساعد عن محلول البوليمر بواسطة الترشيح او الطرد المركزي .
- 3- يذوب البوليمر والعامل المساعد في مذيب مناسب ثم يفصل العامل المساعد عن محلول البوليمر بواسطة الاستخلاص (Extraction) .

2-تكنولوجيا فيليبس (Philips Technology)

تتميز هذه التكنولوجيا باستعمالها عوامل مساعدة محتوية على ثالث اوكسيد الكروم المستند على ثاني اوكسيد السيكون (CrO_3/ SiO_2) ويكون العامل المساعد فعالاً جداً بعد تنشيطه (Activation) وذلك بتسخينه مع الهواء إلى درجة حرارة تبلغ $850^{\circ}C$) ويوجد نوعان من الطرائق الانتاجية لبلمرة الاثيلين حسب تكنولوجيا فيليبس هما [4][12][14] :-

أ. طريقة البلمرة في المحاليل (Solution Polymerization)

يتراوح الوزن الجزيئي للبوليمر المحضر بهذه الطريقة (بين 20 000-100 000) وان هذه الطريقة غير معمول بها في الوقت الحاضر .

ب. طريقة الدقائق العالقة (الطور العالق) (Suspension Polymerization)

هي الطريقة الإنتاجية الجديدة المتبعة في تكنولوجيا فيليبس ويتراوح الوزن الجزيئي للبولي اثلين المحضر بين (500 000 - 100 000) وهي الطريقة المتبعة في مجمع البتروكيمياويات العراقي ، وتجري هذه البلمرة عادة في سوائل هيدروكاربونية غير مذوبة للبوليمر عند ظروف البلمرة مثل الهكسان او البنتان وتتميز هذه الطريقة بأن كمية العامل المساعد المتبقي مع البوليمر لا يؤثر في مواصفات البوليمر الفيزيائية وثباته الحراري لذلك لاتحتاج هذه التكنولوجيا بهذه الطريقة إلى مرحلة لفصل العامل المساعد عن البوليمر وهذا ناتج من ضالة كمية العامل المساعد المتبقي مع البوليمر [14] .

3- تكنولوجيا شركة (BASF) وشركة (Union Carbide)

ان اهم مراحل الطريقة الانتاجية لبلمرة الاثيلين في الطور الغازي حسب هذه التكنولوجيا يمكن تلخيصها بما يلي :-

تجري بلمرة الاثيلين في مفاعلات خاصة تدعى بالمفاعلات ذات الطبقة المسالة تحت ضغط يبلغ حوالي عشرين ضغطاً جويماً وعند درجات حرارية تتراوح بين $80-105^{\circ}C$) وذلك اعتماداً على نوعية البوليمر المراد صناعته ثم يسحب البوليمر من المفاعل باستمرار

وفصل الاثيلين المتبقي بواسطة النتروجين الساخن ويرجع غاز الاثيلين بعد تنقيته إلى المفاعل ، تتميز هذه التكنولوجيا بعدم حاجتها في استخدام المذيب وبذلك تكون كلفتها اقل من نظيراتها التي تستخدم المذيبات في البلمرة بحوالي (15 %) [12] [42] .

1-7-2-1-1 استخدامات البولي اثلين عالي الكثافة

يستخدم البولي اثلين العالي الكثافة في مجالات الصناعات المختلفة وفي التعليب وصناعة الادوات المنزلية ولعب الاطفال والتجهيزات الرياضية ويدخل في صناعة السيارات وانايبب الري والرقائق الشبيهة بالورق .. الخ [4] [12] .

1-7-3 المضافات المستخدمة مع البولي اثلين

(Polyethylene Additives)

تضاف بعض المضافات إلى البولي اثلين بغية تحسين او ادخال بعض الخصائص المرغوبة على البوليمر ومن هذه المواد هي [4] [12] [16] :-

1-7-3-1 المضادات للأكسدة (Antioxidants)

تضاف هذه المواد للمحافظة على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للبولي اثلين مثل اللون ومعامل الانسياب في اثناء الخزن او عند تصنيع البوليمر او عند استخدام النواتج المصنوعة من البولي اثلين لان البولي اثلين يكون معرضاً للتأكسد (Oxidation) ويعاني تحللاً حرارياً (Thermal Degradation) عند تعرضه للتسخين في اثناء تصنيعه بوجود الاوكسجين او الهواء الجوي او الاوزون او تعرضه للاشعة فوق البنفسجية ، واهم المضادات للاكسدة المستخدمة مع البولي اثلين هي (داي بيوتيل ثالي - باراكريسول) [12] .

1-7-3-2 عوامل مانعة للالتصاق (Antiblocking Agents)

تضاف بعض العوامل المانعة للالتصاق رقائق البولي اثلين بعضها مع بعض ويستعمل لهذا الغرض نوع من السليكا يدعى (Dido Maceuos Silica) وسليكات الكالسيوم (Calcium Silicate) .

1-7-3-3 عوامل انزلاقية (Slip Agents)

تضاف بعض المركبات إلى البولي اثلين لرفع درجة انزلاق رقائق البولي اثلين على بعضها وتمنع الالتصاق بينها وتقلل الاحتكاك بين سطوح الرقائق وبين سطوح المكائن المستعملة في التصنيع، ومن اهم عوامل الانزلاق المستعملة هي اميدات الحوامض الشحمية (Fatty Acid Amides) او مشتقات استرات الحوامض الشحمية (Derivatives of Fatty Acids Esters) [16] .

1-7-3-4 أسود الكربون (Black Carbon)

ان دقائق الكربون الاسود تكون بشكل كروي مع انتظامها في بعض الحالات بشكل صفوف مشابهة إلى تركيب متسلسل وان تركيبها البلوري يكون مشابهاً إلى الكرافيت [4] والدقيقة الكربونية غير مسامية نسبياً .

يصنع الكربون الأسود في قنوات (Channel Blacks) بواسطة حرق الغاز الطبيعي بتجهيز محدود من الهواء وبعد ذلك يسمح للكربون الناتج ان يترسب على قنوات باردة مصنوعة من الحديد ويكون قطر الدقيقة الكربونية بحدود A° (200-300) وفي بعض الاحيان يعوض عن قنوات الكربون الاسود بافران الكربون الاسود (Furnace Blacks) ، ان هذا النوع من

الكاربون يصنع بواسطة حرق الغاز او الزيت في افران محدودة الهواء وبعد ذلك يزال الكاربون من الغازات بعملية ترسيب بالشحنات الكهربائية المستقرة وبالطرد المركزي ، ويكون قطر الدقيقة الكاربونية الناتجة بحدود $A^{\circ}(300-800)$.

إن هذا النوع من الكاربون يكون مميزاً بتأثيره في المواد المضاف إليها وتكون دقائق الكاربون الكبيرة مثل الكاربون الاسود الحراري (Thermal Blacks) والكاربون الاسود الاستيليني (Acetylene Blacks) والكاربون الاسود المصباحي (Lamp Blacks) اقل استعمالاً كمواضع مضافة [4] [12] [16] يضاف عادة اسود الكاربون إلى البولي ايثيلين عالي الكثافة بشكل مسحوق او يكون محمولاً على حبيبات البولي ايثيلين ونسبة تتراوح بين (2-5wt%) وزناً ويستخدم عادة لتقوية وتحسين الخصائص الميكانيكية للمنتج النهائي وهذا يعتمد على حجم الدقيقة الكاربونية والمساحة السطحية لها ودرجة تكتل الدقائق حيث تزداد التقوية مع نقصان حجم الدقيقة أي يصنف حسب حجمه الحبيبي وهناك انواع تجارية منه مثل (N-110) إلى (N-990) ويكون تركيبه الكيميائي محتوياً على شوائب H_2 بنسبة (0.2%) و O_2 بنسبة (1%) و S بنسبة (0.8%) .

إن استخدام اسود الكاربون بلونه الاسود يقلل تأثير الأشعة فوق البنفسجية على البوليمر اضافة إلى تلويثه للبوليمر ، يراعي عند اختيار المضافات ان يكون تجانسها جيداً مع البولي ايثيلين ورخيصة الثمن وعديمة اللون والرائحة وغير سامة [12] [14] [16] .

8-1 طرائق تصنيع المتراكبات ذات الاساس البوليمري

تقسم تقنيات تصنيع المتراكبات البوليمرية اعتماداً على المادة المقواة و البوليمر المستعملين و كذلك الاستعمال النهائي للمتراكب الى [12] [44] :-

1-8-1 القولية بالكبس (Compression Molding)

وهي من الطرائق الاساسية في تصنيع الراتنجات المتصلبة حرارياً (Thermoset) ، حيث تستخدم في تصنيع بعض الحاجيات البلاستيكية و في صناعة العوازل الكهربائية فكل ما تحتاجه العملية هو القالب الذي يتكون من جزئين ومعدات لتسخين جزئي القالب (Mold) ومعدات للضغط ، تتلخص هذه الطريقة بوضع كمية من مسحوق القولية (Molding Powder) في الجزء السفلي من القالب و يسخن القالب الى ان يصبح المسحوق ليناً لينتخذ شكل القالب بعد ذلك ينطبق جزء القالب على بعضهما و يبقى البوليمر تحت تأثير الضغط لفترة محددة من الزمن ثم يفتح القالب لأخراج المادة [12] .

1-8-2 القولية بالقذف (الحقن) (Injection Molding)

في هذه الطريقة من التصنيع يسخن البوليمر الى ان ينصهر مكوناً منصهراً لزجاً ثم يقذف المنصهر الى داخل قالب بارد نسبياً ذي تجويف يمثل شكل الحاجة المراد انتاجها ويتم ذلك عن طريق المكبس او الحلزون فيبرد المنصهر آخذاً شكل القالب و يتصلب ثم يفتح جزء القالب و يقذف الجزء المصنوع الى خارج القالب ، تتميز هذه الطريقة بالسرعة و الدقة التصنيعية غير انها تحتاج الى معدات معقدة نسبياً مقارنة بطريقة القولية بالكبس . تستخدم هذه الطريقة في تصنيع الهيكل الخارجي للراديو او التلفزيون او ما شابه ذلك [44] .

1-8-3 القولية بالنفخ (Blow Molding)

تستخدم هذه الطريقة من التصنيع في معظم البوليمرات التي يمكن نفخ منصهرها كما في الزجاج اذ تصنع الحاجيات المجوفة مثل القناني البلاستيكية والحاويات ولعب الأطفال وتتضمن مراحل القولية بالنفخ على صهر البوليمر او تليينه (Softening) ثم تكوين التشكيل الاولي (Parsion) والذي هو عبارة عن تركيب انبوبي يجري تكوينه بواسطة القذف او بواسطة البثق ثم ينزل التشكيل الاولي بين نصفي القالب ثم ينغلق القالب على التشكيل الاولي ثم يتم نفخ

التشكيل الاولي بواسطة تركيب خاص ليأخذ شكل القالب وبعد فترة زمنية محددة تكفي لتبريد المنصهر بعد اخذه شكل القالب يفتح نصف القالب وتسقط الحاجة المصنوعة [12] .

4-8-1 التصنيع بواسطة البثق

(Processing by Extrusion)

تتضمن هذه الطريقة من التصنيع صهر الحبيبات البوليمرية وتحويلها إلى منصهر متجانس بواسطة المزج والتسخين ثم ضخ هذا المنصهر عبر فوهة التشكيل (Die) مكوناً تراكيب ذات اشكال منتظمة مثل :-

- 1- الصفائح البلاستيكية (Sheets) او الانابيب (Pipes) او اعمدة بلاستيكية (Rods) .
 - 2- لأغراض الطلاء (Coating) مثل طلاء الورق او الانسجة او بعض الصفائح المعدنية.
 - 3- لطلاء الاسلاك الكهربائية و القابلات (Cables) و غير ذلك [44] .
- يبين الشكل (1-2) نموذجاً لمعدات التصنيع بالبثق فيلاحظ من الشكل بانها تتألف من مستودع لحبيبات البوليمر التي تزود الباتقة بالحبيبات ، تنزل هذه الحبيبات على تركيب حلزوني (Screw) يتحرك دورانياً داخل اسطوانة التسخين ، نتيجة لحركة الحلزون يندفع البوليمر تدريجياً الى الامام و باندفاعه الى الامام ترتفع درجة حرارته و يتجانس بسبب المزج الذي تسببه حركة الحلزون ، وعندما يبلغ مقدمة الباتقة يتحول الى منصهر متجانس ثم يندفع الى الامام خلال مصفاة خاصة (Screen) موجودة داخل الحلزون و اخيراً يصل منصهر البوليمر الى فوهة الفنف (Die) ليأخذ الشكل المطلوب اما على هيئة انبوب او صفائح او غير ذلك [12]

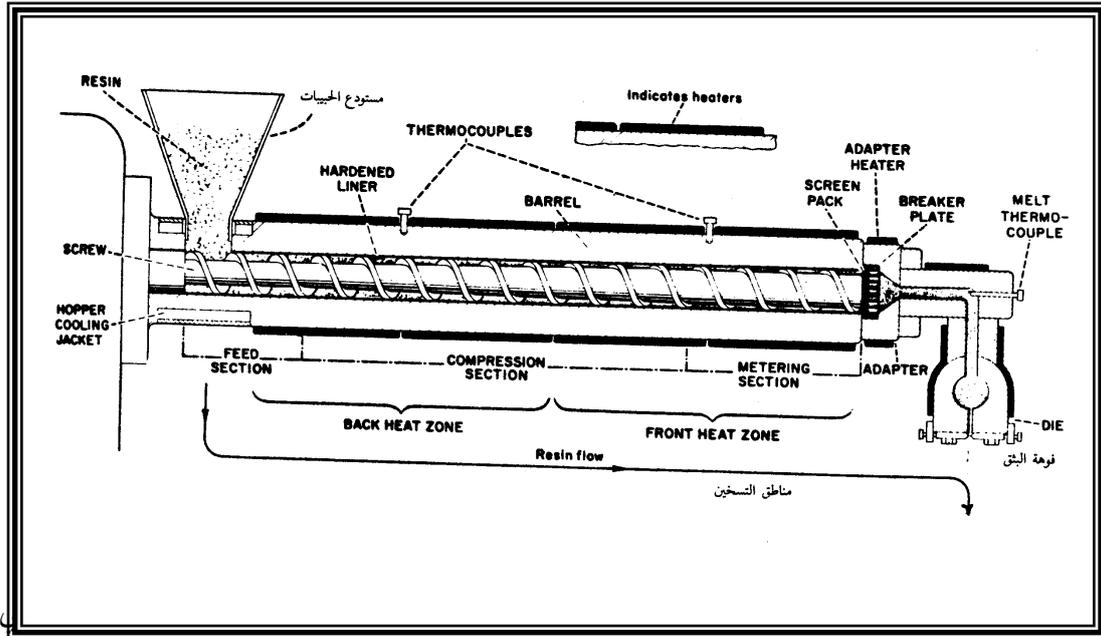
تقوم المصفاة بترشيح المنصهر من الاجسام الصلبة الموجودة فيه والتي بدورها تؤثر على نوعية الانتاج . من الامور الاساسية في البثق هو السيطرة على درجة الحرارة ، ان حرارة صهر الحبيبات مصدرها التسخين الخارجي والحرارة الناتجة من الاحتكاك التي تسببه حركة الحلزون داخل الاسطوانة ويجرى تسخين اسطوانة البثق (الاسطوانة الخارجية) اما كهربائياً او بواسطة امرار بخار الماء او الزيت المسخن غير ان التسخين الكهربائي هو المفضل بالرغم من التكاليف المرتفعة نسبياً و ذلك لسهولة السيطرة على عملية التسخين [12] [44] .

يلاحظ من الشكل ان التسخين في اسطوانة البثق يكون مقسماً الى عدة مناطق تتزايد درجة حرارتها باتجاه فوهة البثق و تقاس درجة حرارة المنصهر بالقرب من فوهة البثق بواسطة مزدوج حراري (Thermocouple) يمتد إلى داخل المنصهر ، تختلف مواصفات الباتقات المستخدمة حسب نوع البوليمر المراد تصنيعه فبالنسبة للبولي اثيلين يجب ان يكون طول الحلزون في اسطوانة البثق حوالي (16-30) مرة ضعف قطر الحلزون وذلك لزيادة مساحة الانتقال الحراري ولزيادة مدى تجانس البوليمر عبر انتقاله لهذه المسافة الطويلة [12].

يقسم الحلزون الى ثلاث مناطق رئيسية وهي منطقة التغذية ومنطقة الانضغاط ومنطقة القياس ، وتكون أهمية منطقة الانضغاط لتخليص منصهر البوليمر من الفقاعات الهوائية لموجودة فيه والتي تؤثر في نوعية الانتاج ويزداد التلامس بين المنصهر واسطوانة البثق وبذلك يزداد التبادل الحراري بينهما.

إن لعمق نتوءات الحلزون تأثيراً ملحوظاً على بعض خواص المنصهر فنقصان عمق نتوءات الحلزون في منطقة القياس يؤثر تأثيراً كبيراً في زيادة درجة حرارة المنصهر وزيادة كفاءة مزجه و تجانسه.

أما بالنسبة لفوهة البثق فيجب تصميمها بشكل يحافظ على المنصهر في درجة حرارة ثابتة تسمح بخروج المنصهر عبرها بسرعة ثابتة بابعاد تقارب الابعاد المحددة للحاجة المراد تصنيعها [4] [12] [44].



بثق منصهر البوليمر خلال فوهة بثق حلقي الشكل يجب ان تكون ابعاد الباتقات المستخدمة لهذا الغرض بحدود 1:20 (نسبة الطول الى القطر) وذلك للحصول على طاقة انتاجية عالية وتقليل الكلفة الإنتاجية للأنابيب المصنوعة ، تعد فوهة البثق من الاجزاء المهمة في باتقات الانابيب فهي السبب في الكثير من الصعوبات التقنية ورداءة الانتاج و تليها في الاهمية وحدة التبريد وتحديد أبعاد الأنابيب المبتوقة وتتم الأخيرة بواسطة الهواء المضغوط داخلها وتعتمد أيضا على نسبة السحب (Draw Ratio) والتي تتعرض لها الانابيب المبتوقة، أما وحدة التبريد فتكون على هيئة أحواض طولية يبلغ طولها (3-12m) وتحتوي على الماء كوسط للتبريد فتتمرر الانابيب المبتوقة على سلسلة من العجلات المبردة لحين ان يتصلب السطح الخارجي للانبوب و بعد ذلك يمرر داخل هذه الاحواض التي تقوم بمهمة التبريد، وبعد خروج الأنابيب المبتوقة من وحدة التبريد تدخل وحدة السحب لغرض تحديد أبعادها من حيث قطرها الداخلي والخارجي ويتم ذلك بواسطة معدات السحب الخاصة بذلك [4] [12].

9-1 الخواص الميكانيكية للمواد المترابطة البوليمرية

(Mechanical Properties of Composite Polymer Material)

تعد دراسة الخواص الميكانيكية للبوليمرات عملية معقدة بسبب الحساسية العالية للسلوك الميكانيكي تجاه مجموعة من العوامل الخارجية و الداخلية و تتمثل العوامل الخارجية بدرجات الحرارة و الزمن و الضغط عند الاختبار و التعرض للاشعاع ، اما العوامل الداخلية فتتمثل بالبنية البلورية و درجة البلورة ووجود الملونات و درجة التشابك [45] .

هناك اعتماد كبير للخواص الميكانيكية للبوليمرات على درجة الحرارة و زمن التحمل مقارنة بالمواد الهندسية الاخرى الاقل تأثيراً بهذين العاملين و يعود سبب هذا الاعتماد على طبيعة البوليمر اللزجة المرنة (Viscoelastic) فالبوليمرات تتسم بصفات السوائل اللزجة عند تسليط اجهاد عليها و ان الاجهاد يتلاشى على هيئة حرارة و عند رفع الاجهاد عنها تبقى في الحالة المشوهة (Deformed Form) و غير قادرة على اعادة مواصفاتها الاولية وفي نفس الوقت فان البوليمرات تمتاز بصفة المرونة (Elastic) اي عند فرض اجهاد ما عليها فانها

تخزن الشغل المصروف عليها على هيئة طاقة مخزونة فتسترجع الابعاد الاولية للمادة حال زوال الاجهاد و تنشأ هذه الازدواجية في الخواص من طبيعة تركيب المواد البوليمرية اذ ان وجود نوعين من القوى و هي الاواصر التساهمية القوية داخل الجزيئات و الروابط الثانوية الضعيفة بين الجزيئات هي التي تؤثر في الخواص الميكانيكية [12] [45] .

بصورة عامة ان الخواص الميكانيكية تصف سلوك المواد البوليمرية و متراكباتها الواقعة تحت تأثير قوى مؤثرة فهناك الكثير من الطرائق التي يتم بواسطتها فحص هذه الخواص و التي يمكن ان تصنف الى ثلاث مجاميع هي [46] :-

1- طرائق فحص الخواص الميكانيكية التي تصف سلوك المادة الواقعة تحت تأثير قوى ساكنة كقوة الشد (Tension) ، الانحناء (Flexural) ، الانضغاط (Compression) والقص (Shear) .

2- طرائق فحص الخواص الميكانيكية التي تصف سلوك المادة الواقعة تحت تأثير قوى متحركة كقوة التصادم (Impact) ، اللي (Torsion) و الكلال (Fatigue) .

3- طرائق فحص الخواص الميكانيكية التي تصف سلوك المادة الواقعة تحت تأثير قوى ثابتة بمرور الزمن كالزحف (Creep) .

1-9-1 الإجهاد – الانفعال (Stress – Strain)

عند تأثير قوى خارجية على جسم ثابت فانها سوف تحرك اجزائه حركة صغيرة و تغيير من شكله او حجمه ، فبعض الاجسام تستعيد شكلها و حجمها الاصلي بمجرد زوال القوى المؤثرة فيقال بان هذه الاجسام تامة المرونة (Perfect Elastic) و منها لا تستعيد شكلها او حجمها الاصلي بعد زوال القوى المؤثرة فيقال بانها عديمة المرونة [47] .

الاجهاد (Stress)

يعرف بانه القوة المسلطة F على وحدة مساحة مقطع العينة A (Cross Section Area) ويعبر عنه بالعلاقة [46] :-

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(1.1)$$

حيث أن :

σ الإجهاد (N/m²).

F القوة المسلطة (N).

A مساحة مقطع العينة (m²).

الانفعال (Strain)

هو نسبة التغير في الطول إلى الطول الأصلي للعينة تحت الفحص ويمكن التعبير عنه بالآتي [12] :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \dots\dots\dots (1.2)$$

حيث ان :

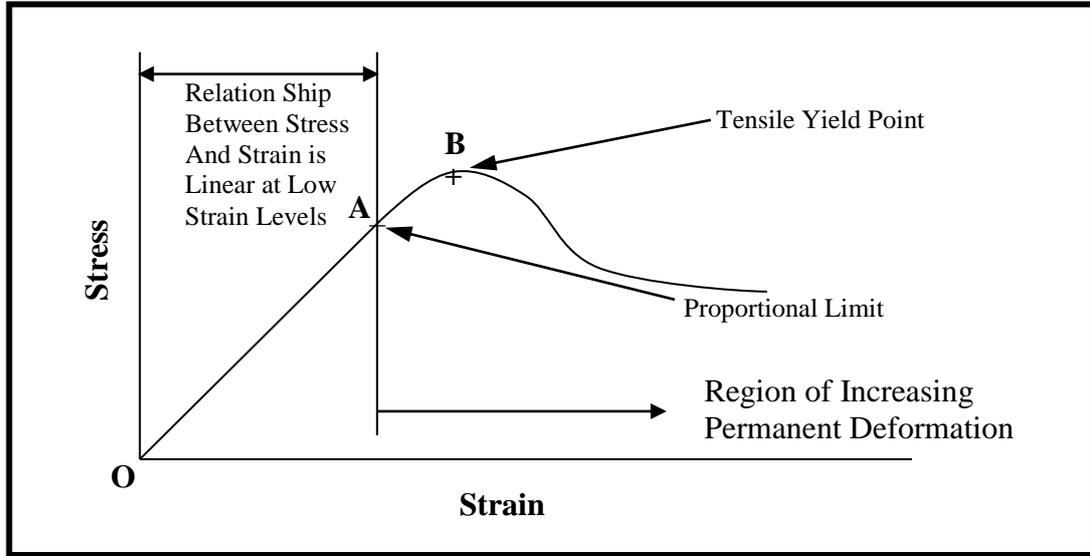
L الطول النهائي للعينة (mm).

L₀ الطول الأصلي للعينة (mm).

ΔL مقدار التغير في الطول (mm).

1-9-1-1 العلاقة بين الاجهاد و الانفعال

يمكن دراسة العلاقة بين الاجهاد و الانفعال من المنحنيات الناتجة من دراسة التشوه الذي يؤدي الى تغيير ابعاد المادة تحت تأثير قوى مسلطة عليها [5].



الشكل (1-3) يوضح منحنى الاجهاد - الانفعال العام للدائن [5].

عند تأثير قوة على مادة بوليمرية بحيث تعمل على استطالتها و رسمنا بيانياً بين الاجهاد و الانفعال يتضح ما يلي كما هو موضح في الشكل (1-3) :-

1- المستقيم (OA) يدل على ان الانفعال (ϵ) الناتج يتناسب طردياً مع الإجهاد (σ) وعند زوال الإجهاد فان المادة تعود الى وضعها الاصلي و تسمى هذه المنطقة من منحنى (الاجهاد - الانفعال) بحد التناسب (Proportional Limit) و فيها تخضع المادة الى قانون هوك (Hook's Law) الذي ينص على ان الانفعال الحادث بتأثير الاجهاد المسلط يتناسب طردياً مع الاجهاد المحدث له و ان النسبة بين الاجهاد الى الانفعال هي مقدار ثابت و يسمى بمعامل المرونة (Modulus of Elasticity) او معامل يونك (Young's Modulus) [5] [12] [46] و يمكن التعبير عنه بالصيغة الآتية [46]:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \dots\dots (1.3)$$

حيث ان :

E معامل يونك N/m^2 وهو يمثل ميل المستقيم OA

2- عند زيادة الاجهاد يأخذ الخط المستقيم بالانحناء بعد النقطة (A) اي تصبح زيادة الانفعال غير خطية مع زيادة الاجهاد و يستمر هذا السلوك حتى النقطة (B) و التي يطلق عليها نقطة الخضوع (Tensile Yield Point) و هي تمثل نهاية السلوك المرن في المادة البوليمرية .

3- بعد نقطة الخضوع (B) (Yield Point) تكون التغيرات الطارئة على البوليمر غير عكوسة (Irreversible) و بذلك فان المادة البوليمرية تتعرض الى الانسياب اللدن

(Plastic Flow) في هذه المرحلة حتى نقطة الكسر (Break Point) و يسمى الاجهاد عند هذه النقطة باجهاد الكسر .

عموما أن جميع المراحل المذكورة اعلاه و المبينة في الشكل (3-1) لا تظهر جميعها في كل انواع البوليمرات ، فالبوليمرات الهشة لا تتجاوز حد التناسب و لا تعاني تشوهاً لئناً لأن التمزق يحدث بعد نقطة حد التناسب بينما البوليمرات المرنة (المطاطية) لا تعاني ظاهرة الخضوع (Yield Phenomena) بل يزداد طول النموذج و يكون التغير في مساحة المقطع العرضي للنموذج بشكل متجانس على طول الجزء المعرض للأجهاد الى ان تبلغ مرحلة اقصى جهد يتحملة البوليمر المطاطي عندئذ يتمزق النموذج [5] [12] [46] .

أن منحنى الإجهاد – الانفعال يعتمد على عدة عوامل منها ما يتعلق بظروف اجراء الفحص مثل درجة الحرارة ، سرعة الشد ، سرعة الفحص ، الضغط .. الخ و عوامل اخرى تتعلق بتركيب البوليمر مثل الوزن الجزيئي و درجة التشابك .. الخ [12] .

2-9-1 متانة الانحناء (Flexural Strength)

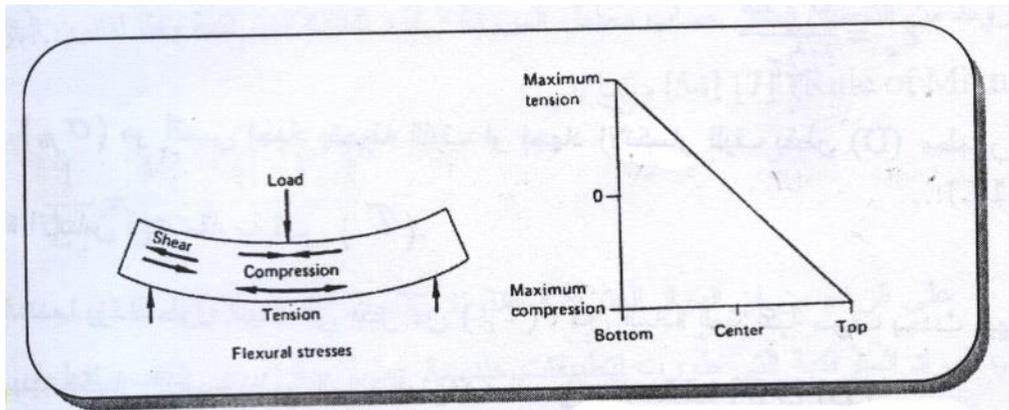
هي مقاومة المادة لأجهادات الانحناء و ذلك بتعريض عينة الاختبار لأحمال مركزية مختلفة و ان مقاومة الانحناء القصوى هي اقصى حمل تتحملة العينة دون حدوث انهيار او تشوه دائم لها [46].

وتمثل الليونة (Flexibility) احدى اهم الخواص التي تتمتع بها البوليمرات عن غيرها سواء كانت مطووعة او متصلدة حرارياً ، و ان التغير في قيمة متانة الانحناء يمثل احد اهم دلائل مقاومة المادة البوليمرية للأحمال الخارجية [48] .
يمكن قياس متانة الانحناء بطريقتين هما :

1- الاختبار الرباعي النقاط (Four Point Test)

2- الاختبار الثلاثي النقاط (Three Point Test)

لقد شاع استخدام النوع الثاني من الفحوصات اكثر من النوع الاول وذلك لسهولة استخدامه وبساطته في حساب متانة الانحناء [42] [49] عند تسليط حمل بالاتجاه العمودي على مركز العينة الموضوعة تحت الاختبار وكما مبين في الشكل (4-1) يحدث لها انحناء تحت تأثير قوى (شد، انضغاط، قص) [50]



الشكل (1-4) يوضح اجهادات الانحناء Flexural Stresses [50]

يمكن حساب إجهاد الانحناء Flexural Stress اعتماداً على الاختبار الثلاثي النقاط من العلاقة التالية [1] [46]:-

$$\text{Flexural Stress (F.S.)} = \frac{3FL}{2bd^2} \dots\dots\dots (1.4)$$

حيث أن :

| | |
|---|-----------------------------|
| F | القوة المسلطة (N) |
| L | البعد بين نقطتي التحميل (m) |
| b | عرض النموذج (m) |
| d | سمك النموذج (m) |

ويمكن حساب معامل المرونة (E) من العلاقة الآتية [51] :

$$E = \left(\frac{\text{Mass}}{\text{Deflection}} \right) \left(\frac{gL^3}{48I} \right) \dots\dots\dots (1.5)$$

حيث أن:

Mass/Deflection يمثل الميل (Slope) المحسوب من منحنى Mass-Deflection

g التعجيل الأرضي (9.81m/s²)

L طول العينة (m)

I يمثل عزم الانحناء الهندسي والذي يعطى بالمعادلة التالية [51] :-

$$I = \frac{bd^3}{12} \dots\dots\dots (1.6)$$

حيث ان :

b عرض النموذج (m)

d سمك النموذج (m)

توجد هنالك قوى قصية (Shear Forces) علاوة على قوى الشد والانضغاط وكما موضح في الشكل (1-4) [50] ويمكن حساب اجهاد القص τ (Shear Stress) للنموذج الخاضع للفحص من العلاقة الآتية [1] :-

$$\tau = \frac{3F}{4bd} \dots\dots\dots(1.7)$$

حيث ان :

F الحمل المسلط (N)

b عرض النموذج (m)

d سمك النموذج (m)

ويمكن توحيد المعادلتين (1.4) و (1.7) وذلك بتعويض المعادلة (1.7) في المعادلة (1.4) لينتج عنها المعادلة الآتية :-

$$\text{F.S.} = \frac{2L}{d} \tau \dots\dots\dots(1.8)$$

وتتأثر قيم متانة الانحناء بعدة عوامل منها (الرطوبة ودرجة الحرارة ومعدل الانفعال) [52] .

3-9-1 مقاومة الصدمة (Impact Strength)

تعد فحوصات قوة التصادم مقياساً لقوة المادة البوليمرية ومقاومتها للانكسار تحت تأثير الإجهاد عند السرعة العالية [12] أن مقاومة المادة تتغير بدرجة كبيرة من جراء طريقة التشويه حيث أن المادة التي تبدو قوية ومطيلية تحت الحمل الساكن ربما تظهر ضعيفة وهشة تحت تأثير إجهادات التصادم، وبذلك تكون مقاومة الصدمة للمواد البوليمرية المطيلية أعلى من مقاومة الصدمة للبوليمرات الهشة، أما بالنسبة للبوليمرات المطاطية فإن قوة التصادم لها عالية جداً لأن البوليمرات المطاطية تكون درجة الانتقال الزجاجي (T_g) لها تقع تحت درجة حرارة الغرفة [33].

أن هذه الفحوصات تكون مهمة جداً من الناحية العملية حيث يمكن من خلالها حساب الطاقة اللازمة لكسر النموذج (Fracture Energy) تحت ظروف قياسية من درجة حرارة ورطوبة وضغط وغيرها [12] فالكسر (Fracture) هو مصطلح يشير إلى عملية انفصال (Separation) أو تجزئة (Fragmentation) جسم صلب إلى قسمين أو أكثر تحت تأثير إجهاد يفوق حمله، وهناك عدة عوامل تؤدي إلى الكسر منها طبيعة المادة وطبيعة الإجهاد وظروف الاختبار وعوامل أخرى بيئية [33] ويمكن تصنيف الكسر إلى نوعين :-

1- الكسر الهش (Brittle Fracture)

يعد هذا النوع من الكسر من أخطر أنواع الكسر لأنه يحدث بسرعة دون إن يسبقه تشوه لدن مرئي وهو يعتمد على درجة حرارة الانتقال الزجاجي (T_g) ومستوى التحميل وحالة الإجهاد الموضوعي وخواص المادة ويتميز الكسر الهش في المواد المتحولة مثل الزجاج بمظهر لامع أملس مع وجود حلقات متحدة المركز صغيرة [21] [33] [53].

2- الكسر المطيلي (Ductile Fracture)

وهو أقل سرعة وخطورة من النوع الأول حيث يسبقه تشوه لدن كبير في المنطقة المحيطة بحافة الكسر الحقيقي وهذا يؤدي إلى التنبه بحدوث كسر في المادة ويتميز الكسر المطيلي بان سطح الكسر يكون خشناً بإفراط مشيراً إلى حدوث مقدار كبير من الشغل اللدن (Plastic Work) أن قد حدث [53] إن قياس قوة التصادم للبوليمرات ومتراكباتها تعد من الفحوصات المعقدة جداً لعدة أسباب منها [12] :-

- 1- تعدد فحوصات قوة التصادم.
 - 2- اختلاف الأساس الذي تعتمد عليه قوة التصادم.
 - 3- اختلاف أشكال وإبعاد النماذج المستخدمة في الفحص.
 - 4- اختلاف الجهد المستخدم في الفحوصات المختلفة.
 - 5- اختلاف سرعة الجهد المفروض على النموذج تحت الفحص.
- توجد عدة أنواع من الفحوصات المستخدمة في قياس قوة التصادم للمواد البوليمرية ولكن أكثر هذه الفحوصات أهمية هي [12] :

- 1- فحوصات الأجسام الساقطة (Falling Weight Test)
- 2- فحوصات تصادم أيزود (Izod Impact Test)

3-فحوصات تصادم جاري (Charpy Impact Test)
إن الطريقة الثالثة هي التي استخدمت لقياس مقاومة الصدمة وبظروف مختلفة في هذا البحث، ويمكن حساب مقاومة الصدمة بتطبيق المعادلة الآتية [5] :-
طاقة الكسر (بالجول)

$$\text{Impact Strength(I.S.)} = \dots\dots\dots(1.9)$$

مساحة المقطع العرضي للعينة عند الكسر (م²)

هنالك العديد من العوامل المؤثرة في قوة التصادم للبوليمر ومترابطاته وهي [12] :-

- 1-تأثير تركيز الاجهادات
- 2-تأثير درجة الحرارة
- 3-توجيه السلسلة البوليمرية
- 4-وجود المواد المقوية ونوع المواد المستخدمة في التدعيم
- 5-الوزن الجزيئي للمادة البوليمرية

4-9-1 الصلادة (Hardness)

وهي واحدة من الخواص الميكانيكية لسطح المادة وتعرف الصلادة بأنها مقاومة السطح للاختراق (Penetration) أي المقاومة لخدش سطح المادة (Surface Indentation) [46] وكما هو الحال في الاختبارات الميكانيكية الأخرى تتأثر الصلادة بدرجة الحرارة والزمن وبقيّة ظروف الاختبار وتتأثر أيضا بنوع السطح الذي نتعامل معه أي بدرجة نعومته. تعتمد الصلادة بالأساس على القوى التي تربط الذرات و الجزيئات في المادة أي كلما كان الربط أقوى و الذرات مترابطة معا ازدادت قيمة الصلادة [46] .
توجد أربع طرائق لقياس الصلادة اعتمادا على الأسلوب الذي يجري القياس به و كما يلي [50] [53] :-

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| (Vickers Hardness) | 1- صلادة فيكرز |
| (Rockwell Hardness) | 2- صلادة روكويل |
| (Durometer Hardness) | 3- صلادة مقياس التحمل |
| (Brinell Hardness) | 4- صلادة برينل |

ان الطريقة الرابعة هي التي استخدمت لقياس الصلادة و بظروف مختلفة في هذا البحث، وتحسب صلادة برينل من المعادلة الآتية [54] :-

$$H_{Br} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots(1.10)$$

حيث ان :

- | | |
|---|---------------------------|
| F | الحمل المسلط (N) |
| D | قطر اداة الغرز (m) |
| d | قطر الاثر على النموذج (m) |

5-9-1 مقاومة الانضغاط (compression Strength)

تعرف مقاومة الانضغاط على انها اقصى اجهاد تتحملة المادة الجاسئ (Rigid Material) تحت الضغط العمودي [45].

يعد هذا الفحص من الفحوصات التي تعطي مدى تحمل البوليمر لظروف الاستخدام .
هنالك العديد من المواد التي قد تكون هشه (Brittle) في حالة الشد ولكنها تبدو مطيلية (Ductile) في حالة الانضغاط [45] ، ان فحص الانضغاطيه يستخدم في الغالب من اجل

تحديد مقاومة الخضوع (Yield Strength) علاوة على مقاومة الانضغاط (σ_{com})، حيث تحسب مقاومة الانضغاط (σ_{com}) من العلاقة (1.1).
أما مضغوطية المادة (Compressibility) فتحسب من العلاقة التاليه [45] [55]:-

$$\epsilon_{com} = \frac{L - L_0}{L_0} \dots\dots\dots(1.11)$$

حيث أن :

L الطول النهائي للعينة (mm)

L₀ الطول الابتدائي للعينة (mm)

ϵ_{com} تمثل الانفعال عند لحظة انبعاج جوانب المادة او تشققها فعلاوة على الانفعال الطولي يوجد انفعال مستعرض وعليه تعرف نسبة بواسون (Poissons Ratio) بانها النسبة بين الانفعال المستعرض الى الانفعال الطولي [47] .

6-9-1 الزحف (Creep)

تعد خاصية الزحف من الخصائص المهمة جدا من الناحية التطبيقية فيقصد بها عادة مقدار التوتر او التشوه الناجم عن اجهاد ثابت بمرور الزمن , ويمكن قياس مقاومة الزحف اما تحت تأثير الانضغاط (Compression) او الشد (Tension) او القص (Shear) او الانحناء (Flexural) او الالتواء الدوري (Torsion) ولكن المستخدم عادة هو قياس التغير في الطول تحت تأثير اجهاد ثابت بمرور الزمن [54] . ان اغلب المعادن و المواد السيراميكية لها درجات انصهار عالية ، فهي تبدأ بالزحف عند درجات حراره اعلى بكثير من درجة حرارة الغرفة ، اما بالنسبة للبوليمرات وبما انها ليست بلورية الشكل فهي لا تملك درجة انصهار محدد ، لذا فان الزحف يحدث احيانا في درجة حرارة الغرفة [33] ، وعند درجة حراره اعلى من درجة الانتقال الزجاجي (T_g) تبدأ بالزحف تحت تأثير (اجهاد ثابت) وهذا بالطبع يتغير حسب نوع المادة البوليمرية وقد يستغرق الفحص ساعات او اياماً وقد يزداد زمن الاجهاد الى اسابيع او اشهر اذا كانت المادة متصلده او مقواة وحسب نوع التقوية، ويمكن تخفيض معدل الزحف في البوليمرات او الراتنجات عمليا وذلك بتقويتها بالالياف او الحشوات او الدقائق لتتمكن من تحمل الاجهادات [31] .

ان اهمية دراسة هذه الخاصية تكمن في قياس التغير في الخواص الميكانيكية كدالة للزمن، وذلك لأن الزمن و درجة الحرارة من العوامل الرئيسية المهمة والمؤثرة على الخواص الميكانيكية حيث تعتمد مقاومة الزحف (Creep Resistance) اعتمادا كبيرا على درجة الحراره فكلما اقتربت درجة الحراره من درجة الانتقال الزجاجي للبوليمر قلت مقاومه للزحف، أما في الدرجات الحراريه المنخفضه فيقل الزحف وذلك لتقييد حرية حركة السلاسل البوليمرية [12].

يمكن دراسة الزحف الناتج عن حمل شد ثابت بقياس الاستطاله الدائمي بعد فترات زمنييه مختلفه لنماذج اختبار موضوعه في درجه حراريه ثابتة، وعند رسم انفعال الزحف مع الزمن نحصل على منحنى الزحف كالذي هو مبين في الشكل (1-5-a) والذي يتكون من ثلاث مراحل اساسيه هي [54] :

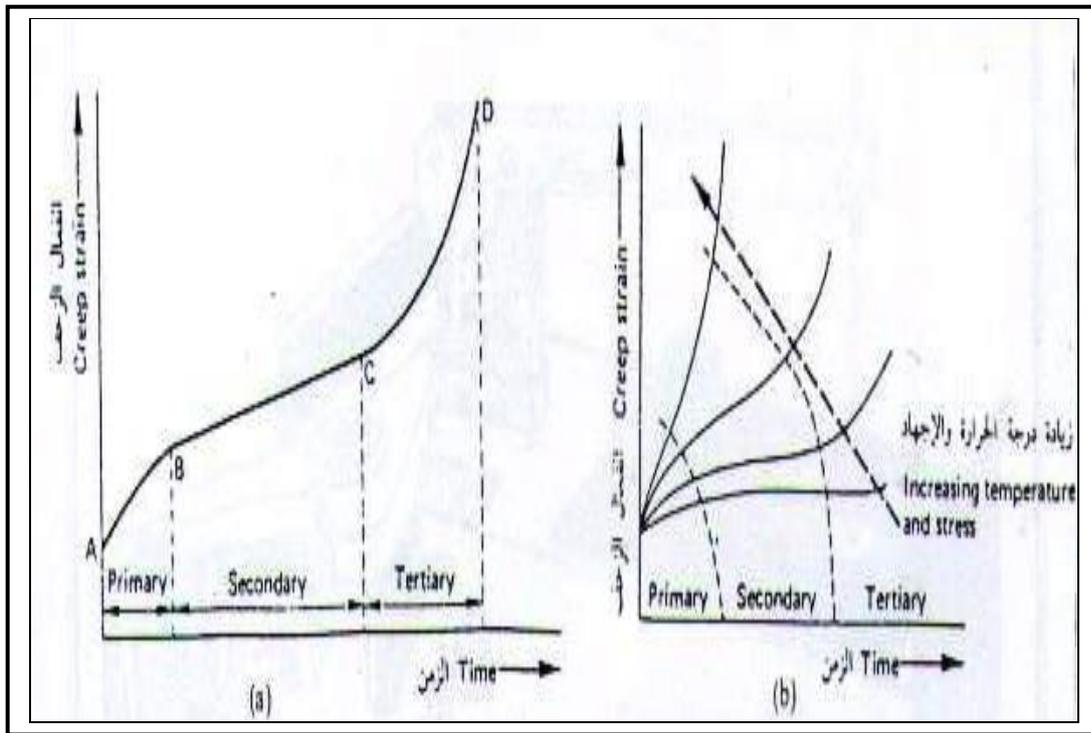
1- المرحلة الابتدائية (AB) التي يرافق التشوه فيها الاصلاد الانفعالي والذي يقلل بسرعه معدل الانفعال .

2- المرحلة الثانية (BC) والتي يكون فيها معدل الانفعال ثابتاً تقريباً وهذه الحاله المستقره هي اهم جزء في المنحنى اذ يعطي العمر التخميني للجزء .

3- المرحلة الثالثة (CD) التي يزداد فيها معدل الانفعال بسرعه نتيجة التخصر الموضعي (Local Necking) لنموذج الاختبار او تكون الفجوات الداخليه ممايزيد في الاجهاد المؤثر وحدث الكسر عند نقطة (D) ، لا يمكن في العديد من الحالات تمييز الحالات الثلاث في المنحني بوضوح ، وللحصول على صورته متكامله لخواص زحف ماده فمن الضروري الحصول على عدة منحنيات للزحف ولمدى من الاجهادات و الدرجات الحراريه كما في الشكل (1-5-b)

الشكل (1-5) يمثل منحنيات الزحف [54]

(a) المراحل الثلاث لمنحنيات الزحف



(b) أنواع منحنيات الزحف بتأثير درجة الحرارة و الاجهاد .

1-10 الخواص الحرارية (Thermal Properties)

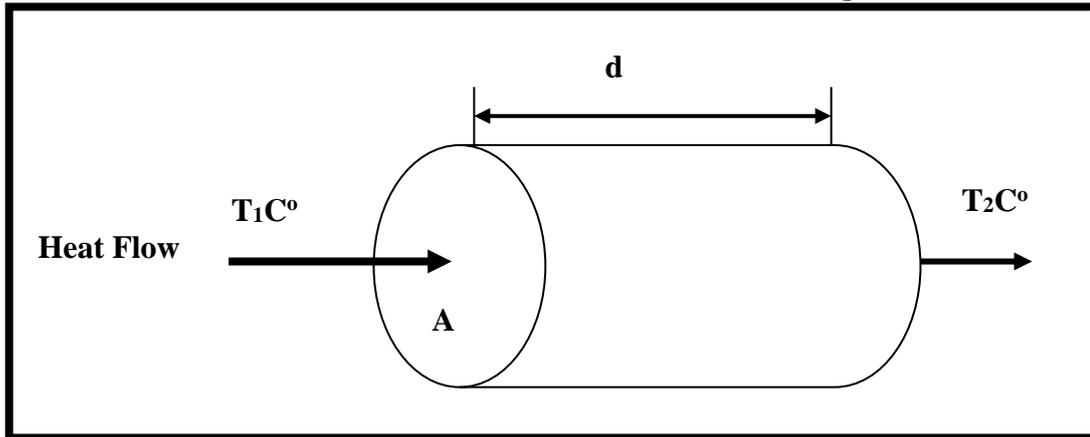
لقد شاع استخدام المواد المتراكبة في اغلب التصميمات نظرا لتفوق خواصها الحرارية على بقية المواد الأخرى فهناك تطبيقات عديدة برزت فيها الحاجة الى مواد ذات قابلية عالية على تحمل درجات حرارية مرتفعة قد تتعرض لها المادة المتراكبة في اثناء استخدامها كواقعات حرارية [56] لذلك نجد ان الهدف الاساسي من دراسة الخواص الحرارية هو التعرف على السلوك الحراري لهذه المواد لكي يحدد لها ادواراً مناسبة في المجالات العملية .

1-10-1 الموصلية الحرارية (Thermal Conductivity)

الموصلية الحرارية هي ظاهرة من ظواهر الانتقال الحراري وفيه يتم انتقال الطاقة من موقع الى اخر بسبب تهيج الجزيئات مصحوبا بتغير في درجة الحرارة ، تحدث الموصلية الحرارية كلما اختلفت درجة حرارة المادة من موقع الى آخر (يحدث بالاتجاه الذي تتناقص فيه درجة الحرارة) وتختلف ميكانيكية الموصلية الحرارية في المواد الصلبة عنها في السائلة وعنها في الغازات وكذلك تختلف في المواد الموصلة للحرارة عنها في المواد العازلة [57] ، ففي

المواد الموصلة (الفلزات) تكون الالكترونات هي المسؤولة عن انتقال الطاقة الحرارية، اما في المواد العازلة (البوليمرات) فان الحرارة تنتقل نتيجة تذبذب الجزيئات التي تنقل هذه الذبذبة الى جزيئات مجاورة لها نتيجة ارتباطها بالواصر وبذلك تنتقل الذبذبة من الطرف الاقل حرارة الى الأعلى بشكل موجات مرنة مكممة بالفونونات [58] , والطرائق الثلاث لانتقال الحرارة من الموضع الساخن الى الموضع البارد تتم بحيث ان انتقال الحرارة بطريقتي التوصيل والحمل هو ابطاً من طريقة انتقال الحرارة بالإشعاع وذلك لان سرعة الإشعاع هي بسرعة الضوء [47] .
فلنفرض ان لدينا شريحة متوازية الوجهين من مادة ما وان سمك هذه الشريحة هو (d) ومساحة أحد الوجهين هو (A) وان درجة حرارة الوجه الساخن (T₁) اكبر من حرارة الوجه الأخر (T₂) وان هذه الدرجات ثابتة لا تتغير وكما موضح في الشكل (1-6).

الشكل (1-6) يوضح كيفية انتقال الحرارة من الوجه الساخن الى الوجه البارد عموديا على



الوجهين [47].

وفي هذه الحالة تنتقل الحرارة بمعدل ثابت من الوجه الساخن إلى الوجه البارد عموديا على الوجهين وان كمية الحرارة (Q) التي تنتقل في زمن معين (t) تتناسب طرديا مع الزمن (t) والمساحة (A) وفرق درجات الحرارة (T₁-T₂) وعكسيا مع السمك (d) [56].

$$Q = KA \frac{T_1 - T_2}{d} t \quad \dots\dots\dots(1.12)$$

حيث ان (K) ثابت يختلف باختلاف المادة ويسمى بالموصلية الحرارية أو معامل التوصيل الحراري ويمكن تعريفه بالشكل التالي هو كمية الحرارة التي تنتقل بالتوصيل في الثانية الواحدة من (1m²) من أحد وجهي شريحة متوازية سمكها (1m) والفرق في درجة الحرارة بين وجهيها (1°C) في الحالة الثابتة ووحدات (K) هي (w/m.°C) وتسمى الكمية $\frac{T_1 - T_2}{d}$

بالانحدار الحراري (Temperature Gradient) ، بصورة عامة تختلف طرائق قياس الموصلية الحرارية تبعا لنوع المادة وكما يلي :

1-تقاس الموصلية الحرارية لمادة جيدة التوصيل الحراري مثل النحاس باستخدام طريقة سيرل (Searle's Method) وتكون المادة على شكل قضبان.

2- تقاس الموصلية الحرارية لمادة رديئة التوصيل على شكل قرص مثل المواد اللدائنية باستخدام قرص لي (Lee's Disk Method) [47].
 إذ يتم حساب قيمة (K) من المعادلة التالية [59] :-

$$K\left(\frac{T_B - T_A}{d_s}\right) = e \left[T_A + \frac{2}{r} (d_A + \frac{1}{4} d_s) T_A + \frac{1}{2r} d_s T_B \right] \dots\dots (1.13)$$

حيث ان (e) تمثل كمية الطاقة الحرارية المارة عبر وحدة مساحة مادة القرص لكل ثانية (w/m².°C) وتحسب من العلاقة الآتية [59] :-

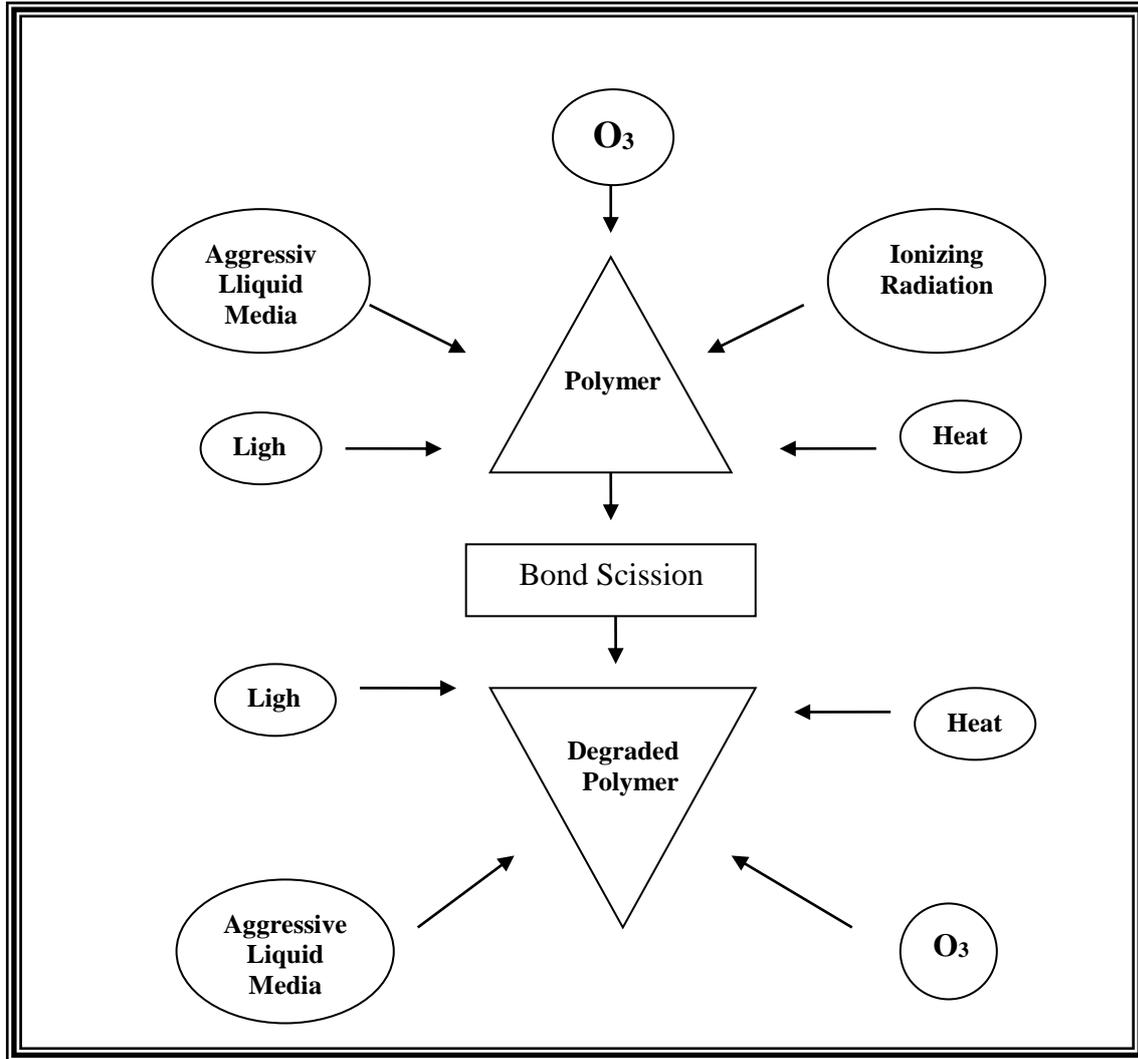
$$IV = \pi r^2 e (T_A + T_B) + 2\pi r e \left[d_A T_A + d_s \frac{1}{2} (T_A + T_B) + d_B T_B + d_C T_C \right] \dots (1.14)$$

حيث ان :

| | |
|---|--|
| (T _A , T _B , T _C) | : هي درجة حرارة القرص (A, B, C) على التوالي. |
| d | سمك القرص (mm) |
| d _s | سمك النموذج (mm) |
| r | نصف قطر القرص (mm) |
| I | التيار المار (Ampere) |
| V | الفولتية المجهزة (Volt) |

1-11 تأثير الظروف البيئية في الخواص الفيزيائية للبوليمرات (Effect of Environmental Conditions on Physical Properties of Polymers)

تعد البوليمرات ومنها المواد المترابطة من اكثر المواد عرضة للظروف الجوية المختلفة كاجزاء المباني او الطائرات واجزاء الصواريخ، كذلك القوارب وحاويات المياه الضخمة. لذا فان دراسة تأثير الظروف البيئية في خواص هذه المواد اصبح ضروريا لقياس مدى تحملها لهذه الظروف التي تمثل عوامل التحلل للمادة (Degradation) مثل الرطوبة والحرارة والضوء وكذلك الإشعاعات بأنواعها والتي تعمل على تكسر الأواصر الرابطة للبوليمر كما في الشكل (7-1) [31].



الشكل (1-7) يمثل عوامل التحلل في البوليمرات [31].

1-11-1 تأثير الأشعة فوق البنفسجية في خواص البوليمرات ومتراباتها

(Effect of Ultra – Violet on the Properties of Polymers and their Composites)

ان احد اهم الظروف التي لها تاثير سلبي في البوليمرات والمواد المترابكة المصنعة منها هي الاشعة فوق البنفسجية [Ultra-Violet Radiation (UV)] فبالرغم من ان نسبة قليلة هي التي تصل الى سطح الارض الا ان تأثيرها كبير على البوليمر ، فالطول الموجي للاشعة فوق البنفسجية يتراوح ما بين (180-400)nm وهو جزء من الطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic) الذي يؤثر ويشكل كبير في خواص البوليمر لان الاواصر التي تربط الذرات في السلسلة البوليمرية التي لها طاقة محددة لفك الارتباط فيما بينها تقع ضمن هذا المدى من الطيف [60] وتحصل عدة تغيرات كيميائية للبوليمر عندما يتعرض الى الاشعة فوق البنفسجية لينتج عنها مجموعة من العمليات المعقدة تتضمن تأثير اتحاد الاشعة فوق البنفسجية مع الاوكسجين ، واول هذه العمليات فك الارتباط (Bond Dissociation) الذي يحصل

بامتصاص المادة للأشعة فوق البنفسجية لينتج عنه تكسر للسلسلة البوليمرية أو تكسر يتبعه تشابك للسلسلة.

ان تكسر السلسلة البوليمرية يؤدي الى نقصان كبير في الوزن الجزيئي للبوليمر اما التفاعلات اللاحقة فتتضمن تأثير الأوكسجين لينتج عنها تشكيل مجاميع فعالة مثل الكاربونيل (C=O) او الكاربوكسيل (COOH) او البيروكسيد (O-O) .

ان التحلل الضوئي (Photo Degradation) الذي يحصل للبوليمر او متراكباته يكون باجزاء من المايكرون على الخواص السطحية للمادة الا اننا يمكن ان نلمسه بوضوح من خلال التفاوت الذي يحدث في الخواص الميكانيكية للمادة قبل تعرضها للإشعاع وبعده، فقد وجد ان المادة المشععة تفشل بمستويات من الاجهاد اقل من تلك المادة غير المشععة، بالإضافة الى التغيرات التي تحصل في تركيب البوليمر بعد تعرضه للإشعاع حيث يؤدي الى خلق مراكز ضعف (Weak Regions) داخل المادة البوليمرية [53] .

ان العيوب التي تحدث للبوليمر ومتراكباته بعد تعرضه للإشعاع يمكن ملاحظتها باستخدام مجاهر ذات قوة تكبير عالية كالمجهر الالكتروني، الا ان هنالك عيوباً تحصل للمادة يمكن ملاحظتها بالعين المجردة منها فقدان اللون، حصول تقشر في السطح، ظهور بعض النقر في السطح وحصول ضبابية على السطح، غالباً ما يستخدم طلاء جيلاتيني (Gel-Coat) لحماية المادة البوليمرية من تأثير الإشعاع، فبالرغم من ان هذا الطلاء هو مادة بوليمرية ايضاً الا انه يحمي البوليمر من التعرض المباشر لأشعة الشمس، اي ان هذه الطبقة الخارجية تكون واقية لحماية المادة البوليمرية فهي تتحلل ايضاً بعد التعرض الطويل للإشعاع، لذلك يجب ان تفحص بصورة دورية للتأكد من ان سطح المادة البوليمرية غير مرئي [60]، يمكن أن تستخدم مواد مضافة الى البوليمر تعرف بالمثبتات الضوئية (Photo Stabilizer) تعمل على امتصاص الأشعة فوق البنفسجية لغرض زيادة مقاومة البوليمر للإشعاع مثل اسود الكربون الذي يمنع التحلل الضوئي (بعملية ازالة الضوء) كما هو الحال في البولي اثلين المدعم بالكربون [4].

1-11-1-1 طرق تعرض المادة البوليمرية ومتراكباتها للأشعة فوق البنفسجية

(Methods of Exposure of Polymer Material and their Composites to UV Radiation)

إن اختبارات مقاومة المواد البوليمرية و متراكباتها للأشعة فوق البنفسجية تقسم الى ثلاثة انواع هي [60] :

1- اختبار خارجي (Real Time) Outdoor Testing

وهو الاختبار الذي تتعرض فيه العينات و بشكل مباشر و بزوايا محددة ثابتة الى الظروف الخارجية بصورة طبيعية لذلك يعرف بالتعرض للمحيط الطبيعي (Natural weathering) .

2- اختبار خارجي معجل (Accelerated Outdoor Testing)

وهو يشبه الاختبار السابق الا انه من خلاله يتم استخدام اجهزة خاصة تقوم بتركيز الأشعة فوق البنفسجية على عينة الاختبار .

3- اختبار معجل داخلي (Accelerated Laboratory Testing)

وهو الاختبار الذي تتعرض فيه العينات الى الأشعة فوق البنفسجية عن طريق استخدام جهاز خاص داخل المختبر يدعى بجهاز التجوية (Weathrometer) يحوي مصدراً ضوئياً

يقوم بتوليد هذا النوع من الأشعاع تحت درجة حرارة و رطوبة معينة ، كما يحوي أيضاً مرشحات (Filters) تقوم بالتخلص من الأطوال الموجية غير المرغوب بها اي التي تقع خارج مدى الأطوال الموجية للأشعة فوق البنفسجية و تسمى هذه الطريقة بالطريقة الصناعية (Artificial Weathering) .

الا ان الاختبارات الخاصة بالنوعين 1 و 2 تتأثر بشكل كبير بالتغيرات التي تحصل في درجة الحرارة و الرطوبة ، لان شدة الأشعة فوق البنفسجية تتغير بتغير موقع الاختبار الذي يتم فيه اجراء الاختبار و التقلبات التي تحصل في الطقس لذلك فان النتائج التي يتم الحصول عليها من مواقع وازمان مختلفة للتعرض للأشعاع بهذه الطرائق نادراً ما تكون مقبولة [61] .

اما الاختبار الخاص بالنوع الثالث فانه محاولة تعجيل الظروف الجوية الطبيعية (Accelerated Natural Weathering) اذ توضع العينات بجهاز خاص يولد ظروفاً قريبة من الظروف التي تتعرض لها المادة في اثناء الاستخدام و لكن بفترات زمنية اقل بكثير مما تتعرض لها لو وضعت في الاختبار الخارجي و هنالك اختلاف في التغير في خواص المادة المعرضة للأشعاع بتغير الجهاز المستخدم بتوليدها والاسباب ترجع الى [60] [61]:-

- 1- الاختلاف في طبيعة الأشعة الساقطة و شدة الاضاءة للمصدر الضوئي .
- 2- الاختلاف في نفاذية الأشعة فوق البنفسجية من المرشحات المستخدمة .
- 3- الأشعاع قد يكون غير منتظم في غرفة التجوية .

إن الأسباب المذكورة أعلاه تؤدي إلى اختلاف في نتائج الاختبار باختلاف الاجهزة المستخدمة و ايضا تختلف النتائج باستخدام نفس الجهاز و لكن بازمان تعريض مختلفة و لنفس النوع من العينات. إن الطريقة المختبرية المستخدمة لتوليد الأشعة فوق البنفسجية تحت درجة حرارة و رطوبة معينين تعطي عدداً من الساعات في اختبار التعجيل الذي يعادل عدداً من السنين في الظروف الخارجية وان عدد الساعات هذه هي التي تحدد عمر الخدمة (Service Life) للبوليمر او متراباته [61].

أما أحدث الاجهزة المستخدمة لهذت الغرض فهي الاجهزة التي تحدد جرعة الأشعة فوق البنفسجية الفعالة (Total Effective UV Dosage) وتمثل المقدار الحقيقي للأشعة فوق البنفسجية التي تؤدي الى حصول التفاعلات الكيميائية - الضوئية (Photo Chemical Reaction) داخل المادة، إي أنها تأخذ بنظر الاعتبار ليس جميع الأشعة الساقطة التي تمتص من قبل المادة [60].

2-11-1 تأثير الرطوبة في خواص البوليمرات و متراباتها

(Effect of Humidity on the Properties of Polymers and their Composites)

تعد ظاهرة تأثر المواد المترابكة ذات الأساس البوليمري بالأوساط المختلفة من المسائل المهمة تطبيقياً والتي جرت حولها دراسات عديدة لمعرفة مدى استقرارية المترابك في تلك الظروف البيئية ليتسنى استخدامه في مختلف التطبيقات الصناعية ، فقد جرت دراسات حول عمليات الانحلال بالعوامل الكيماوية وتأثيرها في الصفات المختلفة للبوليمر ومن اهم هذه العمليات هي [9] :-

1- التحلل المائي (Hydrolysis)

ان بعض التفاعلات البوليمرية غير المرغوب فيها احيانا تظهر نتيجة تعرض المادة البوليمرية الطويل للعوامل الجوية، فماء المطر الذي يندرج تحت مصادر الرطوبة في البنية البوليمرية علاوة على ذلك فان هذا المطر قد يصبح حامضيا من جراء الغازات الملوثة مثل

أكاسيد الكبريت و النتروجين والابخره الحامضيه مثل (HCl , H_2SO_4) التي تطلق الى الجو [62] اذن يتم التحلل المائي بواسطة الماء او محاليله الحامضيه او القاعديه او الملحيه .

2- التحلل الحامضي (Accident Analysis)

يحدث بتأثير الحوامض الكاربوكسيلية مكونا متراكبات ذات وزن جزئي واطيء ، وقد وجد بان درجة التحلل الحامضي والتحلل القاعدي تعتمد على كمية الحامض او القاعده المضافه [31] .

لكي يفهم تأثير الرطوبة في المادة المتراكبة البوليمريه يجب ان يفهم تأثيرها على ماده الاساس وعلى مادة التقويه المدعمه للماده الاساس عند غمر عينات من ماده المتراكبه في الماء فان هذا السائل يكون في حالة حركه مستمره حيث يتغلغل الماء الى داخل ماده المتراكبه بواسطة عملية الانتشار خلال مادة الاساس ثم بواسطة فعل الخاصيه الشعريه يمر الى السطح الفاصل بين مادة الاساس ومادة التقويه وبما ان ماده الاساس هي ماده بوليمريه نفاذه تمتص الماء ، تختلف قابلية البوليمر لامتصاص الماء باختلاف نوع البوليمر [56] .

إن أول تأثير للماء في ماده البوليمريه هو انتفاخ (Swelling) ماده ثم زياده في اللدونه (Plasticisation) وان تفاعل جزيئة الماء مع ماده الاساس يعتمد على تركيب هذه ماده لان جزيئة الماء ترتبط مع المجاميع الفعاله (Functional Groups) الموجوده في ماده البوليمريه [9].

ان الماء ايضا يؤثر في مادة التقويه المستخدمه في تدعيم ماده الاساس وان التأثير يعتمد على نوع هذه ماده .

إن احد العيوب الموجوده في ماده المتراكبه بعد تصنيعها هو وجود الفجوات (Voids) داخل ماده و عددها يؤثر في خواص ماده الفيزيائيه والميكانيكيه وهو يؤثر ايضا في نسبة امتصاص الماء [9] .

بعد امتصاص ماده المتراكبة للماء ولفترات زمنية طويله تعاني ماده الاساس فيها من ظاهرة الانتفاخ (Swelling) كما ذكرنا سابقا هذه الظاهره تخلق اجهادات داخل ماده علاوة على اجهادات متبقية بعد عملية المعالجه (Curing) ، مجموع هذه الاجهادات يؤدي الى حصول تضخم (Aneals) ماده المتراكبة وبالتالي تعاني ماده المتراكبه مشكلة تحطم (Degradation) الطبقات الداخليه (Inter Layer) ما بين ماده البوليمريه ومادة التقويه عند غمر هذه ماده ولفترات طويله في الماء [9]. وبذلك تتأثر الخواص الميكانيكيه والفيزيائيه للمواد المتراكبه مثل الشد والاستطاله ومعامل المرونه والتوصل الحراري بعامل الرطوبه.

3-11-1 تأثير درجة الحرارة في خواص البوليمرات ومتراكباتها

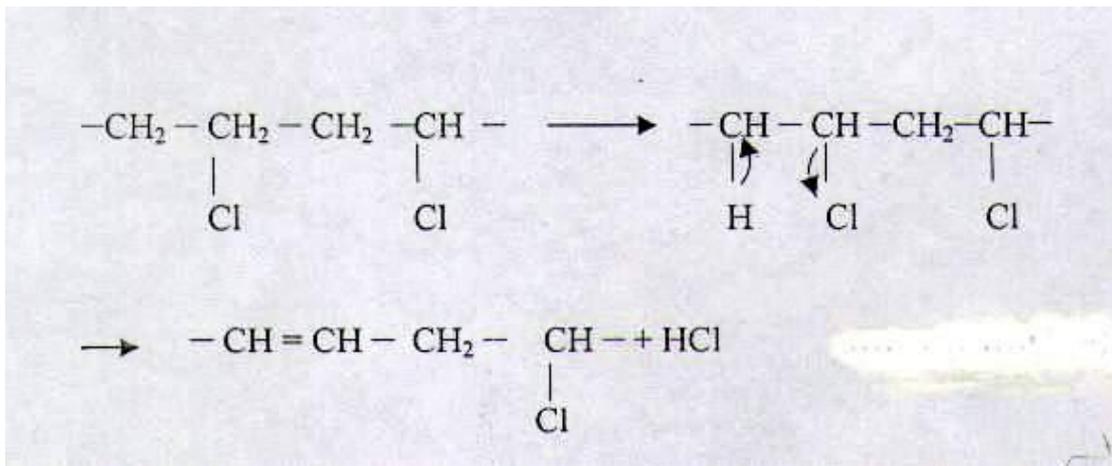
(Effect of Temperature on the Properties of Polymers and their Composites)

تسمى قابلية البوليمر لمقاومة الدرجات الحرارية العاليه بالثبات الحراري (Thermal Stability) وتعني الدرجة الحرارية التي يبدأ عندها البوليمر بتحريير غازات أو سوائل أو يغير من شكله او وزنه الجزيئي وتقسّم التغيرات الكيميائية التي يمر بها البوليمر عند الدرجات الحرارية العاليه الى نوعين رئيسيين هما [13][14] :-

1- التفاعلات التي تشمل كسر السلسلة الرئيسية في البوليمر .

2- التفاعلات التي يمر بها البوليمر مع احتفاظه بسلسلته الرئيسية.

فالنوع الأول يتم عندما يتعرض البوليمر لحرارة عالية فان الطاقة المتولدة عن الحركة الحرارية عند بعض نقاط النظام تعادل أو تزيد على طاقة الاواصر الكيميائية التي تربط ذرات



ويكون السحب من الاماكن المتجاورة وليس عشوائيا وتكون المخلفات ملونة دلالة على انها مواد غير مشبعة تتوزع فيها الاواصر المزدوجة بصورة متعاقبة ، وبذلك تتاثر الخواص الفيزيائية والميكانيكية للمتراكبات البوليمرية مثل قوة الشد والصلادة والاستطالة ومعامل التوصيل الحراري وغيرها بدرجات الحرارة العالية .

1-12 الدراسات السابقة (Literature Review)

نظراً لاستخدام البوليمرات المدعمة في العديد من الصناعات الهندسية و الكيماوية فان دراسة تأثير الظروف البيئية المختلفة في الخواص الميكانيكية و الحرارية لهذه المواد اصبحت ضرورية جداً لمعرفة مدى تحمل مثل هذه المواد لتلك الظروف التي اهمها الاشعة فوق البنفسجية والرطوبة ودرجات الحرارة العالية [9] . هنالك عدة ادبيات بحثية تطرقت الى دراسة تاثير الظروف البيئية على الخواص الميكانيكية و الحرارية للمواد المتراكبة اهمها :-

1- درس (Sanchez , Apadilla 1988) [64] تغيير الموصلية الحرارية لمادة البولي اثلين المحشى بانواع مختلفة من الرمال و محضرة بطريقة القولية بالكبس و قد ازدادت الموصلية الحرارية بزيادة نسبة الرمال بالأنموذج ، اذ ان الدقائق تمس احدهما الاخرى لتكون حلقات سلاسل جديدة و ذات موصلية عالية .

2- لاحظ (S.Briger 1989) [65] تغيير خاصية متانة الانحناء لعينات من الايبوكسي المدعم بالكرافيت تحت ظروف بيئية مختلفة ، و استنتج بأن متانة الانحناء تقل مع زيادة درجة الحرارة و الرطوبة.

3- قام (W.A. Soud 1994) [66] بدراسة الخواص الميكانيكية لمادة متراكبة من الايبوكسي المدعم باللياف النخيل و بنسب تدعيم مختلفة و تحت تأثير درجات حرارية مختلفة، حيث استنتج ان متانة الكسر تزداد بزيادة درجة الحرارة و بزيادة نسب التدعيم .

4- درس (Hoekstra and Breem 1995) [67] السلوك الميكانيكي لعينات البولي اثلين عالي الكثافة المنحل بتأثير الاشعة فوق البنفسجية فوجدا بأن متانة الكسر (Fracture toughness) ومقاومة الصدمة والوزن الجزيئي تتناقص بشكل كبير بينما تزداد الكثافة والتبلورية (Crystallinity) .

5- قام (D.Gardiner 1997) [68] بدراسة تأثير الظروف البيئية المختلفة على صفائح من مادة البولي فينول كلورايد (PVC) المستخدمة في تطبيقات الهندسة المدنية واستنتج بأن تأثير الاشعة فوق البنفسجية و الحرارة والرطوبة مع بعضها في تحلل البوليمر اكثر من تأثير الاشعة فوق البنفسجية بمفردها على التحلل.

- 6- درس (Hoekstra and Spoormaker 1997) [69] السلوك الميكانيكي لنوعين من البولي اثلين عالي الكثافة المستقر و غير المستقر بعد تعريضه للأشعة فوق البنفسجية كدالة لزمن التعرض فوجدا بان فشل الانفعال (Strain at Failure) يقل بزيادة زمن التعرض لكن بعد (14) يوماً لوحظ ان فشل الانفعال يصبح اقل من الانفعال عند نقطة الخضوع و من ثم يفشل النموذج ليصبح هشاً ، اما فشل الاجهاد (Stress at Failure) فانه يزداد في البداية و في نهاية الامر يقل بزيادة زمن التعرض .
- 7- لاحظ (C.Dubois 1999) [70] تأثير الاشعة فوق البنفسجية في مادة الايبوكسي المدعم بألياف الزجاج و بشكل طبقات ، و استنتج بان زيادة فترة التعرض للأشعة فوق البنفسجية تؤدي الى تحلل مادة الاساس البوليمرية ، و استنتج ايضاً انه بعد التعرض لـ 2000 ساعة من الاشعاع ان المادة المتراكبة فقدت حوالي 1% من سمكها الاصلي .
- 8- درس (A.Johnson 1999) [71] تأثير الظروف البيئية في خواص البولي اثلين و البولي بروبيلين قبل وبعد تدعيمه بألياف السليلوز و استنتج بان إضافة الالياف الى البولي اثلين و البولي بروبيلين لغرض تدعيمه اعطى مقاومة أكثر للظروف البيئية .
- 9- قام (M .Medhat and B.M. Deya 2000) [72] بدراسة حول تأثير الحرارة والرطوبة و الاشعاع في الخواص الميكانيكية و الحرارية للفينيل استر قبل و بعد تدعيمه بألياف الزجاج مرة و الياف الكربون مرة ثانية و بعد ذلك استنتج بان الحرارة و الرطوبة و الاشعاع تؤثر سلباً في الخواص الميكانيكية كمتانة الانحناء و الصلابة و لجميع النماذج.
- 10- لاحظ (N.Peethambaran 2000) [73] وجماعته تأثير الاشعة فوق البنفسجية لفترات زمنية (24,48,96) ساعة في الخواص الفيزيائية للخيوط المصنوعة من عصارة المطاط الطبيعي (Natural Rubber Latex Thread) فوجدوا بان الاشعة فوق البنفسجية تسبب تلفاً مهماً في قوة الشد للمطاط الطبيعي.
- 11- قام (S.Ulutan and M.Jilbert 2000) [74] بدراسة تأثير المائتات مثل مركبات هيدروكسيد المغنيسيوم في الخواص الميكانيكية لبولي اثلين عالي الكثافة فوجدوا بان تأثير هذه المائتات يزيد من قوة الشد و الالتواء لبولي اثلين عالي الكثافة بينما تقل استطالته.
- 12- قام (B.Chum and J.Kim 2000) [75] بدراسة تأثير اضافة بولي اثلين عالي الكثافة الى مزيج من بولي بروبيلين و اثلين بروبيلين فوجدوا عند تغيير درجة الحرارة من (30) °C إلى (60) °C سيزيد من قوة التصادم و المرونة للمزيج بعد الاضافة عما هي عليه قبل الاضافة .
- 13- درس (W.Shisan and Z.Jun 2003) [76] الخواص التركيبية لبولي اثلين عالي الكثافة المنشط بواسطة الاشعة فوق البنفسجية بشدد ضوئية مختلفة في الهواء فوجدا بان المجاميع الحاوية على الاوكسجين مثل الكاربونيل (C = O) و الايثر (C-O) قد ادخلت على جزيئات سلسلة البولي اثلين عالي الكثافة بعد التشعيع , وان درجة حرارة الانصهار و مقاومة الصدمة لبولي اثلين عالي الكثافة قد قلت بينما ازداد التبلور (Crystalline) .

1-13 هدف البحث (The Aim of the Project)

يهدف البحث إلى دراسة تأثير الظروف البيئية (الاشعة فوق البنفسجية و الرطوبة و درجة الحرارة) في نماذج من انابيب البولي اثلين عالي الكثافة المدعم باسود الكربون و المستخدمة في ري الاراضي الزراعية من خلال دراسة تأثير الخصائص الميكانيكية و الحرارية لهذه النماذج لاختيار افضلها ملائمة للظروف البيئية العراقية .

الفصل الثاني (Chapter Two) الجزء العملي (Practical Part)

2-1 المواد المستخدمة (Materials)

تم استخدام أنابيب بلاستيكية مصنوعة من مادة البولي أثلين عالي الكثافة المدعم بمسحوق اسود الكربون بنسبة 2.5wt% بطول (1m) وقطر (110mm) وسمك (6-7mm) حيث تم أخذ (4) نماذج قيد الدراسة من مناشئ مختلفة و لها المواصفات التالية المبينة في الجدول (2-1) .

الجدول (2-1) يبين منشأ وكثافة حبيبات البولي أثلين عالي الكثافة الداخلة في صناعة الانابيب البلاستيكية قيد الدراسة.

| النماذج | منشأ حبيبات البولي أثلين عالي الكثافة | الشركة المجهزة لحبيبات البولي أثلين عالي الكثافة | الكثافة g/cm ³ |
|---------|---------------------------------------|--|---------------------------|
| 1 | بلجيكي | Spectra | 0.955 |
| 2 | دانماركي | Lacqtene | 0.950 |
| 3 | فرنسي | Borealis | 0.952 |
| 4 | اماراتي | Brouge | 0.945 |

لقد تم تصنيع هذه الانابيب في الشركة العامة للصناعات الميكانيكية في الاسكندرية بطريقة البثق كما هو مذكور في البند (1-8-4-1) .

2-2 تحضير العينات (Specimens Preparation)

تم تقطيع الأنابيب البلاستيكية الخاضعة للأختبار والعائدة للشركة العامة للصناعات الميكانيكية في الاسكندرية إلى عدة عينات قياسية لأجراء الفحوصات الميكانيكية والحرارية عليها، ان عملية تقطيع وتهيئة هذه العينات تمت في ورشة معامل الجامعة التكنولوجية وحسب المواصفات القياسية العالمية (ISO, ASTM) والجدول الآتي يستعرض المواصفات القياسية العالمية للعينات الخاصة بالاختبارات والتي تم إجراؤها [77] :-

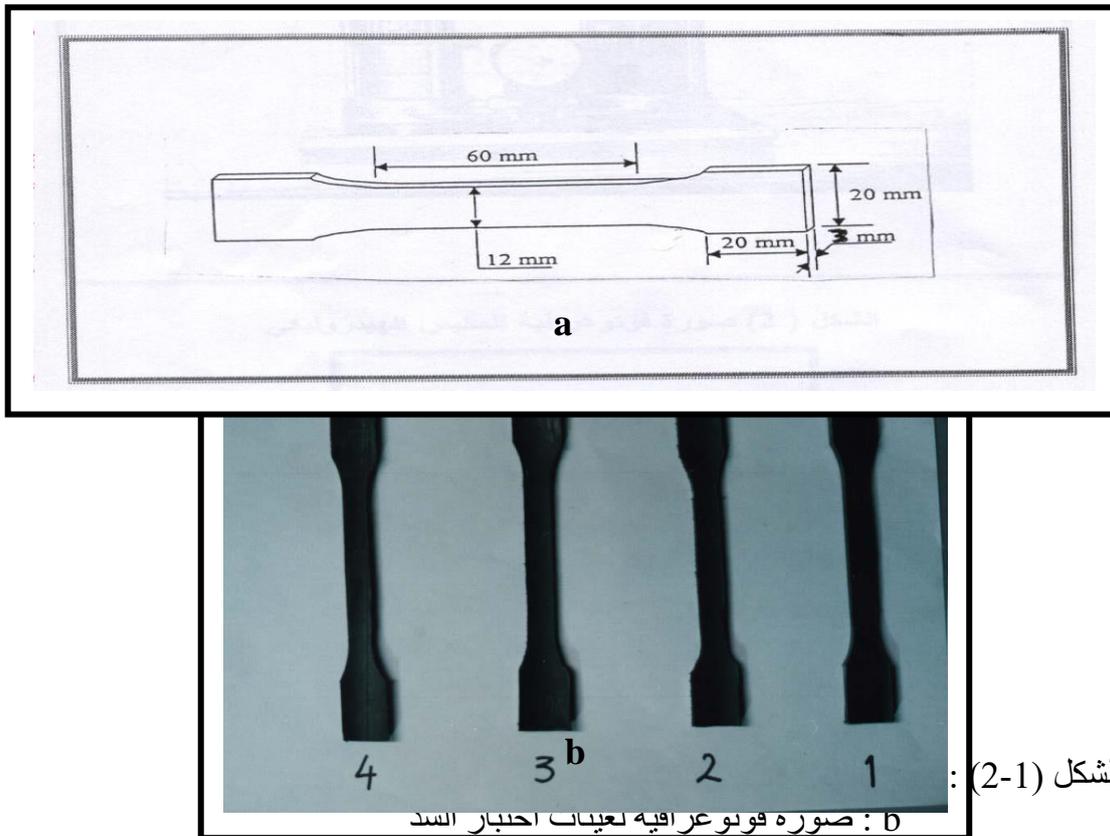
الجدول (2-2) يستعرض المواصفات القياسية للعينات الخاصة بالاختبارات التي تم إجراؤها [77].

| ت | نوع العينات | المواصفات القياسية |
|---|--|--------------------|
| 1 | عينات اختبار الشد | ANSI/ASTM-D638 |
| 2 | عينات اختبار الانحناء و متانة الانحناء | ANSI/ASTM-D790 |

| الجزء | | |
|---|--------------------------------|---|
| ISO-179 | عينات اختبار الصدمة | 3 |
| ASTM-E10 | عينات اختبار الصلادة | 4 |
| ASTM-D695 | عينات اختبار الانضغاطية | 5 |
| حسب نوع الجهاز المستخدم اذ لكل جهاز زحف مواصفات خاصة به | عينات اختبار الزحف | 6 |
| تلائم اختبار قرص لي (Lee's Disc) | عينات اختبار الموصلية الحرارية | 7 |

2-2-1 عينات اختبار الشد (Tensile Test Specimens)

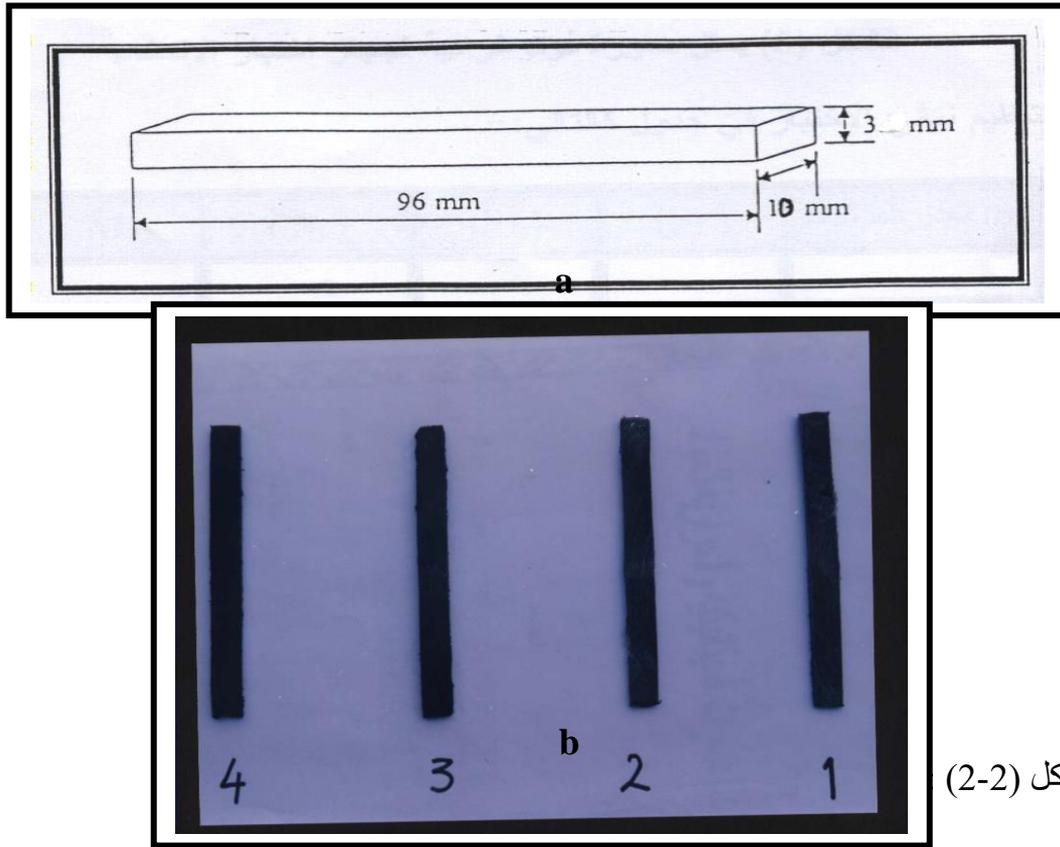
تم تقطيع عينات الشد حسب المواصفات القياسية العالمية (ANSI / ASTM - D638) كما هو موضح في الشكل (2-1).



2-2-2 عينات اختباري الانحناء و متانة الانحناء

(Flexural Strength and Bending Tests Specimens)

تم تقطيع عينات هذين الاختبارين بشكل متوازي المستطيلات و بأبعاد معينة بحيث تحقق النسبة بين طول العينة الى سمكها (Span To Depth Ration) والتي هي (1: 32) وذلك حسب المواصفات القياسية العالمية (ANSI/ASTM-D790) وبذلك أصبحت هذه العينات ذات ابعاد (96mm) طولاً و (10 mm) عرضاً و (3 mm) سمكاً و كما هو موضح في الشكل (2-2).

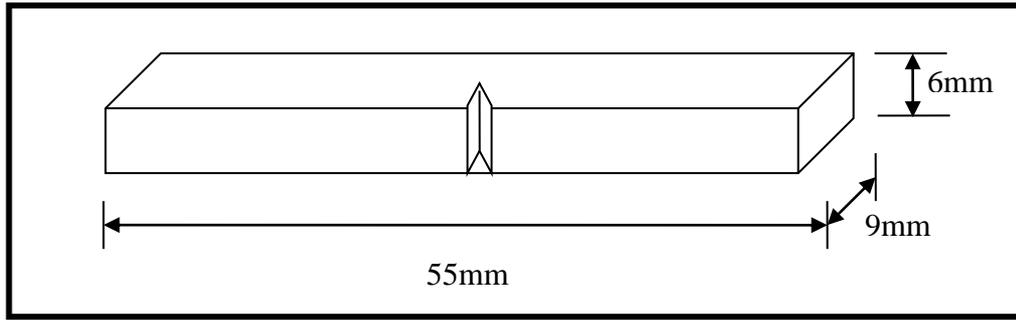


الشكل (2-2)

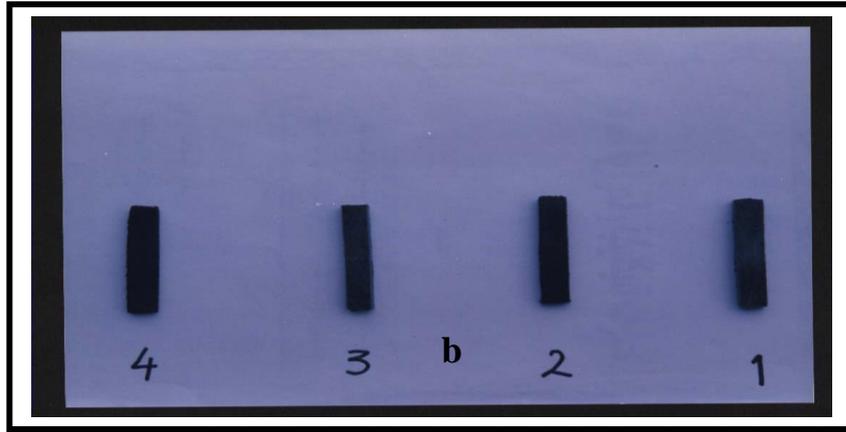
2-2-3 عينات اختبار الصدمة

(Impact Test Specimens)

تم تقطيع عينات اختبار الصدمة بشكل متوازي المستطيلات و بأبعاد معينة وذلك حسب المواصفات القياسية العالمية (ISO-197) والذي يشترط فيه ان تكون نسبة العرض الى السمك هي كنسبة (2: 3) في النموذج وبذلك أصبحت عينات اختبار الصدمة ذات ابعاد (55mm) طولاً و (9mm) عرضاً و (6mm) سمكاً و باستخدام جهاز التحزيز (Notching Machine) تم عمل حروز لجميع العينات بشكل حرف (V) و بعمق (1mm) و كما هو موضح في الشكل (2-3).



a

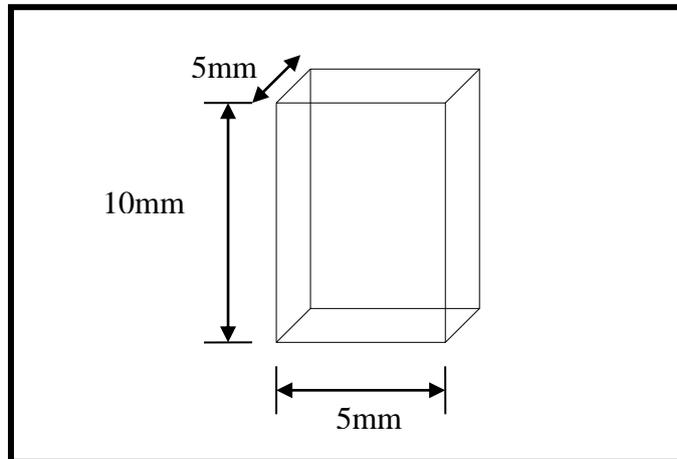


الشكل (2-3) : (a) يوضح الشكل الهندسي لعينة اختبار الصدمة. صورة فوتوغرافية لعينات اختبار الصدمة.

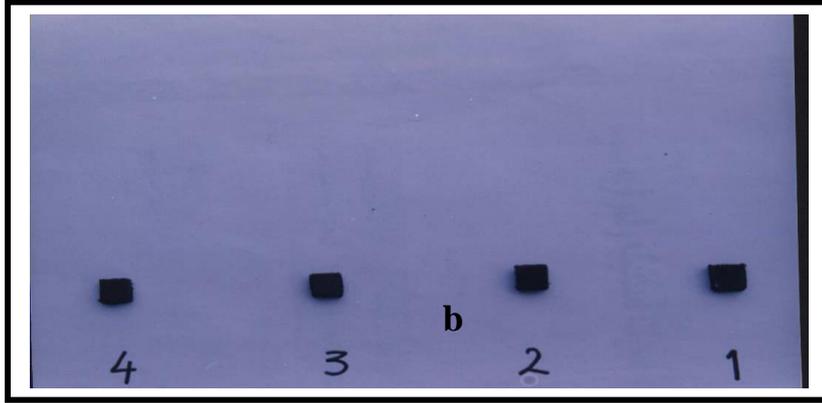
2-2-4 عينات اختبار الانضغاط

(Compression Test Specimens)

تم تقطيع عينات اختبار الانضغاط بأبعاد قياسية وذلك حسب المواصفات القياسية العالمية (ASTM- D695) بحيث يكون طول العينة ضعف عرضها لتحقيق النسبة (2 : 1) علماً بأن (عرض العينة و سمكها) متساويان وبذلك أصبحت عينات اختبار الانضغاط ذات ابعاد (10mm) طولاً و (5mm) عرضاً و (5mm) سمكاً وكما هو موضح في الشكل (2-4).



a

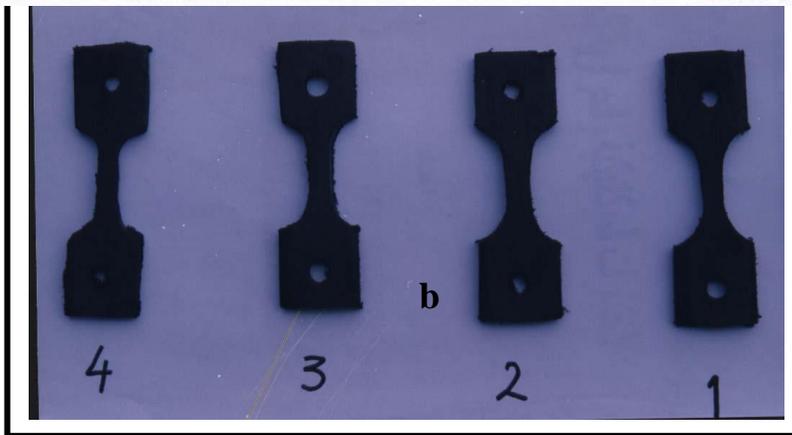
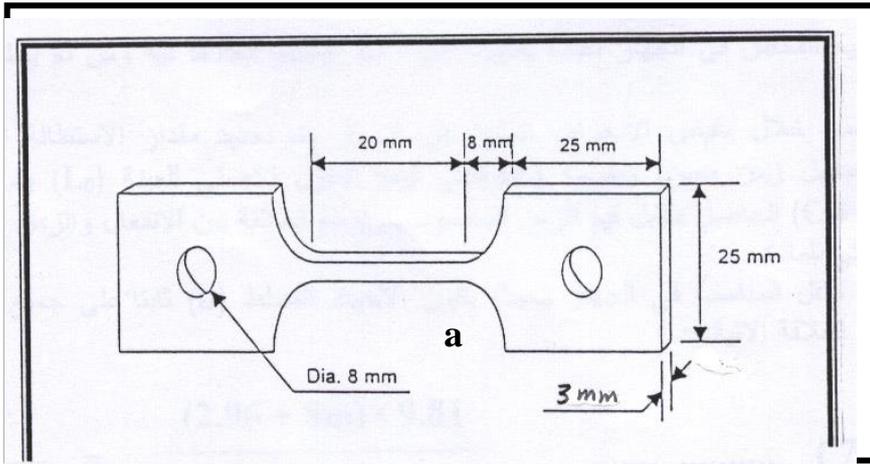


الشكل (2-4) : (b) صورة فوتوغرافية لعينات اختبار الانضغاط.

2-2-5 عينات اختبار الزحف

(Creep Test Specimens)

تم تقطيع عينات اختبار الزحف بشكل متوازي المستطيلات وبأبعاد مختلفة طبقاً لنوع الجهاز المستخدم في الاختبار اذ ان لكل جهاز زحف مواصفات خاصة به وكانت الابعاد القياسية لعينة الاختبار هي بطول (86mm) وعرض (25mm) وسمك (3mm) لتلائم الجهاز المستخدم وكما هو موضح في الشكل (2-5).

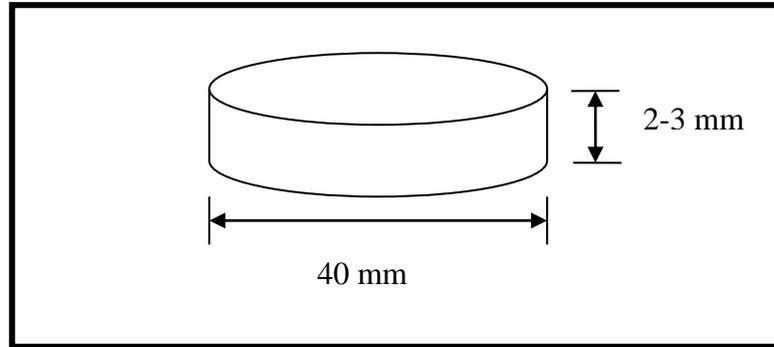


الشكل (2-5) : (a) (b)

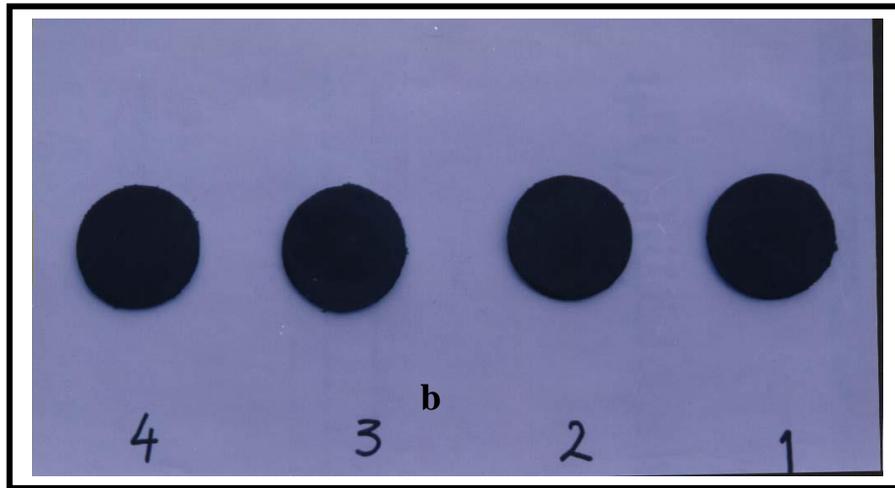
2-2-6 عينات اختبار الموصلية الحرارية :

(Thermal Conductivity Test Specimens)

تم تقطيع عينات اختبار الموصلية الحرارية على شكل اقراص دائرية بقطر (40mm) وسمك يتراوح بين (2-3mm) لكي تلائم اختبار قرص لي وكما موضح في الشكل (2-6).



a



الشكل (2-6) (a) يوضح الشكل الهندسي لعينة اختبار الموصلية الحرارية، وصوره فوتوغرافية لعينات اختبار الموصلية الحرارية. (b)

2-3 الأجهزة المستخدمة (Instruments)

فيما يلي نستعرض مجموعة من الاجهزة الخاصة بالاختبارات الميكانيكية والحرارية المستخدمة في الدراسة وطريقة الفحص فيها :-

2-3-1 جهاز اختبار الشد (Tensile Test Instrument)

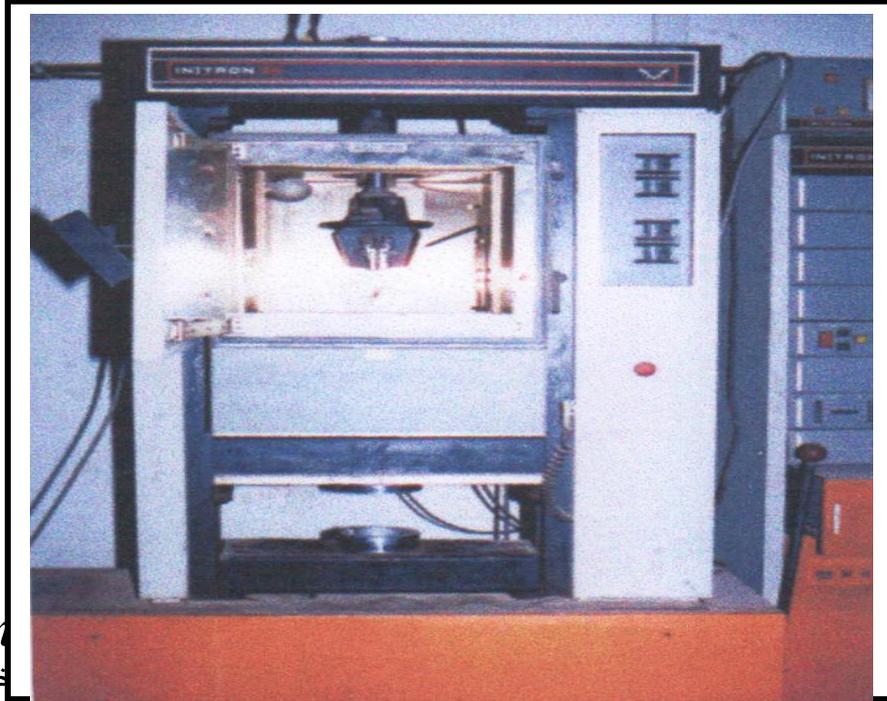
تم استخدام جهاز قياس خصائص الشد نوع (Intstron 1195 Tensile Test) المصنع من شركة (Instron) وكما مبين في الشكل (2-7) لغرض اجراء اختبار الشد للعينات المحضرة لهذا الفحص والتي تم قياس ابعادها قبل وضعها في الجهاز .

أما تقنية الفحص فتتم بتنصيب العينة في الجهاز بمعدل حمل مقداره (5KN) وبسرعة شد مقدارها (10mm/min) ومن خلال مقياس الجهاز تم قراءة اقصى حمل يتحملة النموذج ومن ثم حساب متانة الشد القصوى (UTS) (Ultimate Tensile Strength) للنماذج نفسها باستخدام المعادلة التالية [78] :-

$$UTS = \frac{F_{max}}{A} \dots\dots\dots(2-1)$$

حيث ان :

F_{max} أقصى حمل يتحمله النموذج (N).
 A مساحة المقطع العرضي للنموذج (m^2).

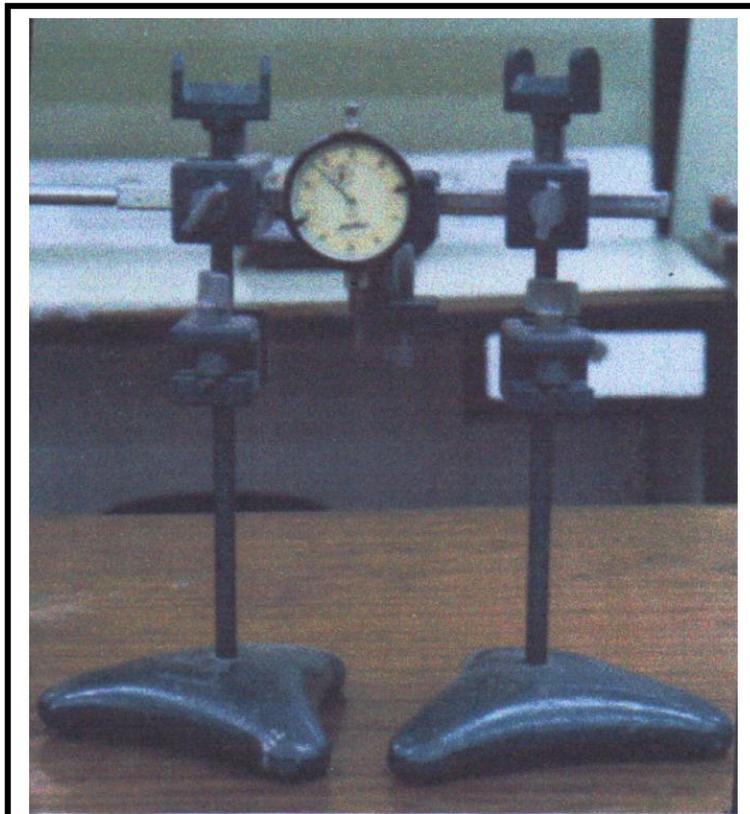


2-3-2

(Ben

تخدم الجهاز

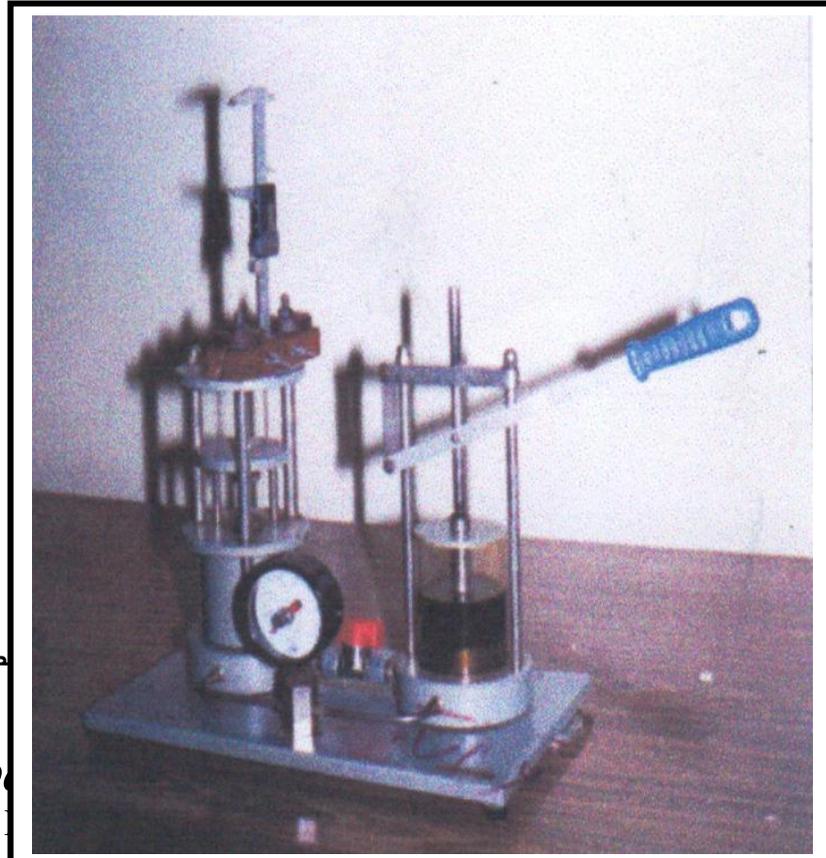
المبين في الشكل (2-8) والمصنع من شركة (Phywe) الالمانية والذي تثبت فيه العينة من طرفيها على مرتكزين وتعلق الكتل (Loads) بصورة تدريجية على الحامل المثبت عند منتصف العينة مما يسبب انحناءها تدريجياً و من خلال مؤشر مقياس الانحراف يمكن قراءة مقدار الانحراف (Deflection) الحاصل للعينة ذات الابعاد المعلومة وبتطبيق المعادلة (1.5) يتم حساب معامل المرونة لجميع النماذج قبل التعريض لظروف التجوية وبعدها .



الشكل (2-8) يبين جهاز اختبار الانحناء .

2-3-3 جهاز اختباري متانة الانحناء و الانضغاط : (Flexural Strength and Compression Tests Instrument)

تم إجراء الاختبار الثلاثي النقاط باستخدام المكبس الهيدروليكي والموضح في الشكل (9-2) لغرض حساب متانة الانحناء لجميع النماذج وفي الظروف المختلفة السابقة الذكر ويتم ذلك بتسليط الحمل بصورة تدريجية بالرأس المدبب عند منتصف العينة المثبتة من طرفيها على مرتكزين ويستمر تسليط الحمل حتى يحصل الكسر او الفشل للعينة، ويتم حساب متانة الانحناء بتطبيق المعادلة (1.4) اما اختبار الانضغاط فيتم باستخدام المكبس الهيدروليكي نفسه بعد رفع اداة الغرز منه ويتم تسليط الحمل بصورة تدريجية حتى حصول الفشل للعينة حيث يمثل اقصى حمل مسلط عليها ويتم حساب مقاومة الانضغاط القصوى لها بتطبيق المعادلة (1.1) .



الانحناء).

الشكل (9-2)

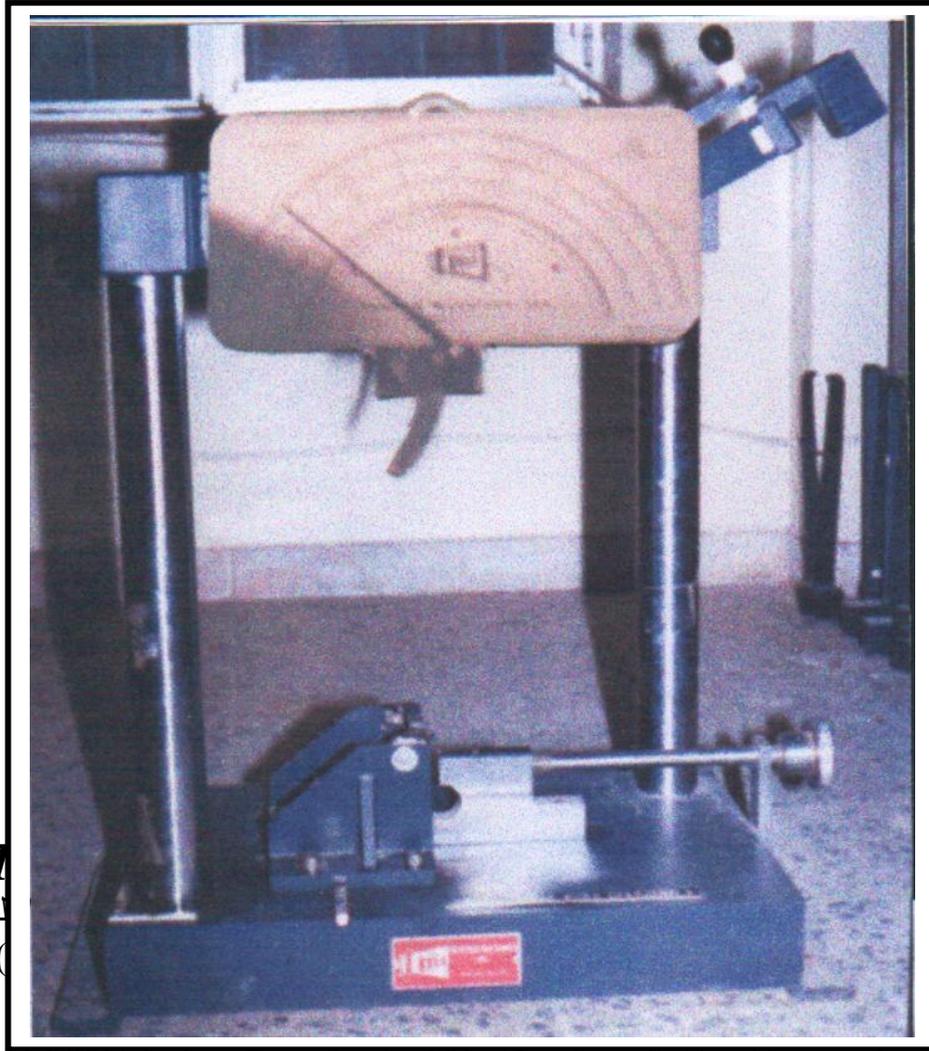
2-3-4

(Imp
(Charpy

لغرض حساب متانة الفحص في جهاز جاري فتتم برفع المطرقة إلى أقصى ارتفاع وتثبيتها جيداً وبعد ذلك يتم تسليط الحمل بصورة تدريجية على العينة المثبتة على المرتكزين ويتم حساب الطاقة التي تتحول وبعده.

اما تقنية الفحص في جهاز جاري فتتم برفع المطرقة إلى أقصى ارتفاع وتثبيتها جيداً ثم توضع العينة في الموقع المخصص لها وكما هو موضح في الشكل (2-10)، وبعد تصفير مقياس الطاقة يتم تحرير البندول باستخدام العتلة المثبتة على المقياس وبحركة تأرجحيه تتحول

الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية يفقد جزء منها في كسر العينة فيقرأ مؤشر المقياس قيمة طاقة الكسر للعينة ثم يتم حساب قيمة مقاومة الصدمة بتطبيق المعادلة (1.9).

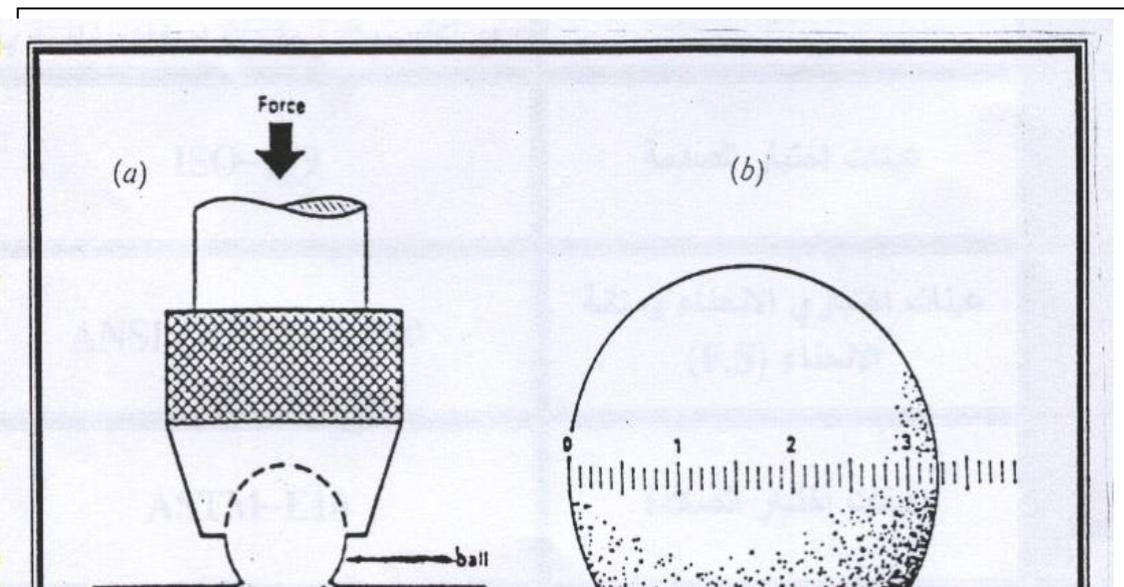


2-3-5

(H
المكبس
وهي

الهيدرو
عبارة عن

(15s) فيحصل غرز عند سطح العينة بواسطة اداة الغرز ويقاس قطر الاثر الدائري (Circular Indentation) عند سطح العينة بعد ازالة الحمل باتجاهين عند زوايا قائمة ثم يؤخذ معدل القطر وكما موضع في الشكل (2-11) وبعد ذلك تحسب صلادة برينل بتطبيق المعادلة (1.10)



الشكل (11- 2) تمثل اختيار صلادة برينل (65) :-
 (a) مخطط لطريقة اختبار برينل
 (b) اثر برينل مع تدرج المقياس بالمليمترات

2-3-6 جهاز اختبار الزحف

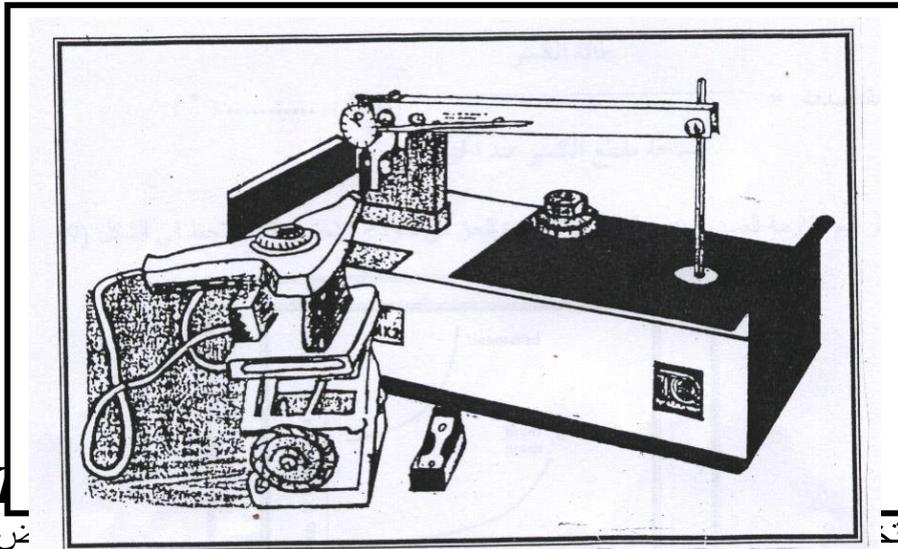
(Creep Test Instrument)

استخدم جهاز اختبار الزحف نوع (SM 106 MK II TQ) لفحص النماذج تحت اجهاد ثابت بمقدار (8.08 MPa) قبل التعريض لظروف التجوية السابقة الذكر وبعده وكما موضع في الشكل (2-12)، بعد تثبيت النموذج في الجهاز تم تعليق الثقل المناسب ليكون الاجهاد (σ) ثابتاً على جميع النماذج باستخدام العلاقة الآتية [52] :-

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{(2.96 + 8M) * 9.81}{A} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

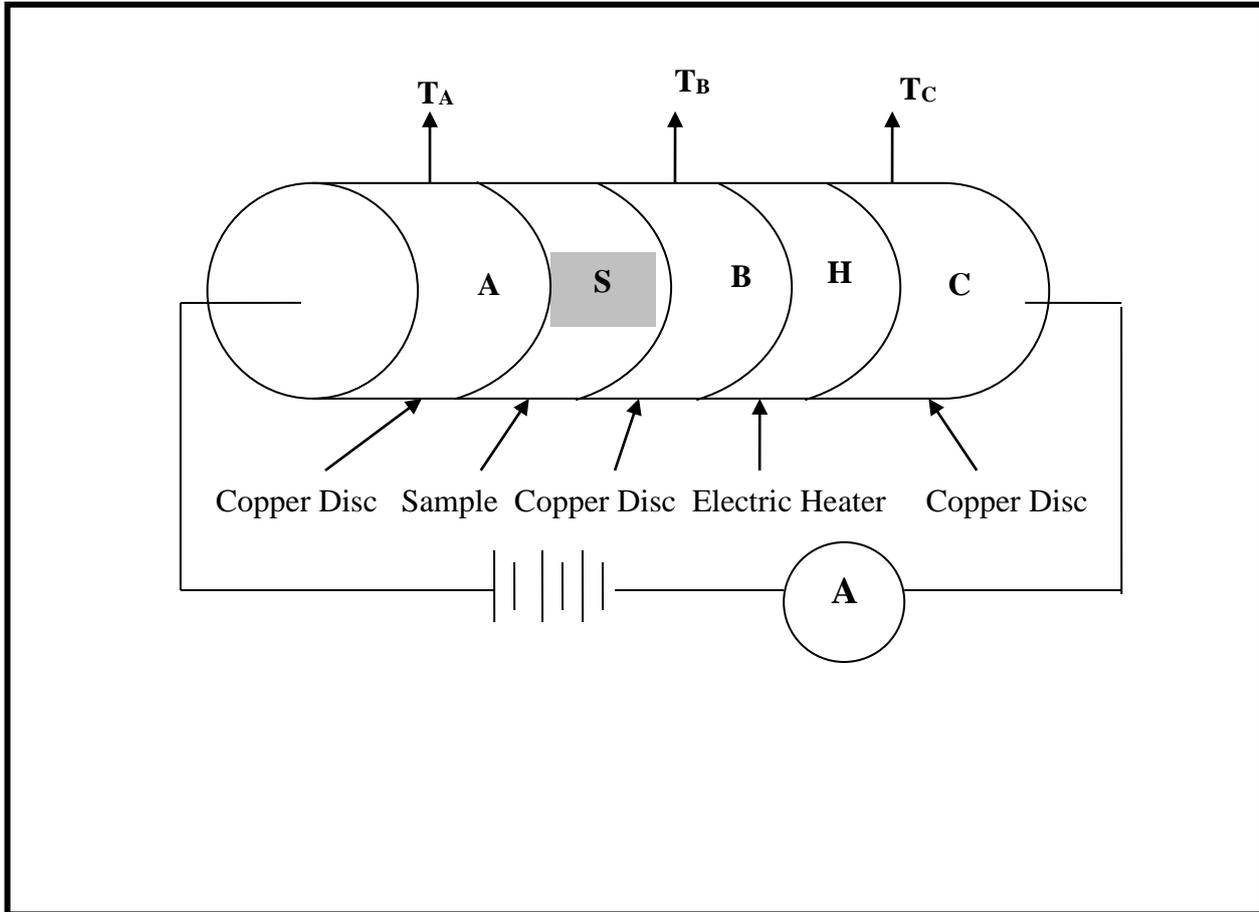
حيث ان :-

2.96 ثابت خاص بالجهاز المستخدم في الفحص
 F مقدار القوة المسلطة على النموذج (N)
 M الكتلة المسلطة على النموذج (kg) وتشمل (كتلة كل من الثقل المعلق والذراع والحامل والدبابيس الاربعة التابعة للجهاز) .
 A مساحة المقطع العرضي للنموذج (m²)
 من خلال مقياس الانحراف المثبت في الجهاز تم تحديد مقدار الاستطالة الحاصلة للعينة (ΔL) مقابل زمن معين وبقسمة (ΔL) على قيمة ضعف الطول الأصلي (2L₀) يتم حساب مقدار الانفعال (ε) الحاصل مقابل قيم الزمن المحسوب ثم ترسم العلاقة بين الانفعال والزمن وبين لوغاريتم الانفعال ولوغاريتم الزمن لحساب معدل وثابت الزحف (k) على التوالي.

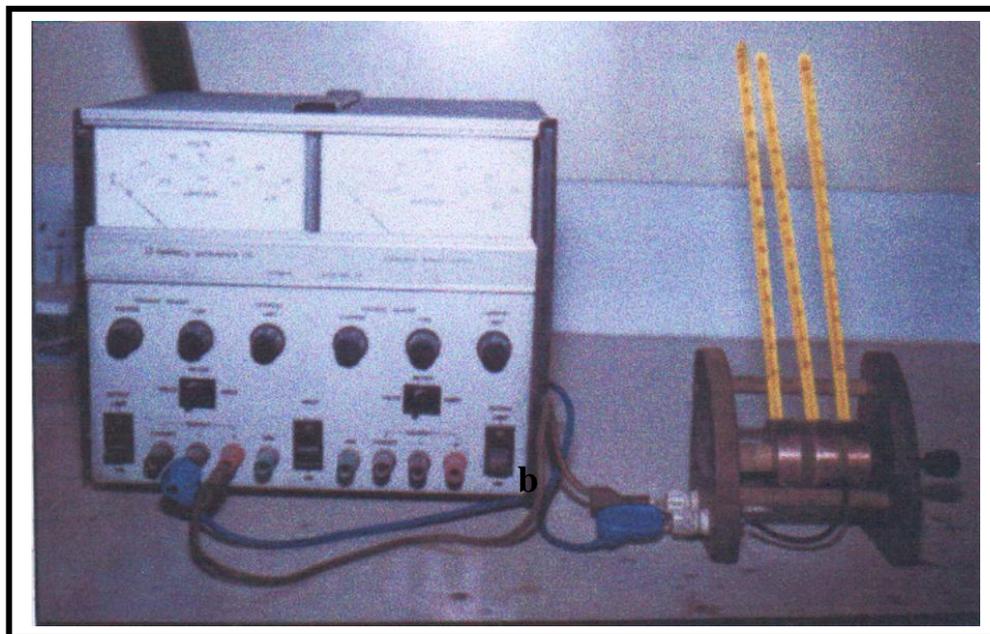


استخدم
 معامل الوصين الحراري لجميع السمادج وحما موصح في اسس (15- 2)، وبه يتم انتقال الحرارة من المسخن الى القرص الذي يليه حتى يصل الى القرص الاخير وبالإمكان تحديد
 من حساب

درجة حرارة الاقراص الثلاثة (T_A, T_B, T_C) باستخدام المحارير الموضوعية داخلها ومن الضروري التأكد من نظافة سطوح الاقراص المصنوعة من النحاس وان تكون متماسة بصورة جيدة للحصول على افضل انتقال للحرارة عبرها ويحسب معامل التوصيل الحراري (K) للنماذج بتطبيق المعادلتين (1.13) و (1.14) .



a



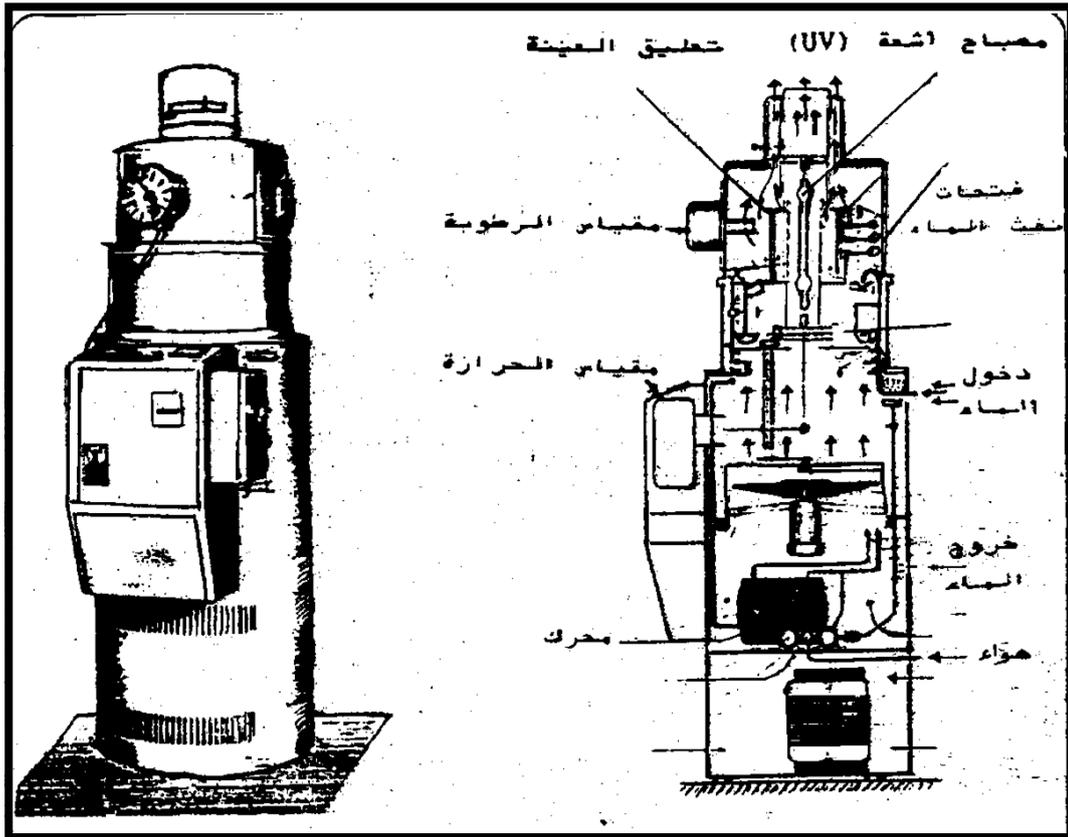
b

الشكل

(b) صورة فوتوغرافية لجهاز اختبار الموصلية الحرارية.

2-3-8 جهاز التجوية (Weatherometer)

استخدم جهاز التجوية الخاص بتشجيع النماذج بالأشعة فوق البنفسجية من نوع (HANAU) المبنية اجزاؤها في الشكل (2-14) (Xenotest 150 Light and) (Weatherfastness Tester) حيث عرضت النماذج الى مصدر ضوئي من نوع (Xenotest 150) وهو احد مصادر مصابيح الزينون بشدة (2.3 W/m^2) وبطول موجي (320 nm) علماً ان العمر الزمني (Time Age) لمثل هذا المصدر تصل الى (1000) ساعة [31] وهو من المصادر الشائعة للأشعة فوق البنفسجية التي تشكل احد اهم العوامل المؤثرة في البوليمرات بانواعها مع ان كمية الاشعاعات تتأثر بعمر المصباح ونوعيته [60] علاوة على ان مقياس الرطوبة الملحق بالجهاز يمكن ان يسجل قراءات مختلفة وتراوحت هذه القراءات بين (R.H. 40-65%) وكذلك هنالك مقياس للحرارة يبين درجة حرارة الحيز الموضوع فيه النماذج ويمكن السيطرة على درجة الحرارة من خلال فتحة موجودة في اعلى الجهاز، هذا وقد عرضت النماذج كافة للأشعاع وبأزمان مختلفة (100,200,300) ساعة لدراسة تأثير الاشعة فوق البنفسجية على الخواص التي سبق ذكرها.



الشكل (2-14) يبين جهاز التجوية المستخدم

2-3-9 الفرن الحراري (Oven)

ان الوسيلة التي تم اتباعها في الحصول على درجة حرارة الاختبار المطلوب بغية اجراء الفحوصات السابقة الذكر هي باستخدام فرن نوع (Memert) الذي يمكن أن تصل درجة

الحرارة داخله الى 120°C كأقصى حد له، وعليه تم الشروع بوضع جميع النماذج المستخدمة في تلك الفحوصات داخل الفرن مع مراعاة تثبيت درجة حرارة الاختبار المطلوبة والتي تمثلت بدرجة 23°C و 40°C و 55°C ولمدة ساعة واحدة في كل حالة لضمان امتصاص النماذج للموجات الكهرومغناطيسية الحاملة للطاقة الحرارية والمنبعثة من الفرن بشكل كافٍ من اجل الوصول الى حالة الاتزان الحراري مع المحيط والذي عليه يترتب ظهور اثار الحرارة في النماذج قيد الدراسة.

2-4 تقنية امتصاص الماء

(Water Absorption Technique)

لغرض دراسة تأثير الرطوبة في الخواص الميكانيكية والحرارية السابقة الذكر تم تحضير قناني زجاجية نظيفة مملوءة بماء السقي وغمرت فيها جميع النماذج الخاضعة للاختبار وبدرجة حرارة المختبر 23°C مع مراعاة غلق فوهات القناني بشكل محكم للحد من ظاهرة تبخر الماء وبعد مرور فترات زمنية مختلفة (4 , 8 , 12) اسبوعا على التوالي ثم استخراج النماذج المطلوبة للفحص باستخدام ملقط خاص لدراسة مدى تأثير الرطوبة في الخواص السابقة الذكر.

الفصل الثالث

Chapter Three

النتائج والمناقشة

Results and Discussion

يتضمن هذا الفصل النتائج التي تم التوصل إليها في الدراسة الحالية مع مناقشتها، وقد تم إيضاحها بالأشكال البيانية الخاصة بكل حالة ولجميع الاختبارات الميكانيكية والحرارية.

3-1 اختبار الشد (Tensile Test)

لوحظ أن انفعال المتراكبات الدقائكية عند اختبار الشد يعتمد على ثلاثة عناصر أساسية مهمة هي المادة الأساس والدقائق والسطح البيني (Interface) إذ تبين أن تأثير السطح البيني هو الأكبر، مقارنة مع باقي العناصر الأخرى، ويعود ذلك إلى انتقال الإجهاد من المادة الأساس البوليمرية إلى مادة التقوية الدقائكية ويتم هذا عن طريق السطح البيني الفاصل بينهما، حيث تكون حالة السطح البيني لها عدة احتمالات منها إذا كان عدم وجود تلاحق جيد بين المادة الأساس ومادة التقوية وسوف تتصرف مادة التقوية (الحبيبات) كأنها فجوات موجودة داخل المادة الأساس أي لا ينتقل أي إجهاد من المادة الأساس عبر السطح البيني إلى مادة التقوية، والاحتمال الآخر هو عند وجود ترابط أيوني بين المادة الأساس ومادة التقوية، فإن الإجهاد ينتقل إلى مادة التقوية الحبيبية عبر السطح البيني وبذلك سوف تتحمل الحبيبات جزء من هذا الإجهاد المسلط، وكذلك الحالة عند وجود تفاعل بين المادة الأساس ومادة التقوية الحبيبية أي وجود عامل ثالث في السطح البيني حيث يكون هذا الترابط هو الأقوى من نوعه في تحمل المادة المترابطة لأجهاد الشد حيث أن مادة التقوية ستتحمل الجزء الأكبر من الأجهاد المسلط [79] نستنتج من ذلك أن وجود الحبيبات الفائقة الدقة في حجمها الحبيبي وفي وسط المادة الأساس البوليمري سيعمل بشكل كبير جداً على تقليل الانخلاعات الحاصلة في السلسلة البوليمرية نتيجة تعرضها لأجهاد الشد [21].

يلاحظ من الشكلين (3-1) و(3-2) أن قيم متانة الشد القصوى (UTS) للنماذج (1,2,3,4) والتي تم حسابها من العلاقة (2-1) والموضحة في الجداول (1,2,3) (الملحق-A) قبل تعرضها لظروف التجوية (الأشعة فوق البنفسجية والرطوبة ودرجة الحرارة) وفي درجة حرارة المختبر °C (23) كانت متباينة فيما بينها حيث أبدى النموذج (1) مقاومة شد أعلى من النموذج (3). يليه النموذج (2) ثم النموذج (4) ويعزى ذلك إلى اختلاف كثافة مادة البولي إيثيلين وكما موضح سابقاً في الجدول (2-1) حيث أن النموذج ذا الكثافة العالية يبدي مقاومة شد عالية بسبب انتظام سلاسل البوليمر وحصول تقارب فيما بينها وبذلك تزداد القوى الجزيئية بين السلاسل البوليمرية ومن ثم يكون لها قوة شد عالية أما النموذج ذو الكثافة الواطئة فتكون القوى الجزيئية بين السلاسل البوليمرية أقل منها في النموذج ذي الكثافة الأعلى بسبب تباعد هذه السلاسل بعضها عن بعض وبالتالي تكون قوة الشد أقل [80].

أما بعد تعرض النماذج لأشعة UV ولمدة (100) ساعة فإن قيم متانة الشد القصوى ستزداد وبشكل متباين، لأنه في بعض الحالات تكون المادة مقاومة لتفاعلات الأكسدة الضوئية ولمدة قصيرة وتكون طاقة الأشعة بمثابة حافز لزيادة التشابك (Cross Linking) لجزيئات السلاسل حيث تبدو المادة صلده [31].

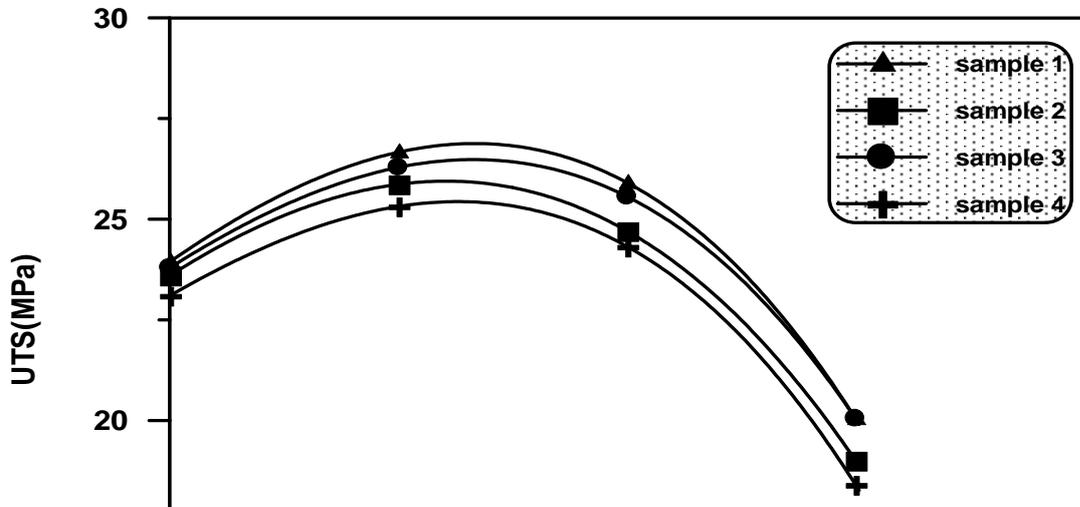
أما بعد مرور (200) و(300) ساعة من التشعيع فإن جميع قيم متانة الشد قلت وبشكل متباين لجميع النماذج أيضاً لأنه بازدياد زمن التعرض للتشعيع فإن الأشعة فوق البنفسجية تمثل

احد العوامل المتسببة في تكسر الاواصر البوليمرية بتأثير الطول الموجي للمصدر المستخدم [60].

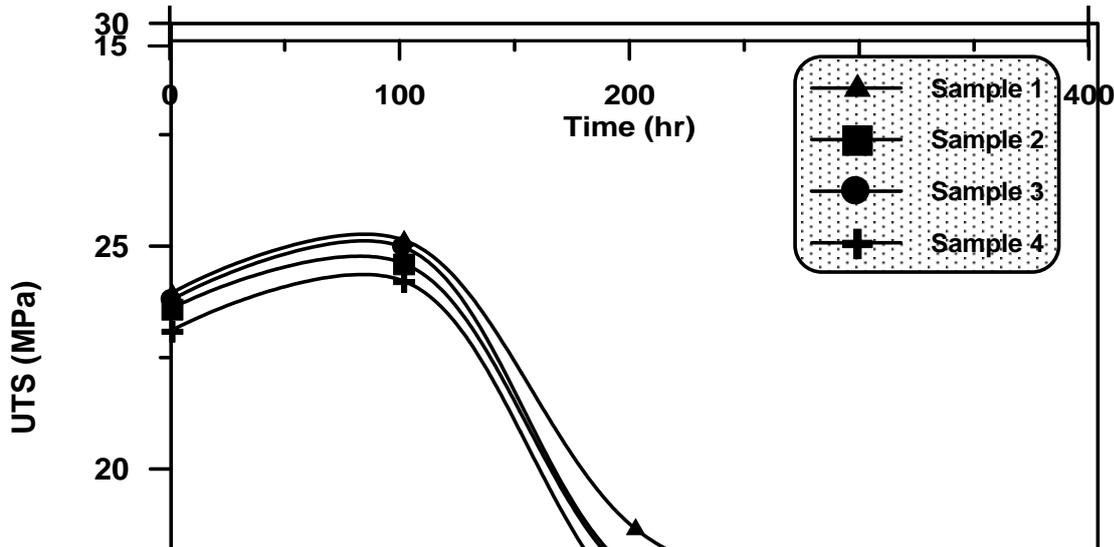
وفي حالة عمر النماذج في الماء لمدة (4) أسابيع وبدرجة حرارة المختبر 23°C لوحظ ازدياد في متانة الشد القصوى، لان جزيئات كلوريد الصوديوم NaCl الموجودة في الماء تشكل طوراً بينياً (Interphase) ما بين المادة الاساس ومنطقة السطح الفاصل بين المادة الاساس ومادة التقوية مما يزيد من مقاومة القص للطبقات الداخلية وبذلك تزداد قيم متانة الشد القصوى [60].

أما بعد مرور (8) و(12) أسبوعاً من الترطيب لوحظ حدوث انحدار في قيم متانة الشد القصوى بسبب حدوث ظاهرة الانتفاخ (Swelling) ومن ثم الانحلال (Dissolution) نتيجة تحطم الاواصر الكيميائية بين الذرات في السلسلة البوليمرية وبعدها يحدث تفكك لهذه السلاسل [56].

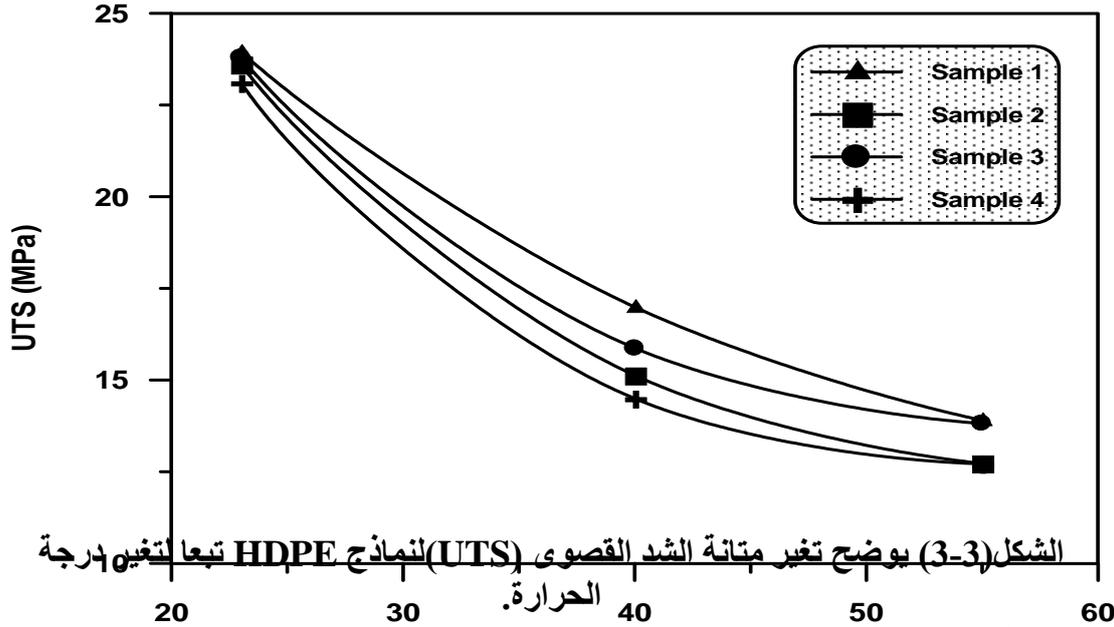
كما يلاحظ من الشكل (3-3) عند تعرض النماذج لدرجة حرارة مختلفة $\pm 23,40,55$ $^{\circ}\text{C}$ لمدة ساعة واحدة فان قيم متانة الشد القصوى تأخذ بالانحدار من درجة حرارة 23 ± 2 $^{\circ}\text{C}$ الى درجة حرارة 55 ± 2 $^{\circ}\text{C}$ مروراً بدرجة حرارة (40 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ ، ويعزى سبب ذلك الى زيادة الطاقة الحركية للجزيئات في السلاسل البوليمرية عند ارتفاع درجة حرارة النموذج مما يؤدي الى ضعف قوى الترابط بين السلاسل الجزيئية للمادة الاساس مصحوبة بمعدلات انفعال كبيرة تفود الى انخفاض قيم متانة الشد القصوى [53] وبشكل متباين ولجميع النماذج.



الشكل (3-1) يوضح تغير متانة الشد القصوى (UTS) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لأشعة UV.



الشكل (3-2) يوضح تغير متانة الشد القصوى (UTS) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للرطوبة.



الشكل (3-3) يوضح تغير متانة الشد القصوى (UTS) لنماذج HDPE تبعاً لتغير درجة الحرارة.

3-2 اختبار الانحناء (Bending Test)

ان الهدف الرئيسي من اختبار الانحناء هو التعرف على السلوك الخطي او ما يدعى احياناً (Hookean Behavior) للمادة الواقعة تحت تأثير الحمل المسلط بالاتجاه العمودي على المستوى السطحي لها [46].

يلاحظ من الأشكال (3-4)، (3-5)، (3-6)، (3-7)، (3-8)، (3-9)، (3-10)، (3-11)، (3-12) و (3-13) أن الانحراف (Deflection) يتناسب طردياً مع الحمل المسبب له وعند زوال تأثير الحمل المؤثر تسترد المادة حالتها الاصلية ويستنتج من ذلك ان المادة تخضع لقانون هوك (Hooke's Law) وان النسبة بين الكتلة والانحراف مقدار ثابت يمثل الميل ويحسب من الأشكال السابقة الذكر ومن هذا الاختبار تم حساب قيم معامل المرونة (E) لجميع النماذج المهينة لهذا الغرض باستخدام العلاقتين (1.5) و (1.6) والجداول (4, 5, 6) (الملحق - A) تمثل قيم معامل المرونة لجميع النماذج في مختلف الظروف البيئية.

يلاحظ من الشكلين (3-14) و (3-15) ان معامل المرونة (E) لجميع النماذج قبل تعرضها لظروف التجوية وفي درجة حرارة المختبر 23°C كانت متباينة وان النموذج (1) يمتلك معامل مرونة اعلى من باقي النماذج ويعني هذا ان الانحراف قد انخفضت قيمته لكثافته الحجمية العالية قياساً بباقي النماذج الاخرى أو النموذج ذي الكثافة الواطئة يكون مقدار الانحراف كبيراً وبالتالي يقل معامل مرونته.

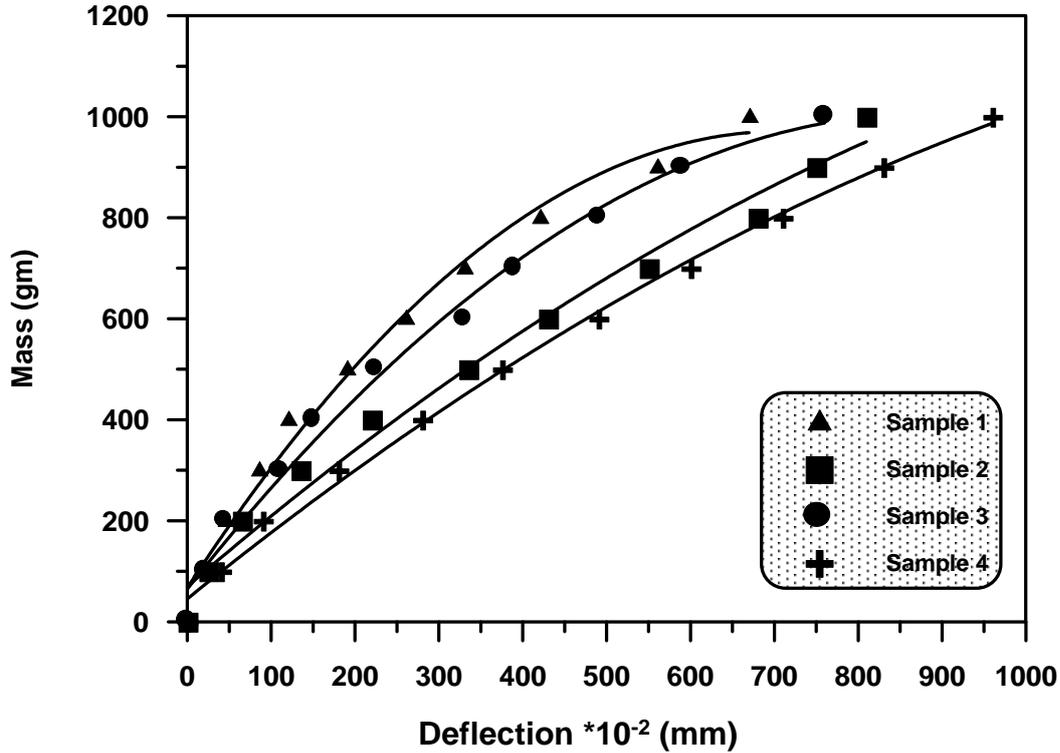
أما بعد تعرض النماذج لأشعة UV ولمدة (100) ساعة فإن قيم معامل المرونة قد زادت وبشكل متباين أيضاً بسبب حدوث حالة الشد في الروابط الموجودة بين السلاسل الجزيئية في المادة الأساس مما يؤدي الى تقييد حركتها، بحيث تصبح المادة صلدة وذات معدلات انفعال واطئة مما يزيد من مرونتها [12] [52].

أما بعد مرور (200) و (300) ساعة من التشعيع لوحظ انخفاض قيم معامل المرونة وبشكل متباين ولجميع النماذج وهذا ناتج عن فك الارتباط بين السلاسل البوليميرية ومن ثم تكسر أواصرها، وبذلك تبدي المادة البوليميرية انفعالات عالية مما يقلل معامل مرونتها [31].

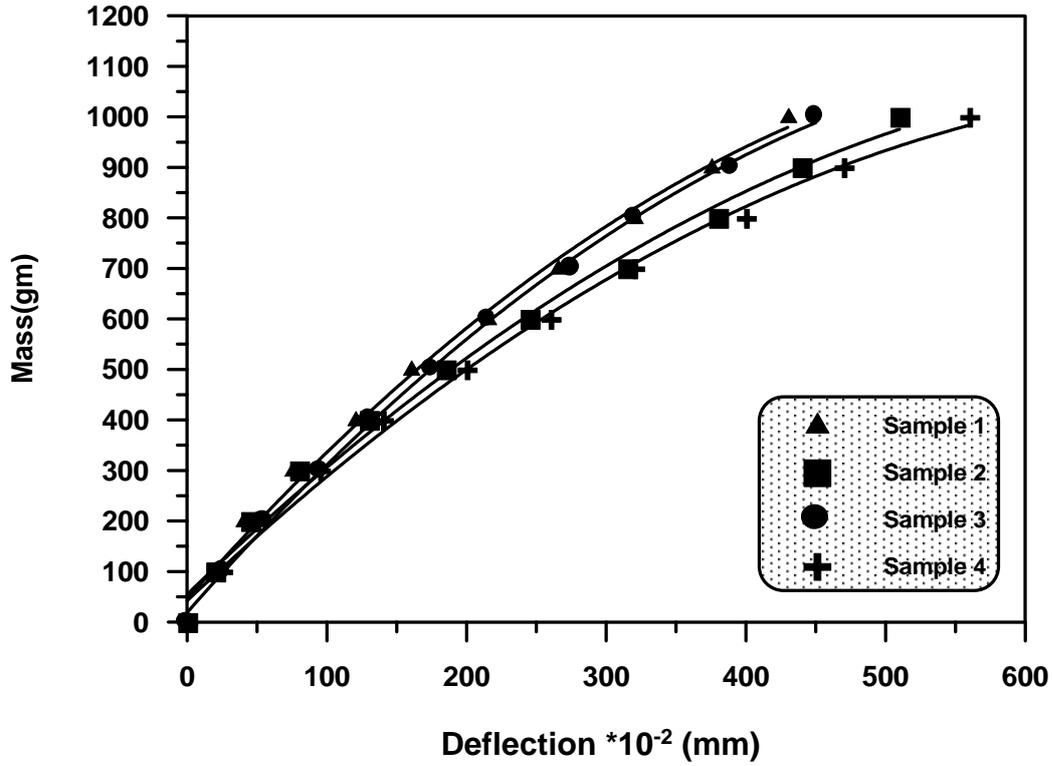
وفي حالة غمر النماذج في الماء بدرجة حرارة المختبر 23°C فان قيم معامل المرونة قد زادت بعد (4) اسابيع من الترطيب ويعزى ذلك إلى أن جزيئات كلوريد الصوديوم الموجودة في الماء تشكل طوراً بينياً ما بين المادة الأساس ومنطقة السطح الفاصل بين المادة الأساس ومادة التقوية مما يزيد من مقاومة القص للطبقات الداخلية وبذلك تزداد قيم معامل المرونة لها [60].

أما بعد مرور (8) و(12) أسبوعا من الترطيب لوحظ انحدار قيم معامل المرونة لأن زيادة زمن التعرض للماء يؤثر في تماسك جزيئات سطح المادة وبالتالي يؤدي إلى انحلال الأواصر نتيجة تغلغل جزيئات المادة داخل هذه المادة وبذلك يقل معامل مرونتها وبشكل متباين ولجميع النماذج [31].

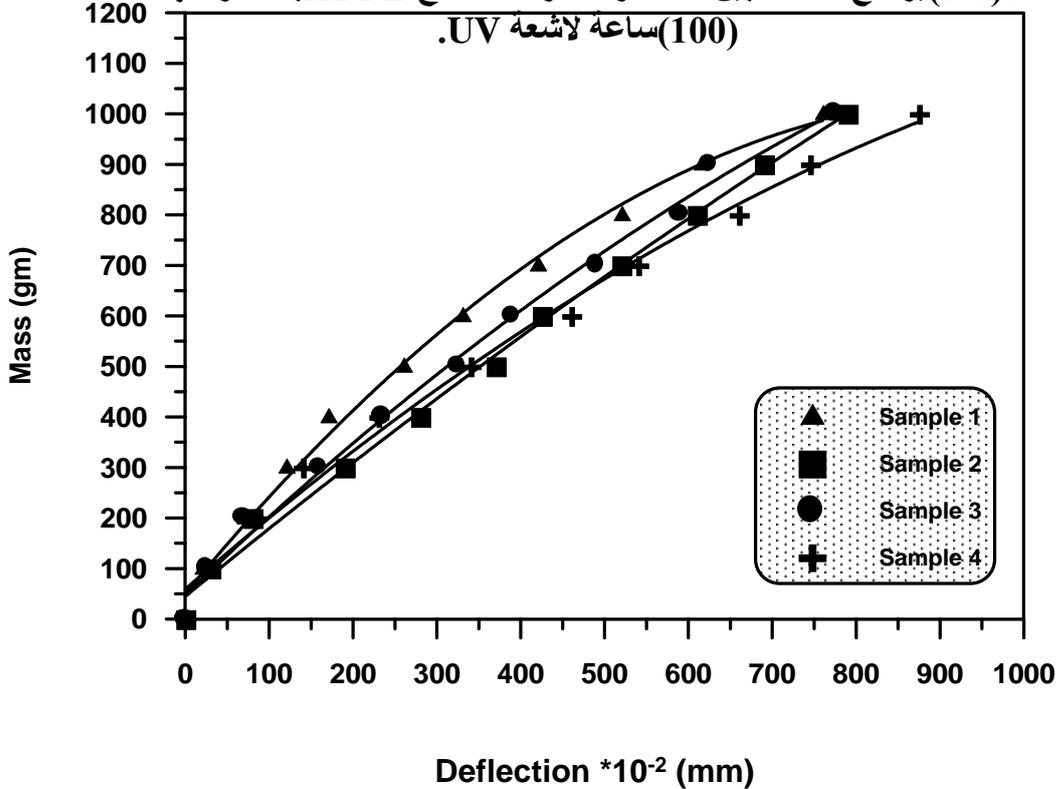
كما يلاحظ من الشكل (3-16) عند تعرض النماذج لدرجات حرارية مختلفة $(23,40,55\pm 2)^\circ\text{C}$ لمدة ساعة واحدة بأن قيم معامل المرونة قد انخفضت وبشكل ملحوظ من درجة حرارة $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ وحتى درجة حرارة $(55\pm 2)^\circ\text{C}$ لأن زيادة درجة حرارة النموذج تؤدي إلى ضعف قوة الترابط بين السلاسل الجزيئية للمادة الأساس وبالتالي تصبح لينة ويحدث فيها انفعال كبير مما يؤدي إلى انخفاض قيم معامل المرونة [12] وبشكل متباين لجميع النماذج.



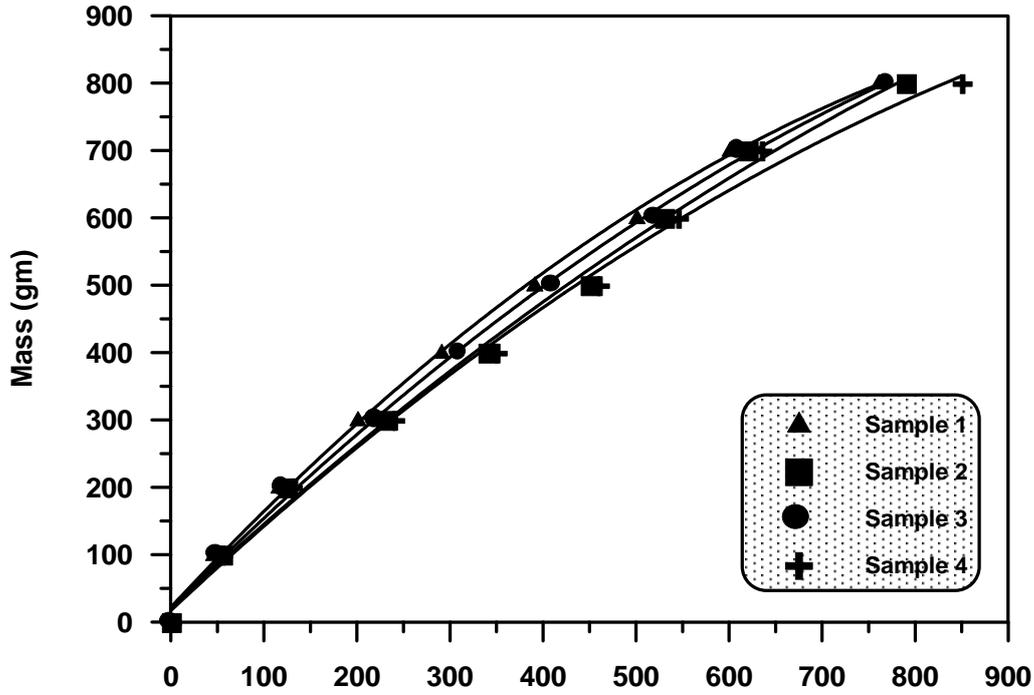
الشكل(3-4) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE قبل تعرضها لظروف التجوية.



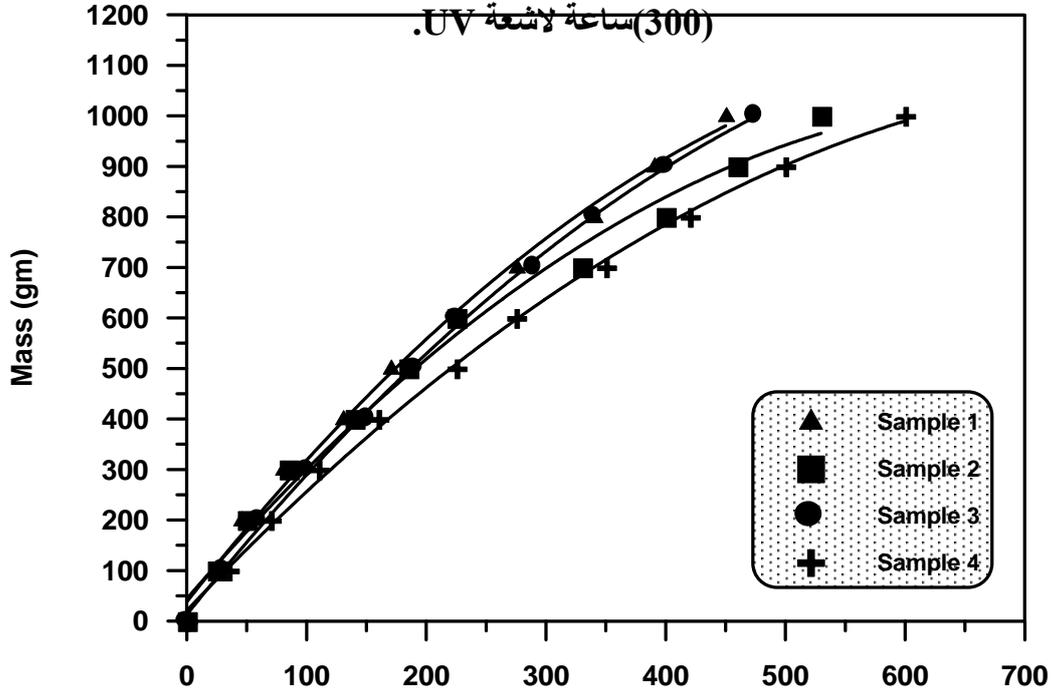
الشكل (3-5) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (100) ساعة لاشعة UV.



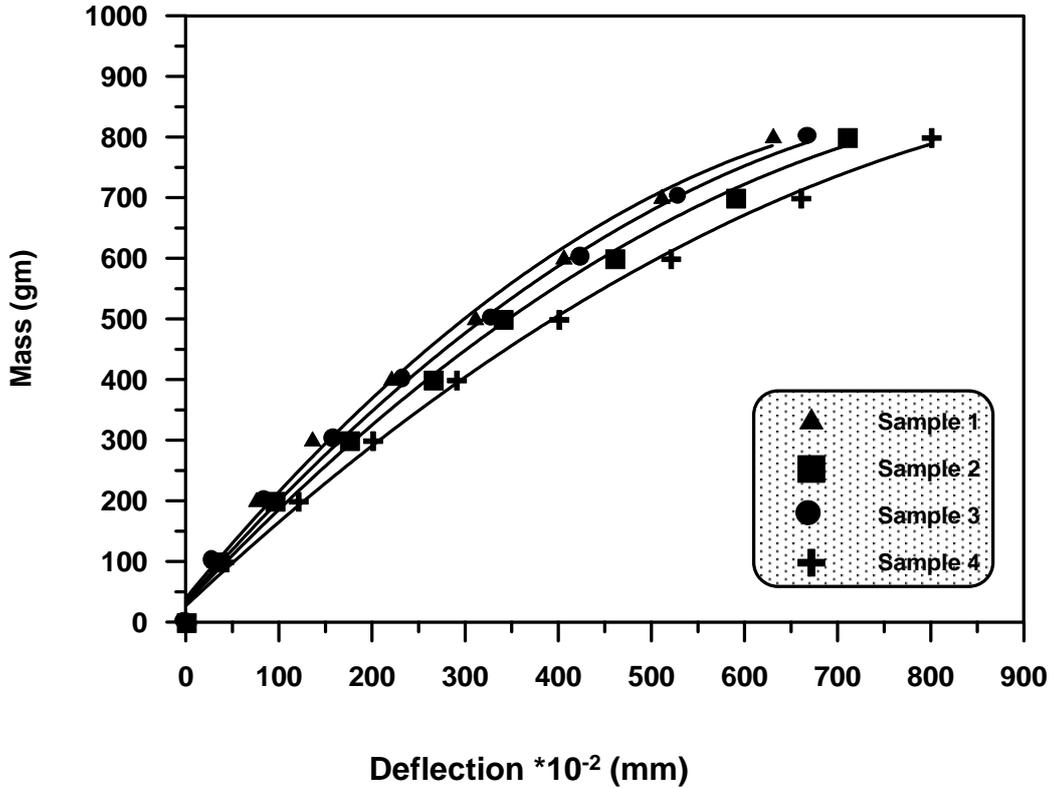
الشكل (3-6) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (200) ساعة لاشعة UV.



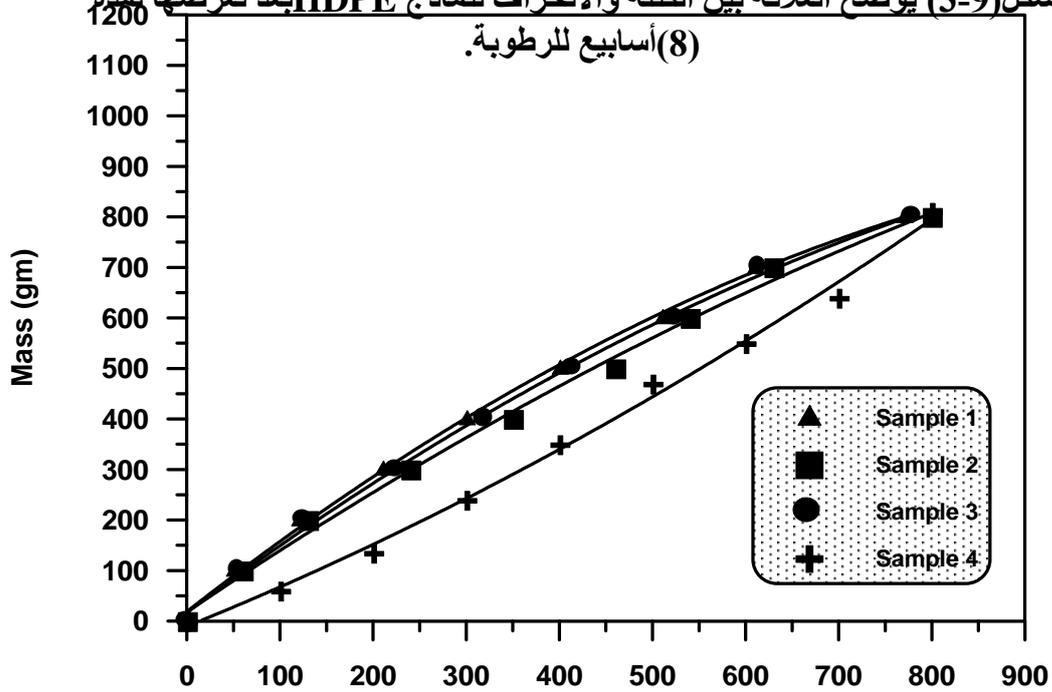
الشكل (3-7) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (300) ساعة لإشعة UV.



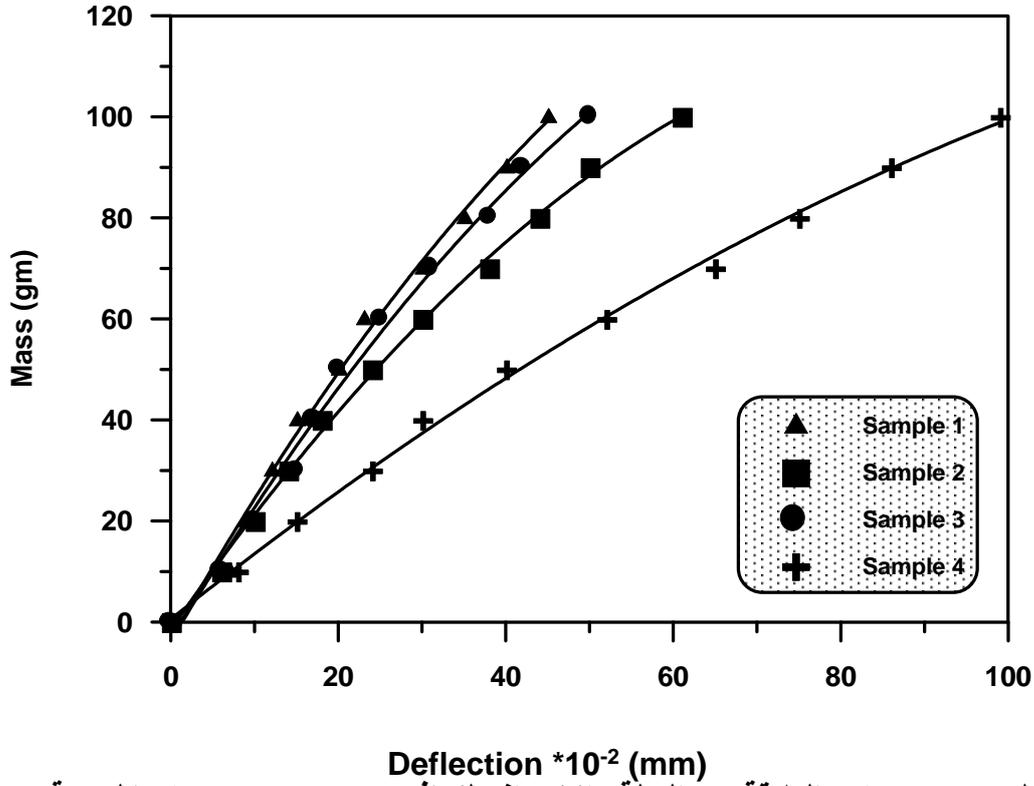
الشكل (3-8) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (4) أسابيع للرطوبة.



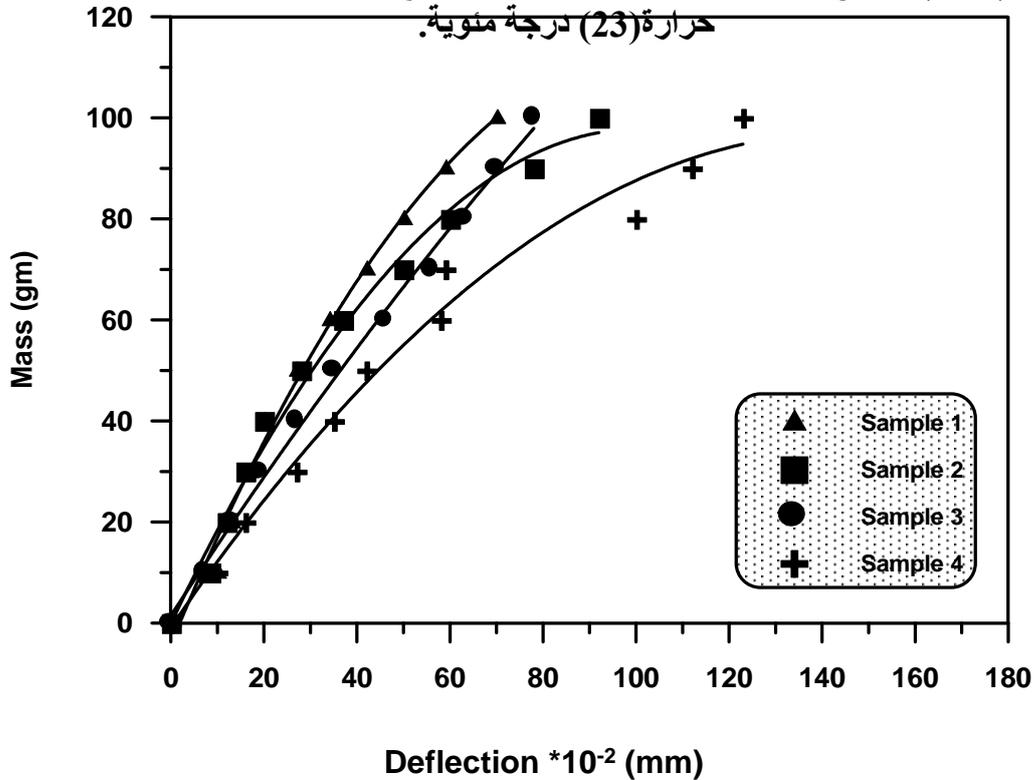
الشكل (3-9) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (8) أسابيع للرطوبة.



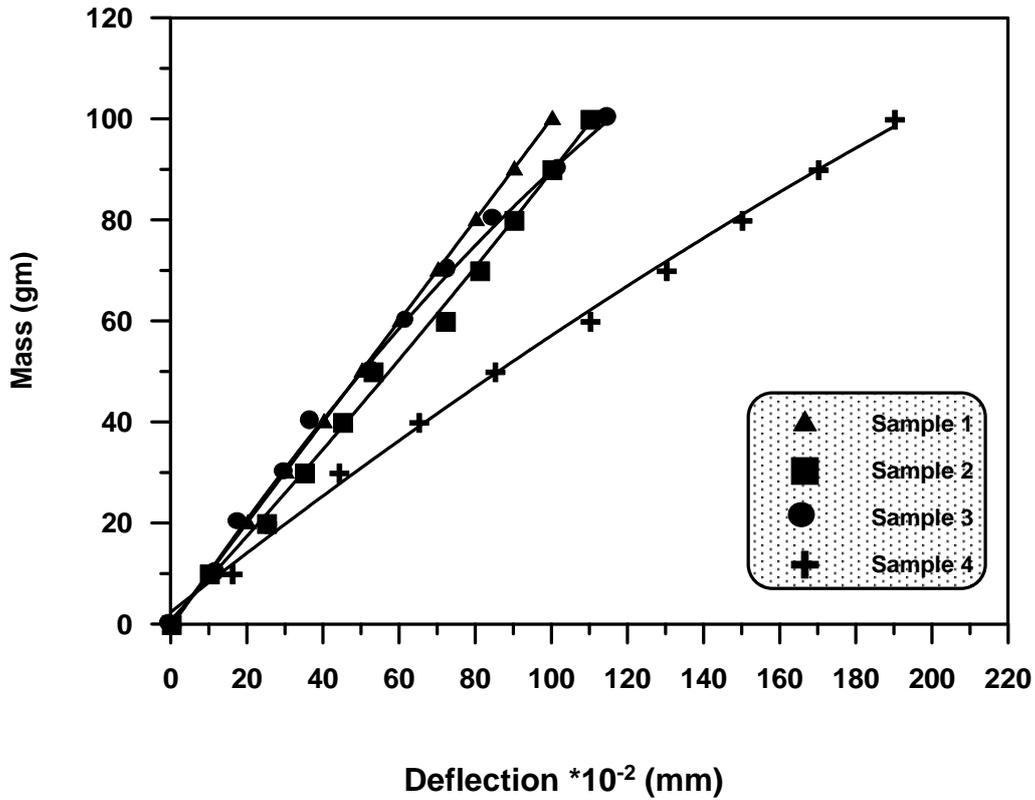
الشكل (3-10) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (12) أسبوعاً للرطوبة.



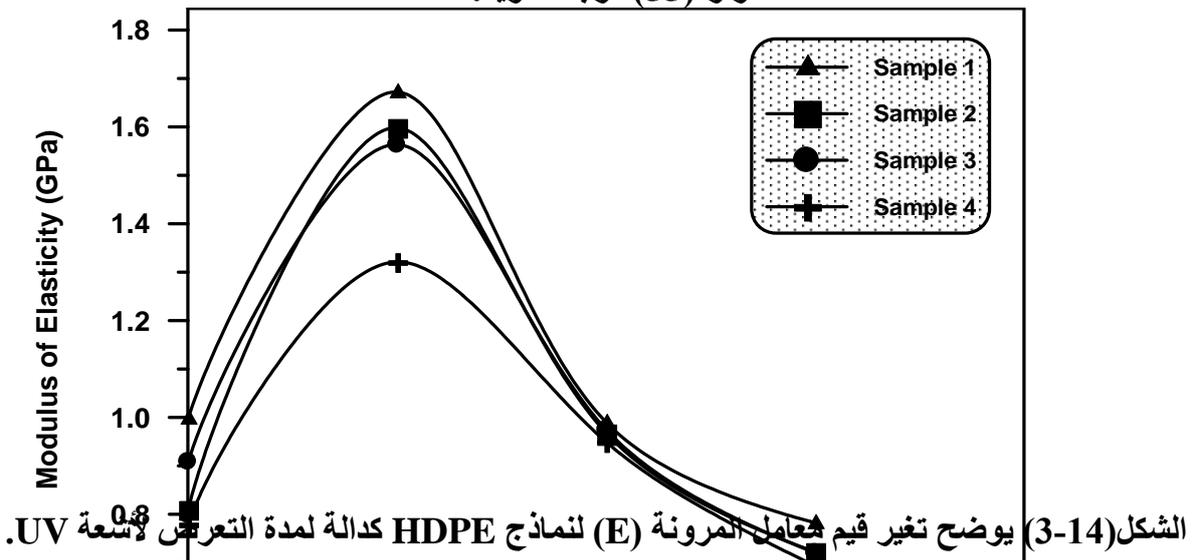
الشكل (3-11) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لدرجة حرارة (23) درجة مئوية.



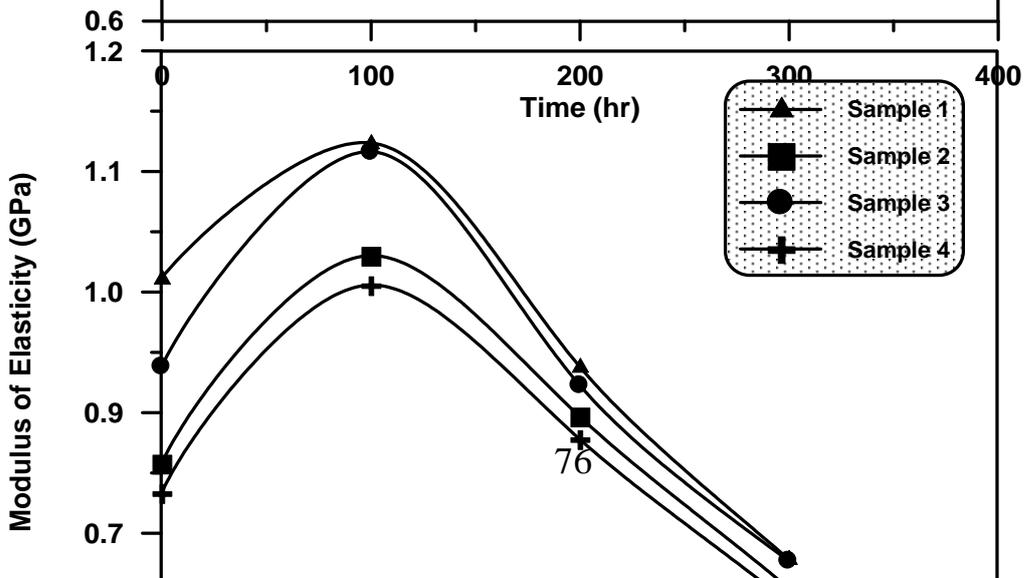
الشكل (3-12) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لدرجة حرارة (40) درجة مئوية.



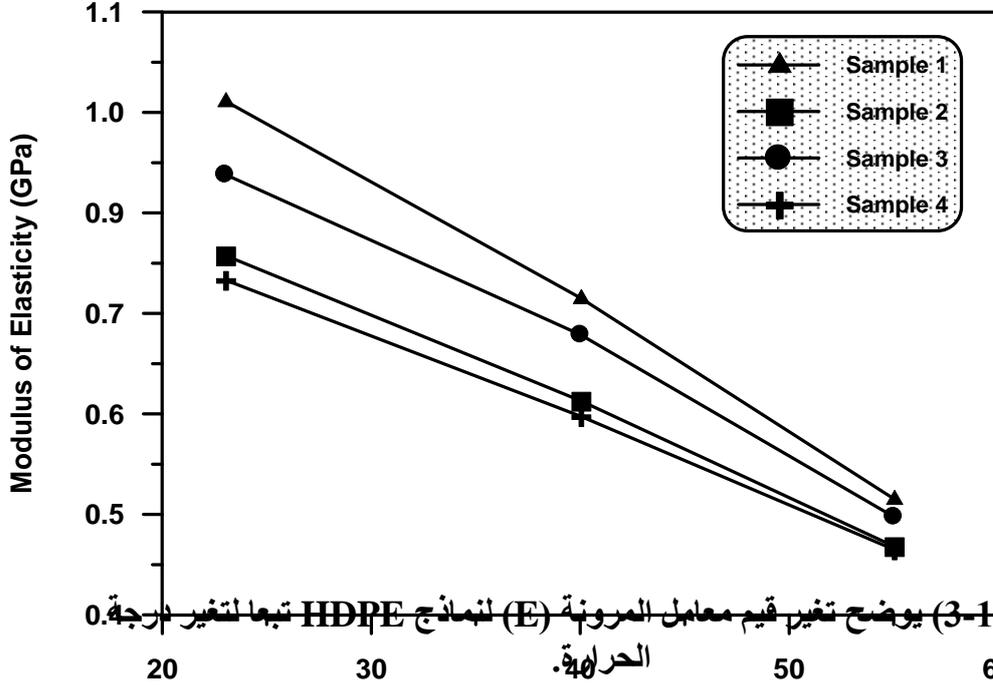
الشكل (3-13) يوضح العلاقة بين الكتلة والانحراف لنماذج HDPE بعد تعرضها لدرجة حرارة (55) درجة مئوية.



الشكل (3-14) يوضح تغير قيم معامل المرونة (E) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لأشعة UV.



الشكل (3-15) يوضح تغير قيم معامل المرونة (E) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للرطوبة.



الشكل (3-16) يوضح تغير قيم معامل المرونة (E) لنماذج HDPE تبعاً لتغير درجة الحرارة.

3-3 اختبار متانة الانحناء (Flexural Strength Test)

يستخدم فحص متانة الانحناء (F.S.) بكثرة في تحديد أقصى إجهاد تنفي تتحملة المادة تحت تأثير إجهادات مسلطة بصورة عمودية على امتداد المستوى الأفقي لها. تمكن العديد من الباحثين من دراسة سطح الكسر المحدث في المادة بعد إخضاعها لهذا النوع من الاختبار وذلك باستخدام تقنية المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)، فقد توصل الباحثان (G.C.Shin) و (L.J.Ebert) إلى الاستنتاج أن هناك ثلاثة أنواع من الآليات تحدث في مواقع مختلفة وبنفس الوقت تكون مسؤولة عن حدوث هذا النوع من الفشل في المادة المترابكة وكما يلي [49]:

1- الفشل بسبب الإجهادات الشديدة :

قد يحدث الفشل في المادة المترابكة بتأثير إجهادات الشد التي تؤدي إلى حدوث الشقوق في المادة الأساس والتي يطلق عليها (Matrix Crack)، ومع زيادة الحمل المسلط تنمو هذه الشقوق بسرعة تعتمد على مقاومة السطح البيئي، ففي حالة وجود العيوب المتأصلة في منطقة السطح البيئي فإن هذه الشقوق سوف تنمو بصورة سريعة جداً وبالالاتجاه المستعرض ومع استمرار زيادة الحمل المسلط سوف تتكاثر هذه الشقوق وبالالاتجاه الطولي على امتداد السطح البيئي، إن الانهيار يحدث في المادة المترابكة حالما يحدث الاندماج ما بين الشقوق الممتدة بالاتجاه الطولي والمستعرض بعضها مع بعض [56].

2- الفشل بسبب الإجهادات الانضغاطية :

في العادة يحدث الفشل الابتدائي في العينة الخاضعة لاختبار الانحناء عند السطح الخارجي للعينة المعرضة للأنضغاط (Compression – Side Surface) فقد وجد أن من

المحتمل حدوث الفشل في المادة المترابطة بتأثير اجهادات الانضغاط التي تؤدي الى حدوث ظاهرة الانبعاج الدقيق (Microbuckling) ومع استمرار زيادة الحمل المسلط سوف يزداد الانحراف المستعرض إلى ان يؤدي الى تشظيء المادة الاساس نتيجة تحطم الروابط البيئية [49].

3-الفشل بسبب الاجهادات القصية

ان شروخ القص المتولدة من الممكن ان تنمو بالاتجاه المستعرض وبالاتجاه الطولي لكن بصورة عامة فان شروخ القص تمتد بالاتجاه الموازي للسطح البيئي [49] [56]، وبذلك يمثل السطح البيئي في المادة المترابطة اضعف منطقة موجودة فيها ومع زيادة مقاومة السطح البيئي تزداد مقاومة القص (Shear Strength) [49]، لذلك عندما نضع في التقدير هذا التصور عن كيفية حدوث الفشل تحت حمل الانحناء لا بد ان يدخل في هذا التقدير ايضا قيمة اقصى اجهاد تني تتحملة المادة المعرضة لهذا النوع من التحميل وعليه تم حساب قيمة مقاومة الانحناء (F.S.) من المعادلة (1.4) للنماذج (1,2,3,4) قبل التعرض لظروف التجوية وبعدها وقيمها موضحة بالجدول (7,8,9) (الملحق-A).

يلاحظ من الشكلين (3-17) و(3-18) أن قيم مقاومة الانحناء للنماذج (1,2,3,4) قبل تعرضها لظروف التجوية في درجة حرارة المختبر 23°C كانت متباينة نظراً لأختلاف قيم الكثافة الكتلية لها، فالنموذج (1) ابدى مقاومة انحناء اعلى من بقية النماذج وذلك لارتفاع قيمة الكثافة الكتلية له والتي تؤدي إلى انتظام سلاسل البوليمر وحصول تقارب فيما بينها وبذلك تزداد القوى الجزئية بين السلاسل البوليمرية فيكون له مقاومة انحناء عالية، أما النماذج الأخرى فيكون لها مقاومة انحناء متباينة، فالنموذج (3) يبدي مقاومة انحناء اعلى من النموذجين (2,4) والنموذج (2) تكون مقاومة الانحناء له اعلى من النموذج (4)، وذلك لأختلاف قيم كثافتها الكتلية، حيث أنه كلما قلت الكثافة الكتلية للنموذج كلما كانت السلاسل البوليمرية أكثر تباعداً والقوى الجزئية أقل ترابطاً وبذلك تبدي مقاومة انحناء اقل [80].

أما بعد تعرض النماذج لـ (100) ساعة من التشعيع فان جميع النماذج قد أبدت مقاومة انحناء اعلى مما كانت عليه قبل التشعيع لكون طاقة الأشعة هي بمثابة حافز لزيادة تشابك السلاسل البوليمرية أو الربط التقاطعي لجزئيات السلاسل حيث تبدو المادة صلده [31] وكانت قيم مقاومة الانحناء لجميع النماذج متباينة.

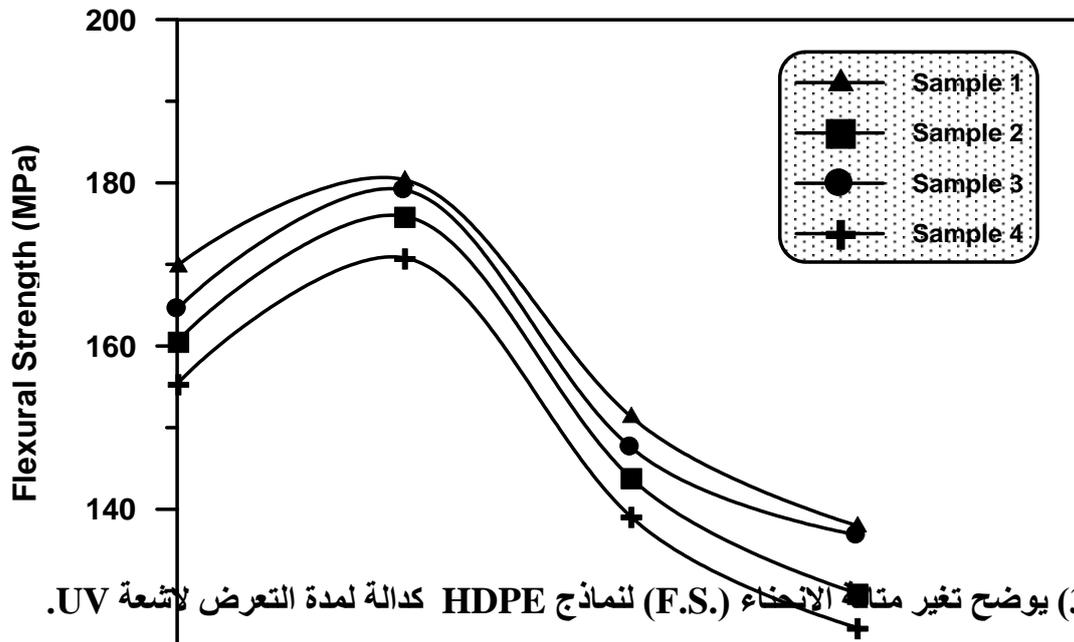
اما بعد مرور (200) و(300) ساعة من التشعيع فحصل انحدار بشكل واضح ومتباين لقيم متانة الانحناء ولجميع النماذج أيضاً وان سبب الانخفاض في القيم هو انه بازياد زمن التعرض لاشعة UV التي تمثل احدى العوامل المسببه في تكسر الاواصر البوليمرية بتأثير الطول الموجي للمصدر المستخدم [31] [60].

اما بعد غمر النماذج في الماء وبدرجة حرارة المختبر 23°C لمدة (4) أسابيع ف لوحظ زيادة قيم متانة الانحناء لجميع النماذج وبشكل متباين وسبب هذا الارتفاع يعود الى ان جزئيات كلوريد الصوديوم (NaCl) الموجوده في الماء تشكل طور بيئي (Interphase) ما بين المادة الاساس (Matrix) ومنطقة السطح الفاصل بين المادة الاساس ومادة التقوية، مما يزيد من مقاومة القص للطبقات الداخلية وبذلك تزداد قيم مقاومة الانحناء [60].

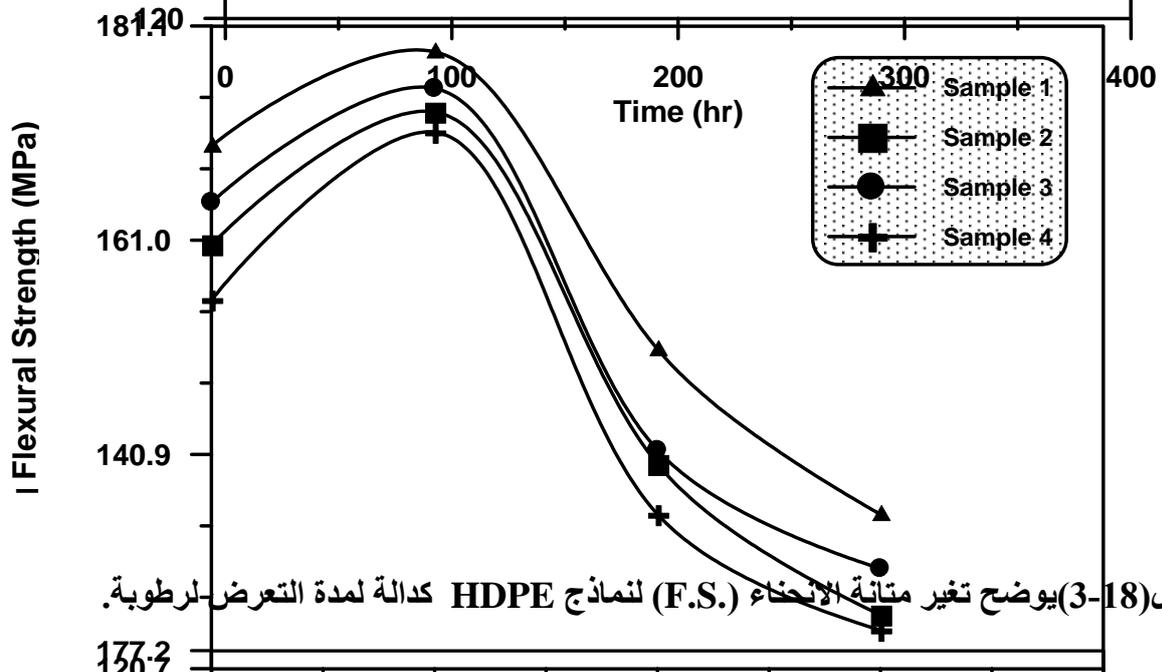
اما بعد مرور (8) و(12) اسبوعاً من الترتيب لوحظ حصول انحدار في قيم متانة الانحناء ولجميع النماذج وبشكل متباين من نموذج لآخر وهذا ناتج من تغلغل جزئيات الماء داخل المادة البوليمرية مما يؤدي الى حدوث ظاهرة الانتفاخ ومن ثم انحلال البوليمر نتيجة حدوث ظاهرة المـج (Descorption) البوليمري [56].

يلاحظ من الشكل (3-19) عند تعرض النماذج لدرجات حرارية مختلفة $23,40,55\pm 2^{\circ}\text{C}$ لمدة ساعة واحدة بأن جميع قيم متانة الانحناء قد انخفضت لجميع النماذج وبشكل متباين بسبب ضعف قوى الترابط بين السلاسل الجزئية للمادة الاساس [60].

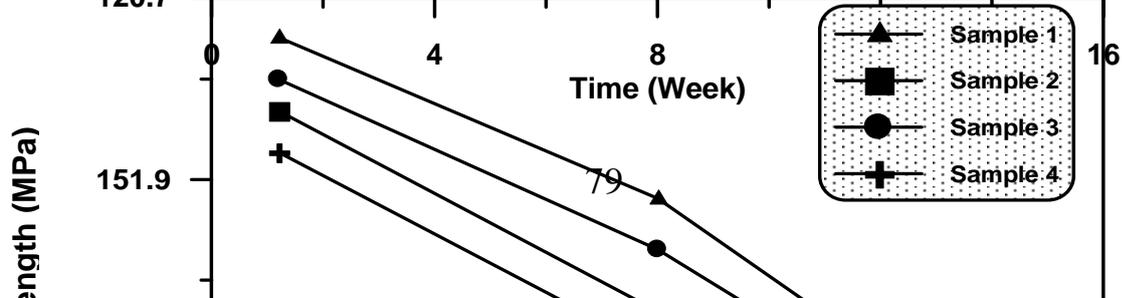
كما أظهرت نتائج مقاومة القص للطبقات الداخلية سلوكاً مماثلاً لمتانة الانحناء مما يؤكد حالة التناسب بينهما كما موضح في الاشكال (3-20)، (3-21) و(3-22) والجداول (10,11,12) (الملحق-A) توضح تلك القيم.



الشكل (3-17) يوضح تغير متانة الانحناء (F.S.) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لاشعة UV.

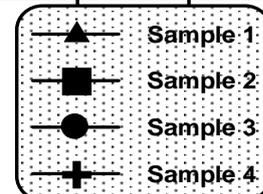


الشكل (3-18) يوضح تغير متانة الانحناء (F.S.) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لارطوبة.

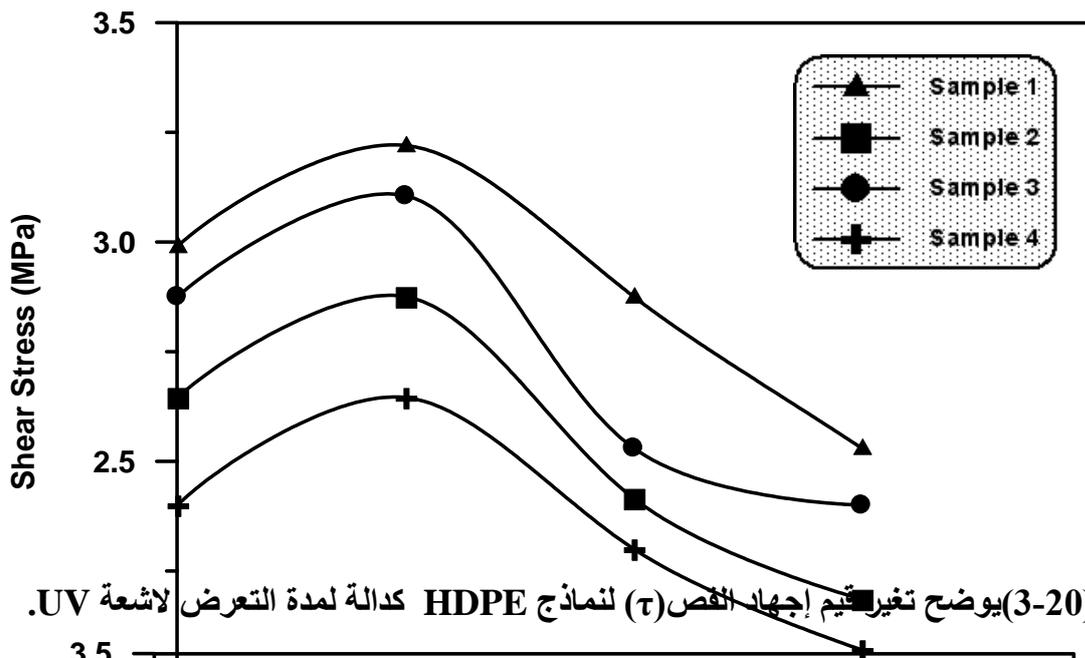


Flexural Strength (MPa)

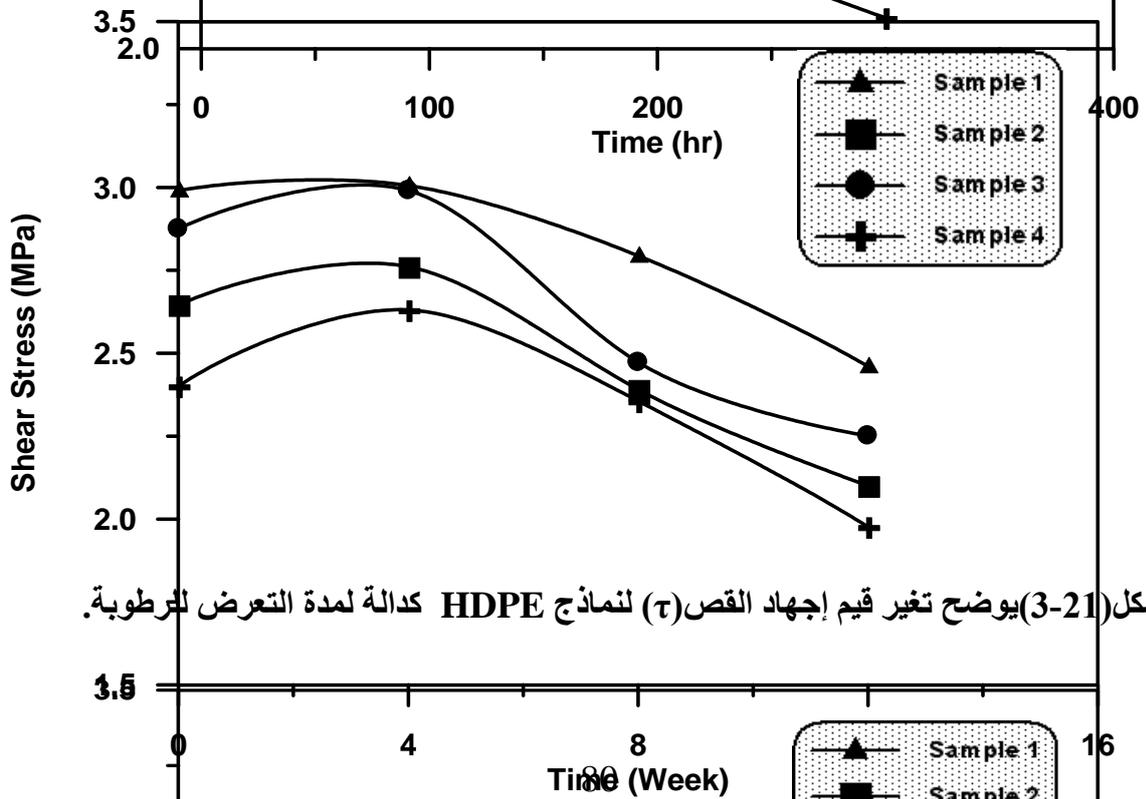
Time (Week)



الشكل (3-19) يوضح تغير متانة الانحناء (F.S.) لنماذج HDPE تبعا لتغير درجة الحرارة.



الشكل (3-20) يوضح تغير قيم إجهاد القص (τ) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لاشعة UV.



الشكل (3-21) يوضح تغير قيم إجهاد القص (τ) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للغطوبة.

الشكل (3-22) بوضوح تغير قيم إجهاد القص (τ) لنماذج HDPE تبعاً لتغير درجة الحرارة. 3-4 اختبار الصدمة (Impact Test)

يمثل هذا الفحص مقياساً لمتانة المادة او قدرتها على امتصاص الطاقة لغاية الكسر اذ ان المواد البوليمرية قد تكون مطيلية (Ductile) تحت الاجهادات الساكنة لكنها قد تبدو هشة (Brittle) تحت تأثير الاجهادات السريعة [46] وكما هو موضح سابقاً، فان فحص الصدمة بطريقة جاري (Charpy Impact) يعد من الفحوصات التي يمكن اللجوء اليها في دراسة سلوك المواد الواقعة تحت تأثير قوى سريعة، وإذا تمعنا في واقع هذا الاختبار نجد انه يمثل احدى صور فحص الانحناء الثلاثي النقاط بنوعه الحركي (Dynamic Three – point Flexural Test). لذا فان زيادة سرعة الفحص تؤدي دوراً هاماً في التأثير في الخواص الميكانيكية للمادة [56] و عليه فان أهم الآليات التي تكون مسؤولة عن حدوث الفشل في المادة المعرضة لأختبار الانحناء الساكن التي تم الاشارة اليها في الفقرة (3-3) السابقة، تبرز بوضوح ايضاً عند تعرض المادة لأختبار جاري.

وفي الواقع توصف المواد المترابكة المعرضة لفحص جاري بأنها ذات مقاومة قص الطبقات الداخلية واطئة القيمة مقارنة مع المواد المترابكة المعرضة لفحص الانحناء الساكن فقد توصل (Harris) الى حقيقة ان مقاومة قص الطبقات الداخلية للمادة المترابكة تقل مع زيادة معدل التحميل فلقد اثبت (Harries) ذلك من خلال اقتراحه الذي اوضح فيه ان اجهادات قصية كبيرة تنشأ عند الحافات الحرة (Free Edges) في المادة المعرضة لفحص الانحناء الساكن وقد تتبدد بعض الشيء بالزحف (Creep) الذي يحدث في المادة البوليمرية الأساس، بينما لوحظ عند معدلات التحميل العالية ان الوقت الكافي لا يتوفر لحدوث ذلك ومن اقتراح (Harrier) يفهم انه كلما زاد معدل التحميل فمعنى ذلك نقصان مقاومة قص الطبقات الداخلية للمادة المترابكة [56]، و هكذا يتضح ان مشكلة الكسر الهش تبرز عند معدلات التحميل العالية و عليه تم الشروع باجراء اختبار الصدمة باستخدام طريقة جاري على جميع النماذج المهيئة لهذا الغرض. ومن المعادلة (1.9) تم حساب مقاومة الصدمة (Impact Strength) والجداول (13,14,15) (الملحق – A) تبين تلك القيم ولجميع النماذج.

يلاحظ من الشكلين (3-23) و(3-24) بان قيم مقاومة الصدمة للنماذج (1,2,3,4) في درجة حرارة المختبر 23°C وقبل تعرضها لظروف التجوية كانت متباينة حيث ابدى النموذج رقم (4) مقاومة صدمة اعلى من النموذج (2) يليه النموذج (3) واخيراً النموذج (1) وهذا ناتج من اختلاف قيم الكثافة الكتلية لها، حيث كلما كان النموذج ذا كثافة كتلية عالية تكون قيمة مقاومة

الصدمة له قليلة بينما النموذج ذو الكثافة الكتلية الواطئة تكون قيمة مقاومة الصدمة له عالية [80].

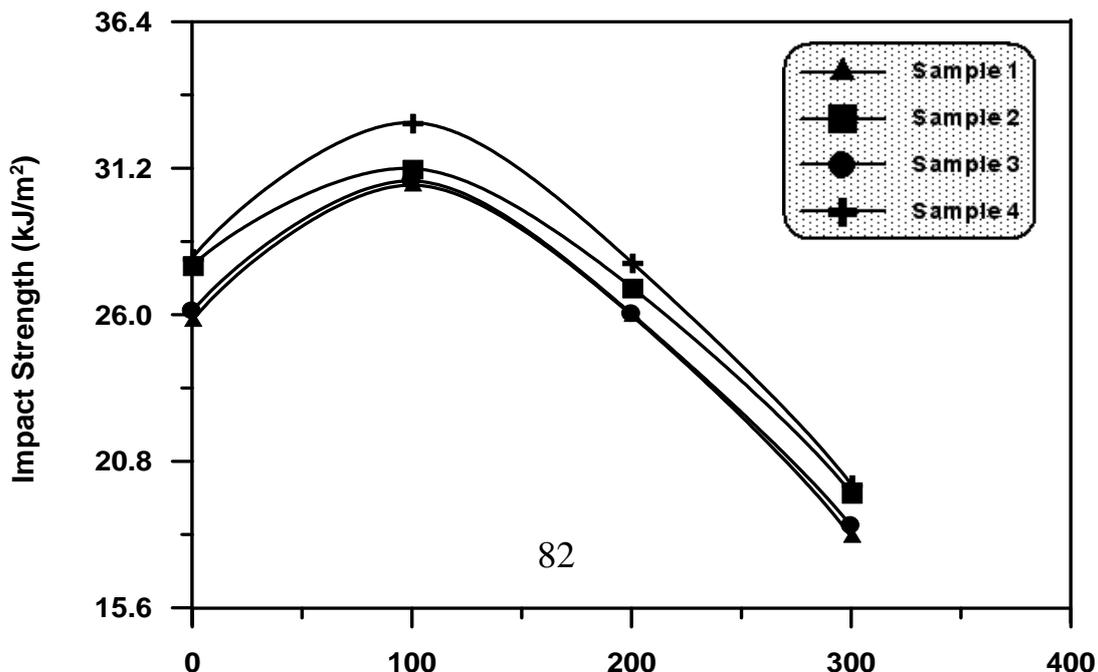
اما بعد تعرض النماذج لأشعة (UV) لمدة (100) ساعة فقد لوحظ تحسن قيم مقاومة الصدمة وزيادتها ولجميع النماذج وبشكل متباين عما كانت عليه قبل التشعيع وهذا ناتج من زيادة قوى الترابط بين السلاسل الجزيئية للمادة الاساس (Matrix) نتيجة حدوث عملية استكمال التفاعلات التشابكية [60].

اما بعد مرور (200) و(300) ساعة من التشعيع فان جميع قيم مقاومة الصدمة قد انحدرت وبشكل ملحوظ لأن المادة تتحول الى الشكل الصلب الهش فتتقيد حركة الجزيئات وتصبح الروابط بينها في حالة شد قصوى مما ادى الى نقصان قيم مقاومة الصدمة لها [31].

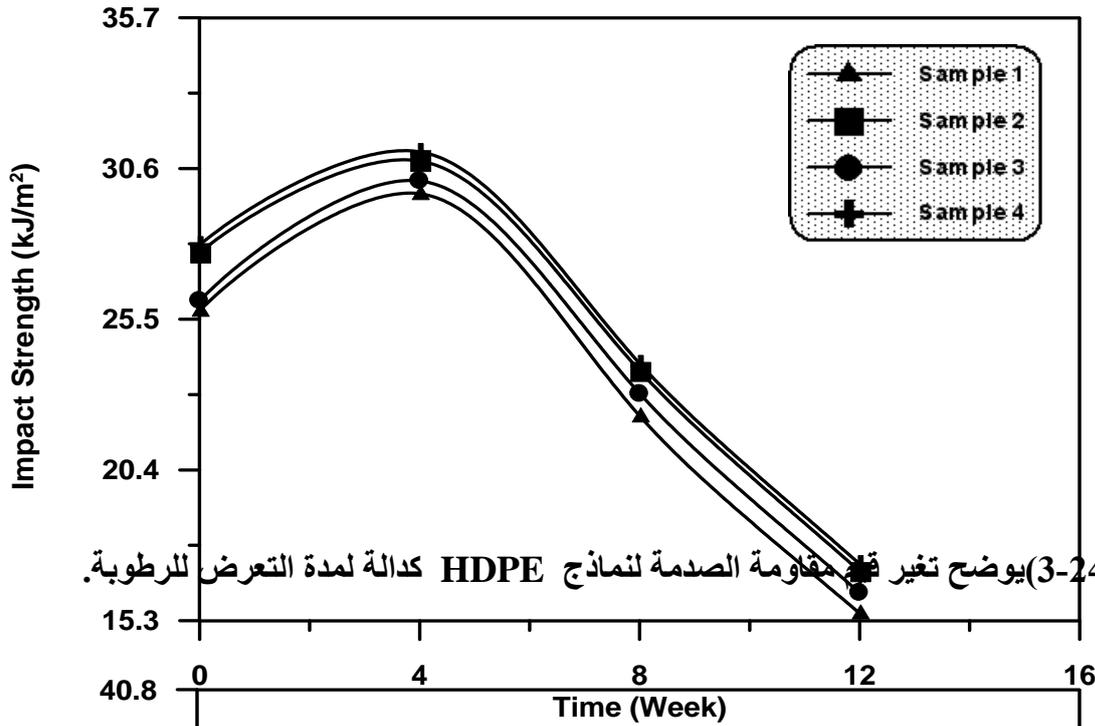
اما في حالة غمر النماذج في الماء وبدرجة حرارة المختبر 23°C ، لوحظ ان قيم مقاومة الصدمة سوف قد زادت بعد مرور (4) اسابيع من الترطيب ويعزى هذا إلى حدوث عملية استكمال التقسية وزيادة قوة الترابط بين السلاسل الجزيئية للمادة الاساس [56]، حيث كانت هذه القيم متباينة لجميع النماذج بسبب اختلاف قيم الكثافة الكتلية لها.

اما بعد مرور (8) و(12) اسبوعاً من الترطيب لوحظ حدوث نقصان في قيم مقاومة الصدمة حيث يكون تأثير الماء فاعلاً ويسبب انهيار الوسط (Swelling Matrix) وتولد مناطق ضعيفة في المادة مؤدية الى انحلال وتحطم الأواصر وبالتالي نقصان قيم مقاومة الصدمة ولجميع النماذج وبشكل متباين [31].

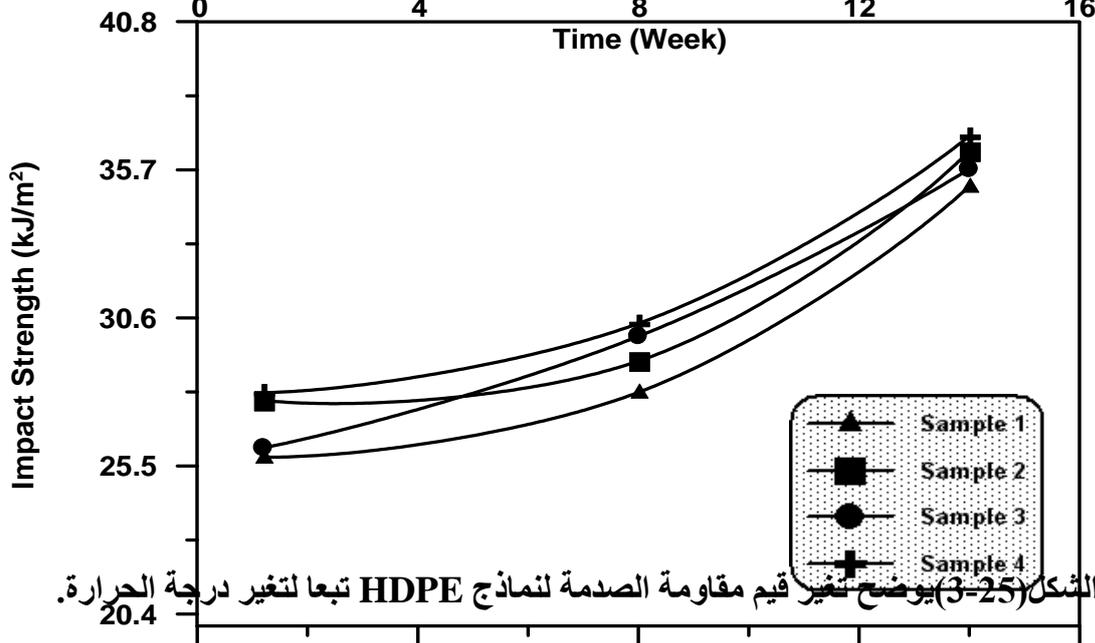
يلاحظ من الشكل (25-3) عند تعرض النماذج لدرجات حرارية مختلفة $23,40,55\pm 2^{\circ}\text{C}$ لمدة ساعة واحدة بأن قيم مقاومة الصدمة قد زادت مع زيادة درجة الحرارة، وقد يعزى التحسن في قيم مقاومة الصدمة عند درجة حرارة $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ الى حدوث عملية استكمال التقسية التي تقود إلى زيادة كثافة الترابط التشابكي [56] ومع ارتفاع درجة الحرارة إلى $55\pm 2^{\circ}\text{C}$ تستمر الزيادة في مقاومة الصدمة، ويعزى سبب ذلك الى ارتخاء الاواصر بين جزيئات المادة البوليمرية وزيادة حركتها الانزلاقية وهذا يعطيها إمكانية أكبر لامتصاص الطاقة، مما يؤدي الى زيادة الطاقة اللازمة للكسر [5].



الشكل (3-23) يوضح تغير قيم مقاومة الصدمة لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لاشعة UV.



الشكل (3-24) يوضح تغير قيم مقاومة الصدمة لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للرطوبة.



الشكل (3-25) يوضح تغير قيم مقاومة الصدمة لنماذج HDPE تبعا لتغير درجة الحرارة.

3-5 اختبار الصلادة (Hardness Test)

ان مفهوم الصلادة يمكن اعتباره مقياسا للتشوه اللدن الذي تعاني منه المادة تحت تأثير الاجهاد الخارجي، لذلك فان وجود الدقائق المضافة نسبياً داخل المادة الاساس يؤدي الى رفع قيم الصلادة [21] وذلك لأن التقوية بالدقائق سوف تعمل على توزيع الاجهاد المسلط على وحدة المساحة مما يؤدي الى زيادة مقاومة السطح لهذه التشوهات [79].

ان عملية التشوه تتم بثلاث مراحل اساسية فالمرحلة الاولى يحصل فيها تشوه مرن (Elastic) وذلك عند بداية تغلغل اداة الغرز داخل سطح النموذج وباستمرار التحميل يتحول الى

تشوه مرن- لدن (Elastic – Plastic) وعندئذ تكتمل المرحلة الثانية، اما المرحلة الثالثة فتحدث بعد رفع الحمل من النموذج الذي يعاني من اثر متبقي (Residual Impression) عند سطحه [62].

يلاحظ من الشكلين (3-26) و (3-27) بان قيم الصلادة للنماذج (1,2,3,4) والتي تم حسابها من العلاقة (1.10) والموضحة في الجداول (16,17,18) (الملحق - A) وقبل تعرضها لظروف التجوية وفي درجة حرارة المختبر °C (23) كانت متباينة، حيث أبدى النموذج (1) صلادة اعلى مقارنة مع النموذج (3) يليه النموذج (2) ثم النموذج (4)، وهذا ناتج عن اختلاف الكثافة الكتلية لكل نموذج، اي ان النموذج الاعلى كثافة يبدي صلادة عالية والنموذج الاوطأ كثافة يبدي صلادة واطنة.

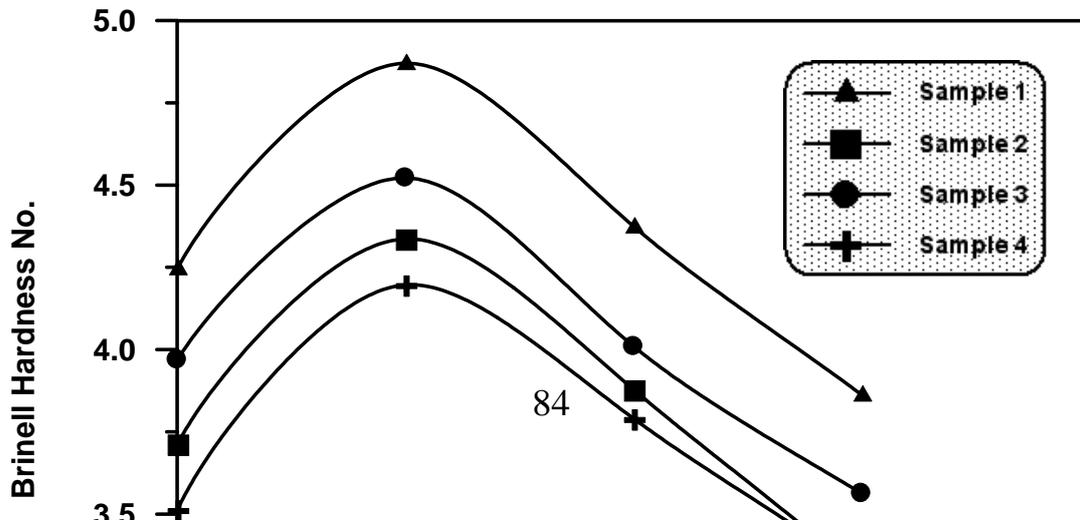
اما بعد تعرض النماذج للأشعة فوق البنفسجية لمدة (100) ساعة فان قيم الصلادة قد ازدادت وبشكل متباين لجميع النماذج وذلك بسبب حدوث حالة الشد في الروابط الموجودة بين السلاسل الجزيئية في المادة الاساس مما يؤدي الى تقييد حركتها وتصبح المادة اكثر صلادة وذات معدلات انفعال واطنة [52].

اما بعد مرور (200) و(300) ساعة من التشيع، فان جميع قيم الصلادة قد انحدرت وبشكل متباين لجميع النماذج، وهذا ناتج من فك الارتباط بين السلاسل البوليمرية ومن ثم تكسر اواصرها، وبذلك تبدي المادة البوليمرية انفعالات عالية مما يقلل صلابتها [31].

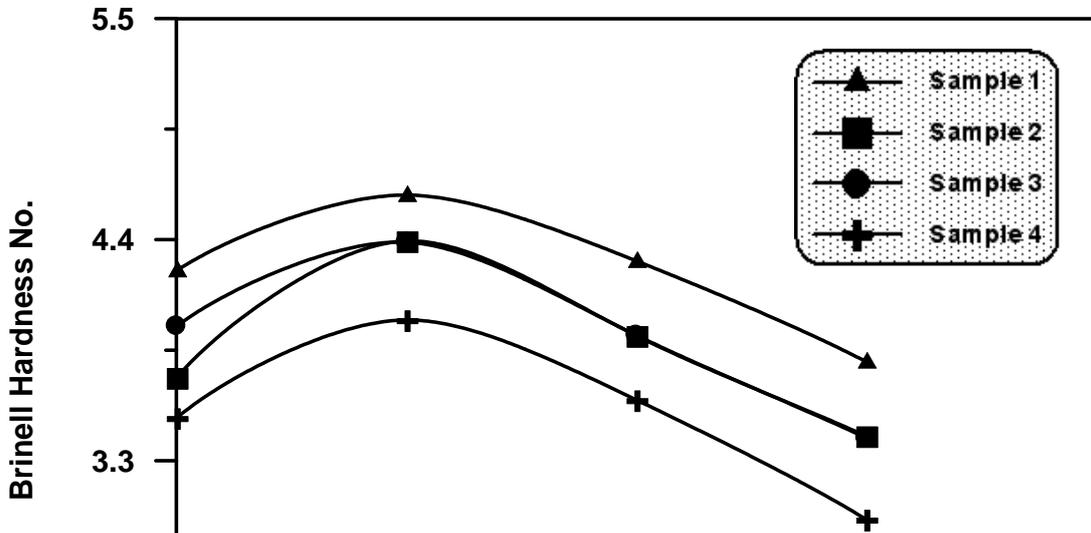
في حالة عمر النماذج في الماء بدرجة حرارة المختبر °C (23) يلاحظ ان قيم الصلادة قد زادت بعد مدة (4) اسابيع من الترطيب بسبب زيادة قوة الترابط بين السلاسل الجزيئية للمادة الاساس وذلك لاستكمال عملية التقسية [56] ولقد كانت قيم الصلادة متباينة لجميع النماذج.

اما بعد مرور (8) و(12) أسبوعا من الترطيب لوحظ نقصان في قيم الصلادة حيث يكون للماء تاثير كبير بسبب ظاهرة المحج البوليمري (تحلل البوليمر) [56] ويحصل الانحدار في جميع قيم الصلادة لجميع النماذج و بشكل متباين.

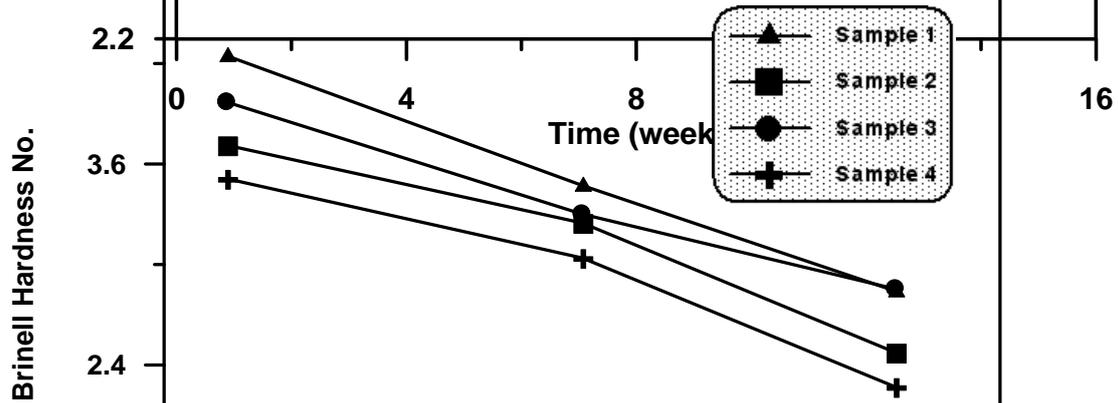
يلاحظ من الشكل (3-28) عند تعرض النماذج لدرجات حرارية مختلفة °C (23,40,55±2) لمدة ساعة واحدة بأن قيم الصلادة قد انحدرت وبشكل متباين لان زيادة درجة الحرارة ادت الى زيادة ليونة المادة بسبب حركة الوحدات الابتدائية وارتخاء الأواصر بينها مما يؤدي الى اضعاف مقاومتها للتخدش والغرز [5].



الشكل (3-26) يوضح تغير قيم صلادة برينل لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لأشعة UV.



الشكل (3-27) يوضح تغير قيم صلادة برينل لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للرطوبة.



الشكل (3-28) يوضح تغير قيم صلادة برينل لنماذج HDPE تبعا لتغير درجة الحرارة.

3-6 اختبار الانضغاطية (Compression Test)

يستخدم هذا الاختبار معرفة أقصى قيمة 40 انضغاط تتحملها المادة البوليميرية عند تعرضها

الى اجهاد خارجي تحت الضغط العمودي Temperature (°C) لقد تمكن العديد من الباحثين من تفسير آلية الفشل الانضغاطي للمواد البوليميرية بالاعتماد على تقنية المسح الالكتروني اذ كانت اغلب البحوث تشير الى تكون حزم عقدية (Kink Bands) تعود الى حدوث الفشل في المواد المتراكبة عندما تتعرض الى الانضغاط المحوري،

وبصورة عامة ان ظاهرة التكد (Kinking) ترتبط بالتركيب البلوري سواء كانت للمعادن او للمواد البوليمرية، فقد اكتشف هذه الظاهرة لأول مرة الباحث (Orowan) عند دراسته التركيب البلوري للكاديوم (Cadimium) التي تعزى الى حدوث الانزلاق البلوري (Crystalline Slip) على امتداد السلسلة البوليمرية الرئيسية ذات الاواصر التساهمية [56]، ومع استمرار زيادة الحمل المسلط بزيادة قطر العينة (في حالة كونها اسطوانية الشكل) نتيجة تأثير بوابسون كما مذكور في الفقرة (5-9-1) الذي يقود الى حدوث تمدد جانبي (Lateral Expansion) يكون موزعاً بصورة منتظمة في كل الاتجاهات من العينة، ومع ان من المنطقي حدوث ذلك عندما تكون القوة الضاغطة المسلطة موزعة بصورة منتظمة على مساحة العينة، الا ان ذلك لا يحدث بسبب الاحتكاك الموجود على سطوح التماس المؤدية الى انعدام التوسع الجانبي الذي يصاحب عملية الانضغاط في سطوح التماس مما يقود الى اتخاذ العينة شكل البرميل (Barrel Shape) ومع الاستمرار بزيادة الحمل المسلط سوف يحدث الفشل في العينة لحظة انبعاج جوانب المادة و تشققها [45].

لقد تبين ان المواد المترابطة ذات الروابط البينية الضعيفة تبدي مقاومة ضعيفة اتجاه الحمل الانضغاطي، ويعزى ذلك الى حدوث الانفلاق الطولي (Longitudinal Splitting) عندما تزداد قوى الشد الجانبية (Lateral Tensile Forces) المتولدة بسبب تمدد بوابسون (Poisson Expansion) وبالتالي زيادة مقاومة الروابط البينية للشد، اما اذا كانت المواد المترابطة ذات روابط بينية قوية فان مقاومة الشد الجانبية سوف تزداد وفي هذه الحالة تكون المادة الاساس متحملة الجزء الاكبر من القوة المسلطة وبما ان التقوية ليست متواصلة فان فشلاً قسماً محلياً سوف يطرأ في المادة الاساس و الذي سيبدأ بنوع من الانبعاج والتشقق، وعندها يبدأ السطح البيني بالانهيار وتفقد المادة الاساس التقوية [1].

لقد تم حساب مقاومة الانضغاط القصوى بتطبيق المعادلة (1.1) للنماذج (1,2,3,4) المحضرة لهذا الاختبار قبل وبعد تعرضها لظروف التجوية وبعدها وتبين الجداول (19,20,21) (الملحق A- ذلك).

يلاحظ من الشكلين (29-3) و (30-3) ان قيم مقاومة الانضغاط القصوى للنماذج (1,2,3,4) قبل تعرضها لظروف التجوية وفي درجة حرارة المختبر 23°C كانت متباينة، فالنموذج (1) يبدي مقاومة انضغاط اكثر من بقية النماذج و ذلك لأرتفاع قيمة كثافته الكتلية والتي تؤدي إلى انتظام السلاسل البوليمرية وبذلك تزداد القوى الجزيئية بين السلاسل البوليمرية فيكون لها مقاومة انضغاط عالية قياساً الى بقية النماذج التي تبدي مقاومة انضغاط قصوى متباينه حيث كلما قلت الكثافة الكتلية للنموذج كانت السلاسل البوليمرية اكثر تباعداً والقوى الجزيئية اقل ترابطاً وبذلك تبدي مقاومة انضغاط اقل [80].

اما بعد تعرض النماذج الاربعة لتأثير اشعة UV التي تمثل احد العوامل المسببة في تكسر الاواصر بتأثير الطول الموجي للمصدر المستخدم [60] حيث ان تأثيرها يختلف من مادة الى أخرى فبالنسبة الى نماذج البولي اثلين عالي الكثافة قيد البحث نلاحظ بان قيم مقاومة الانضغاط القصوى لها قد زادت بعد تشعيها (100) ساعة بسبب مقاومتها لتفاعلات الاكسدة الضوئية ولمدد قصيرة لكون طاقة اشعة UV بمثابة حافز لزيادة التشابك بين جزئيات السلاسل البوليمرية حيث تبدو المادة صلدة [31]، كما لوحظ بان قيم مقاومة الانضغاط القصوى لجميع النماذج كانت مختلفة فيما بينها.

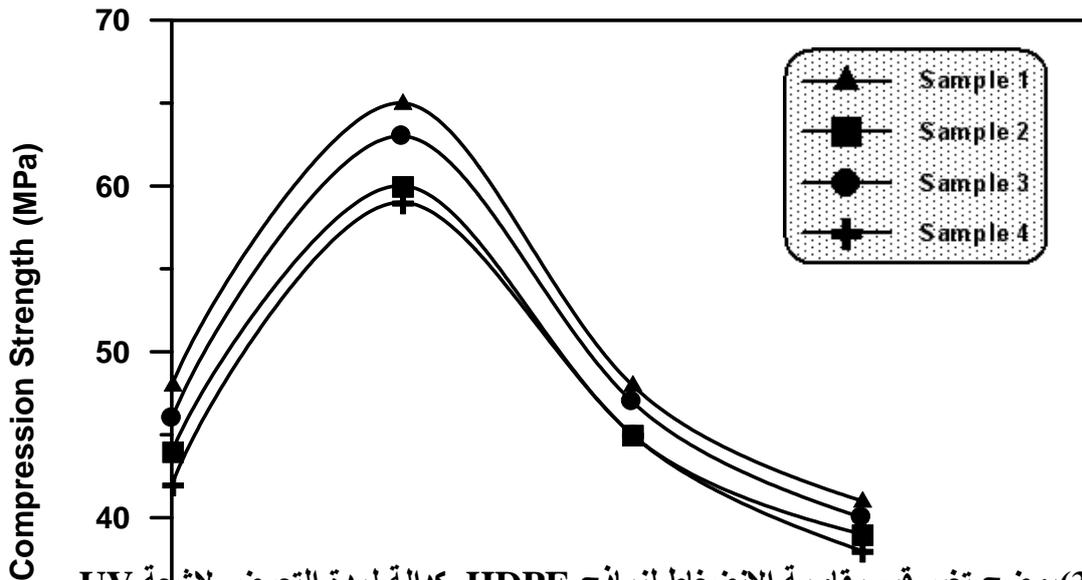
اما بعد مرور (200) و (300) ساعة من التشعيع فان جميع قيم مقاومة الانضغاط القصوى قد انحدرت وبشكل متباين لجميع النماذج وهذا ناتج عن فك الارتباط بين السلاسل البوليمرية ومن ثم تكسرها ويصبح البوليمر غير قادر على تحمل الانضغاط المؤثر ويصبح هشاً [31]. و بذلك تقل جميع قيم مقاومة الانضغاط القصوى.

في حالة غمر النماذج في الماء و بدرجة حرارة المختبر 23°C يلاحظ ان قيم مقاومة الانضغاط القصوى لجميع النماذج قد زادت بعد (4) اسابيع من الترطيب لأن جزئيات الماء

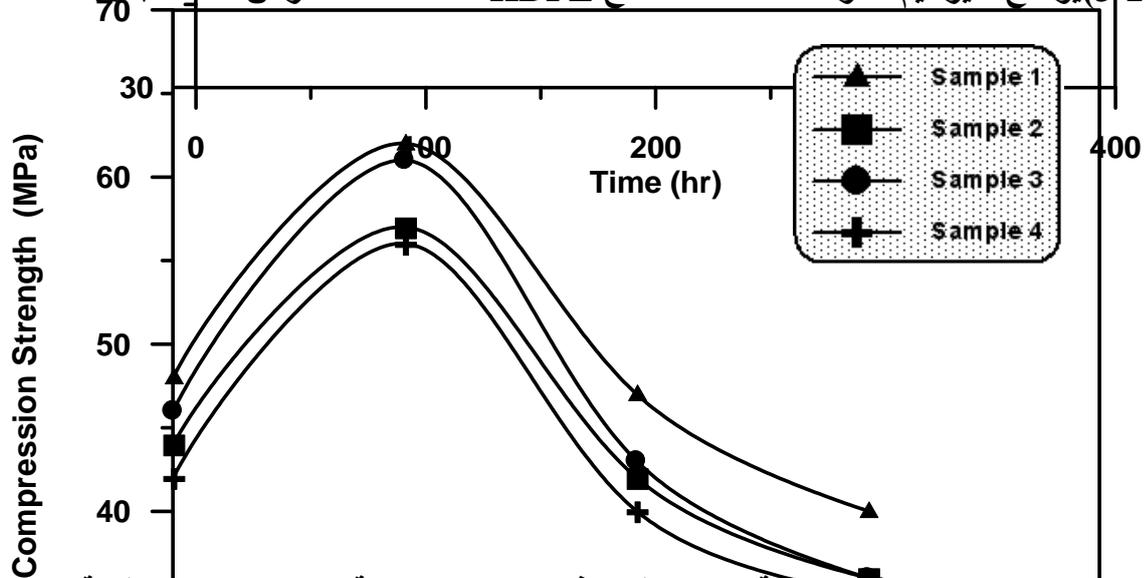
سوف تتغلغل داخل المادة البوليمرية وتشكل طوراً بينياً ما بين المادة الاساس ومنطقة السطح الفاصل بينها وبين مادة التقوية مما يزيد من مقاومة قص الطبقات الداخلية فبذلك تزداد قيمة مقاومة الانضغاط القصوى [60].

أما بعد مرور (8) و(12) أسبوعاً من الترتيب لوحظ انحدار في قيم مقاومة الانضغاط القصوى ولجميع النماذج وبشكل متباين بسبب حدوث الانحلال للمادة البوليمرية نتيجة ضعف قوى الترابط بين السلاسل الجزيئية للمادة الاساس لتغلغل جزيئات الماء في النماذج [56].

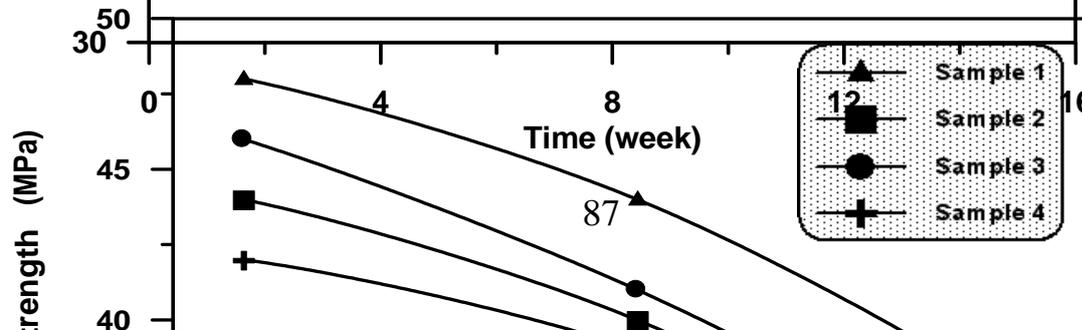
كما يلاحظ من الشكل (3-31) عند تعرض النماذج لدرجات حرارية مختلفة $(23,40,55 \pm 2)^\circ\text{C}$ لمدة ساعة واحدة بان قيم مقاومة الانضغاط القصوى لجميع النماذج أخذت بالانحدار وبشكل متباين من درجة حرارة $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ إلى درجة حرارة $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ حيث ان ارتفاع درجة الحرارة يجعل المادة الاساس اكثر ليونة والتي يساق إليها انخفاض معامل المرونة ومقاومة المادة لحمل الانضغاط [5].



الشكل (3-29) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لاشعة UV



الشكل (3-30) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للرطوبة.



الشكل (3-31) يوضح تغير قيم مقاومة الانضغاط لنماذج HDPE تبعا لتغير درجة الحرارة.

3-7 اختبار الزحف (Creep Test)

اجري هذا الاختبار لدراسة السلوك الميكانيكي وملاحظة الانفعال الذي يبديه كل نموذج من النماذج المحضرة مقابل الزمن المستغرق بالدقيقة تحت تأثير اجهاد ثابت مقداره (8.08)MPa.

لقد وجد ان الزمن المحسوب لكل مادة من المواد المتراكبة ولحين حصول الفشل النهائي يعتمد على عدة عوامل اهمها : مستوى الاجهاد المسلط و درجة الحرارة و التركيب الهندسي و الجزيئي للمادة و طبيعة البيئة المحيطة بها و يضاف الى ذلك طريقة تصنيع المادة، فعند الاجهادات الواطئة يكون معدل الزحف منخفضاً بصورة كافية لجعلها ملائمة للأغراض العملية لفترة غير محددة و من ناحية اخرى تفشل المادة بصورة مباشرة عند الاجهادات العالية و بفترة زمنية قصيرة نسبياً [52].

ان ميكانيكية الفشل المعتمد على الزمن في المواد البوليمرية غير واضحة تماماً، ففي المادة البوليمرية التي تعاني ظاهرة الزحف يصبح الاجهاد عند بعض النقاط فيها ذا قيمة عالية بشكل كاف يسبب حصول الشقوق الدقيقة (Micro-Cracks) التي تتطور بصورة تدريجية حتى حصول الفشل النهائي، لأن الاجهاد في الاجزاء الاخرى (غير المكسورة) من المادة سوف يزداد بمقدار صغير مما يسبب نمواً اضافياً مستقراً (ثابت) للشقوق الدقيقة، لذلك فان التأثيرات المشتركة لكل من الزحف و نمو الشق المستقر خلال فترة زمنية طويلة يسبب الاجهاد الحقيقي (True Stress) في المادة، و عند المرحلة الاخيرة للزحف يصل الاجهاد عند تلك الشقوق الى قيمة عندها يكون المقطع العرضي المتبقي من المادة غير قادر على الثبات و عند تلك النقطة تنمو الشقوق بصورة سريعة جداً، و يعزى سبب ذلك الى التشققات الداخلية المعتمدة على الزمن التي تقود الى الفشل بعد حصول التخصر (Necking)، حيث ان انفعال الزحف في المرحلة الاخيرة سوف يكون متمركزاً حول منطقة الكسر [52].

ان الاشكال (3-32)، (3-33)، (3-34)، (3-35)، (3-36)، (3-37) و (3-38) توضح علاقة (Strain – Time) لجميع النماذج و عند ظروف بيئية مختلفة لأستخراج قيم معدل الزحف (Creep Rate) من ميل المنحني المرسوم بين الانفعال ϵ () و الزمن (t) و هذه القيم مبينة في الجدولين (22 و 23) (الملحق – A).

يلاحظ من الشكل (3-32) ان معدل الانفعال لنماذج البولي اثلين عالي الكثافة (1,2,3,4) قبل تعرضها لظروف التجوية و في درجة حرارة المختبر 23°C كان كبيراً من البداية، ثم يقل تدريجياً و يثبت عند معدل زيادة ثابت تقريباً و تمثل هذه الفترة مرحلة الزحف الثانوي و التي تستغرق فترة زمنية طويلة نسبياً لهذه النماذج.

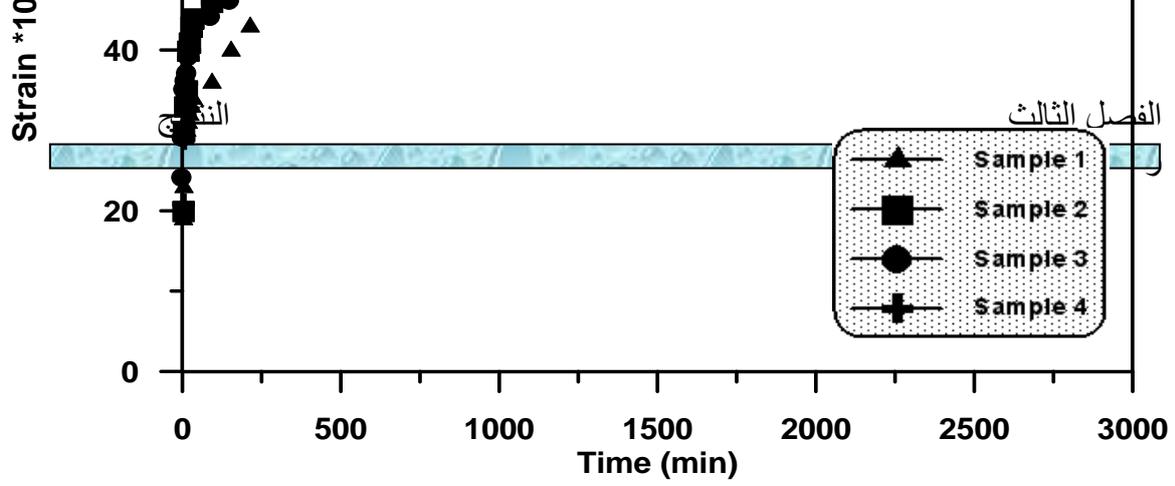
ولوحظ بان قيم معدل الزحف للنماذج الاربعة كانت متباينه فالنموذج رقم (4) كان معدل الزحف له اكبر من بقية النماذج يليه النموذج رقم (2) ثم النموذج رقم (3) و اخيراً النموذج رقم (1) و يعزى ذلك الى الاختلاف في قيم الكثافة الكتلية ، حيث كلما كان النموذج ذا كثافة كتلية عالية كما هو الحال مع النموذج رقم (1) كانت طبيعة السلاسل البوليمرية متقاربة فيما بينها و تزداد القوى الجزيئية بين هذه السلاسل وتبدي مقاومة اكبر وتقل الاستطالة لها عند تسليط الاجهاد عليها، ولذلك كان معدل الزحف لها قليلاً اما النموذج ذو الكثافة الكتلية الاقل كما هو الحال مع بقية النماذج فان طبيعة السلاسل البوليمرية تكون اكثر تباعداً وتقل القوى الجزيئية فيما بينها وتبدي مقاومة اقل وتكبر الاستطالة عند تسليط الاجهاد عليها و لذلك يكون معدل الزحف اكبر [80].

يلاحظ من الاشكال (3-33)، (3-34)، (3-35)، (3-36)، (3-37) و (3-38) عند تعرض النماذج الاربعة لظروف التجوية (اشعة UV والرطوبة) بانه بعد تعرضها لمدة (100) ساعة لاشعة UV أن جميع النماذج يكون معدل الزحف لها اعلى مما كانت عليه قبل التشيع وذلك لزيادة تشابك السلاسل البوليمرية بفعل طاقة الاشعة [31] وان قيم معدل الزحف كانت ايضا متباينة في الزيادة فالنموذج (4) كان الاكثر زيادة يليه النموذج (2) ثم النموذج (3) وأخيرا النموذج (1) ويعزى ذلك الى الاختلاف في قيم الكثافة الكتلية .

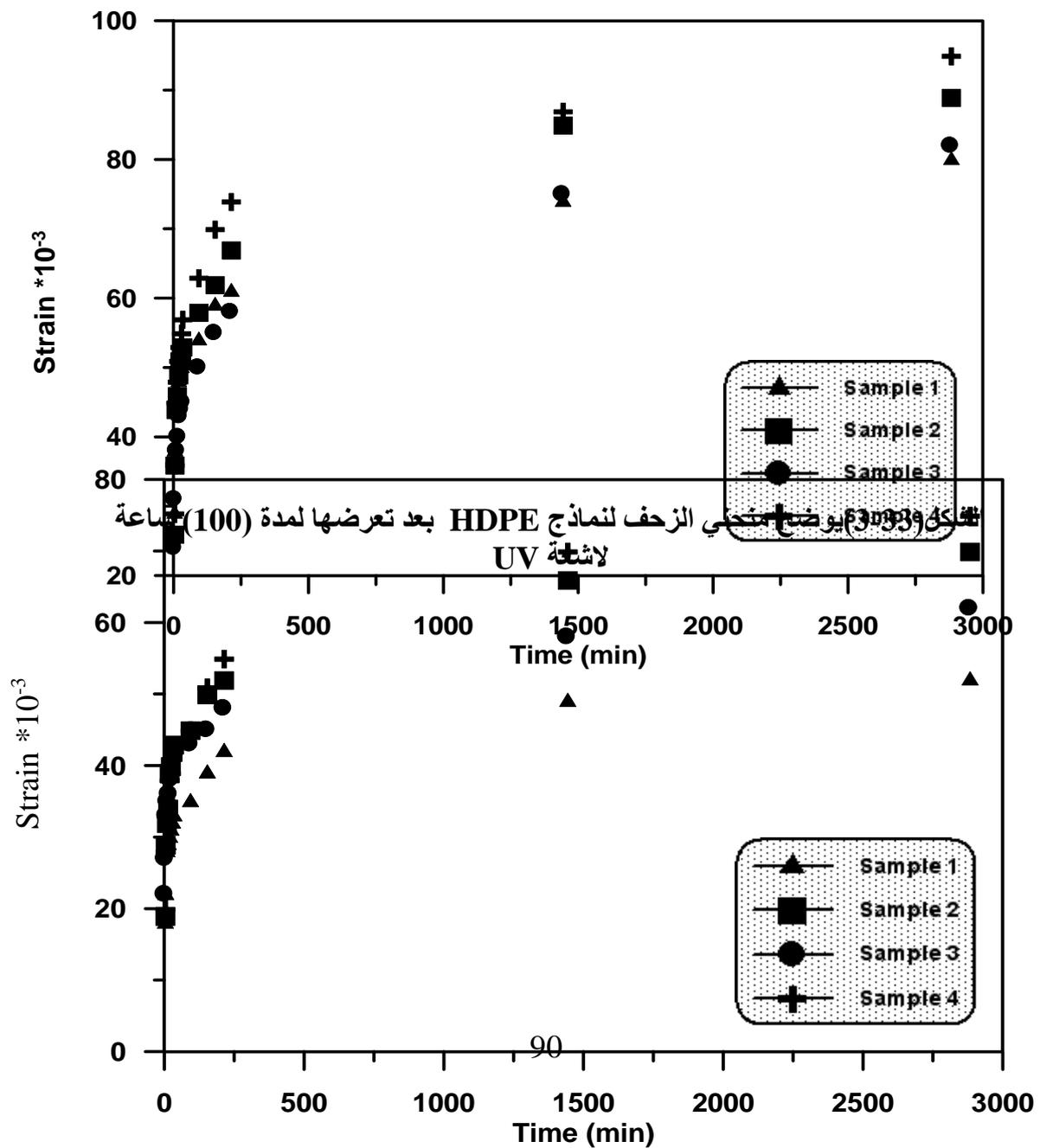
أما بعد مرور (200) و(300) ساعة من التشيع فلوحظ حصول نقصان في قيم معدل الزحف ولجميع النماذج وبشكل متباين أيضا وان سبب هذا النقصان حدث بازدياد زمن التعرض للتشيع حيث تعمل الاشعة على تكسر الاواصر البوليمرية وذلك بفعل الطول الموجي للمصدر المستخدم [13] .

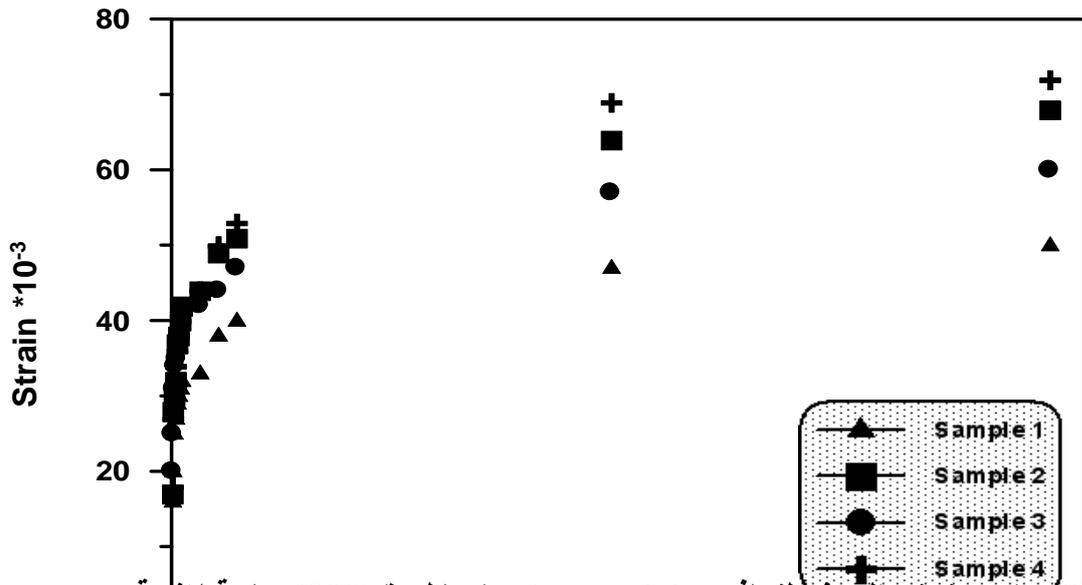
اما بعد غمر النماذج في الماء وبدرجة حرارة المختبر 23°C ولمدة (4) أسابيع من الترطيب فلوحظ زيادة في قيم معدلات الزحف ولجميع النماذج وبشكل متباين أيضا وان سبب ذلك يرجع إلى أن جزيئات كلوريد الصوديوم NaCl الموجودة في الماء سوف تشكل طورا بيبنياً ما بين المادة الاساس ومنطقة السطح الفاصل وبين مادة التقوية مما يزيد مقاومة القصر للطبقات الداخلية وبذلك تزداد قيم معدل الزحف [60].

أما بعد غمر النماذج لمدة (8) و(12) أسبوعاً من الترطيب نلاحظ حصول انحدار في قيم معدلات الزحف و لجميع النماذج و بشكل متباين ايضاً من نموذج لآخر و هذا ناتج من تغلغل جزيئات الماء داخل المادة البوليمرية مما يؤدي الى حدوث ظاهرة الانتفاخ و من ثم انحلال السلاسل البوليمرية و يصبح عندها البوليمر هشاً [56] و يمكن استخراج قيم ثابت الزحف (Creep Constant) لجميع النماذج و باختلاف الظروف البيئية من ميل المنحني المرسوم بين لوغاريتم الانفعال ($\log \epsilon$) مقابل لوغاريتم الزمن ($\log t$) وقد اظهرت النتائج سلوكاً مماثلاً لقيم معدل الزحف (Creep Rate) مما يؤكد حالة التناسب بينهما كما موضح في الاشكال (3-41)، (3-42)، (3-43)، (3-44)، (3-45)، (3-46) و(3-47). والجدولان (24) و(25) (الملحق A) يوضحان تلك القيم .

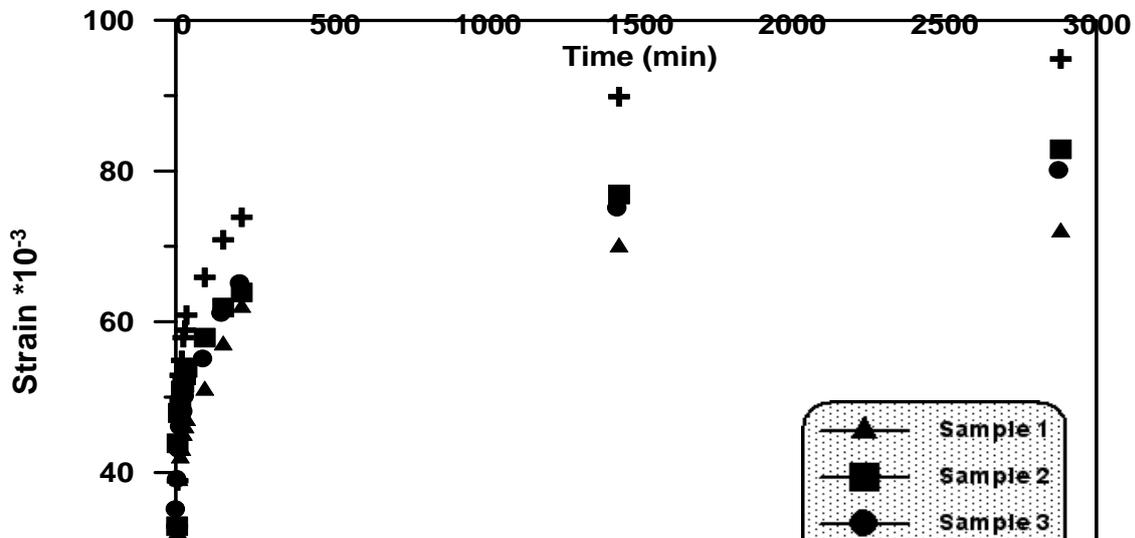


الشكل (3-32) يوضح منحنى الزحف لنماذج HDPE قبل تعرضها لظروف التجوية

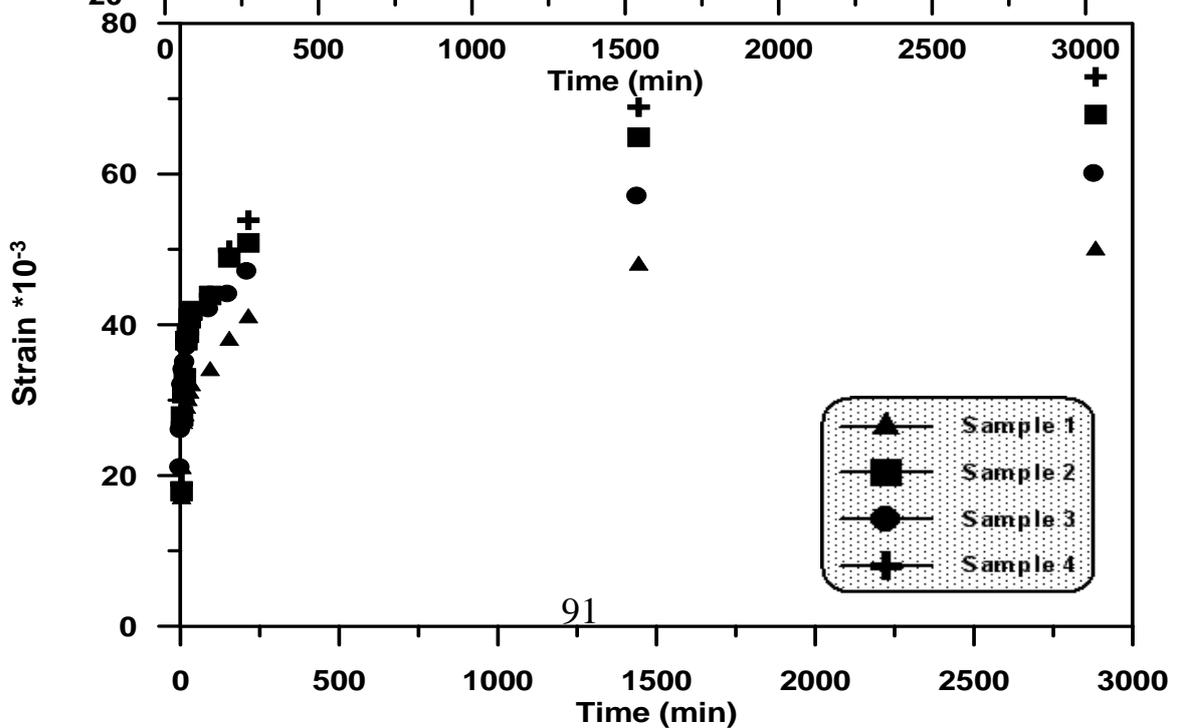




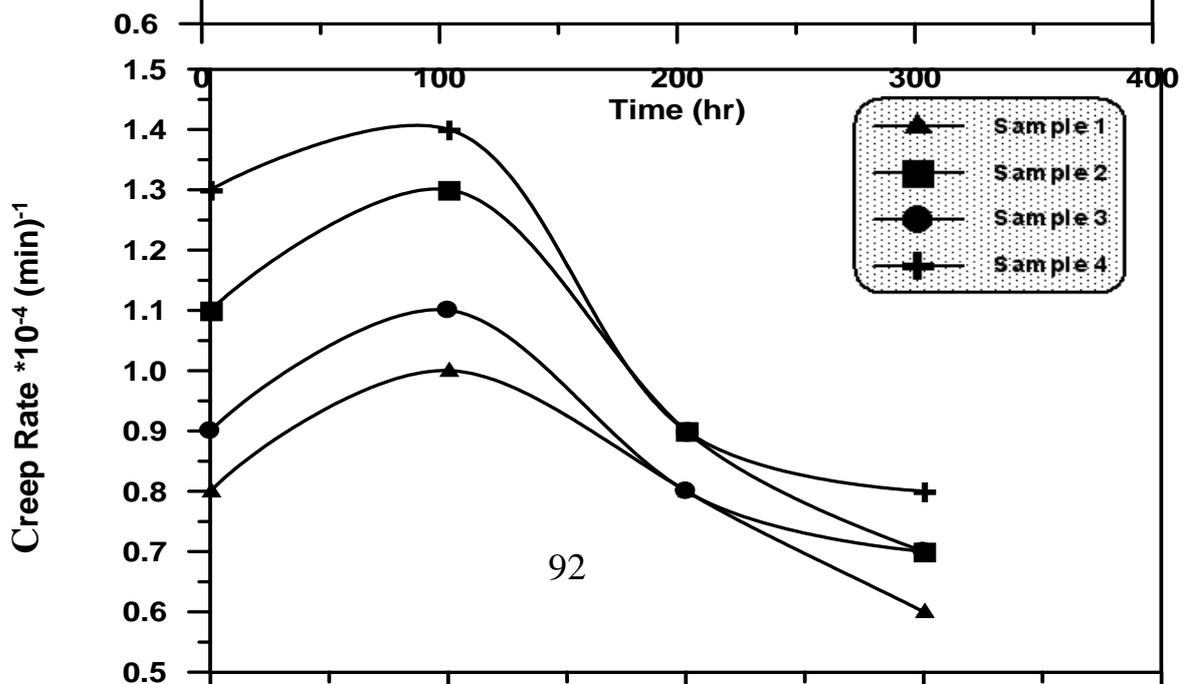
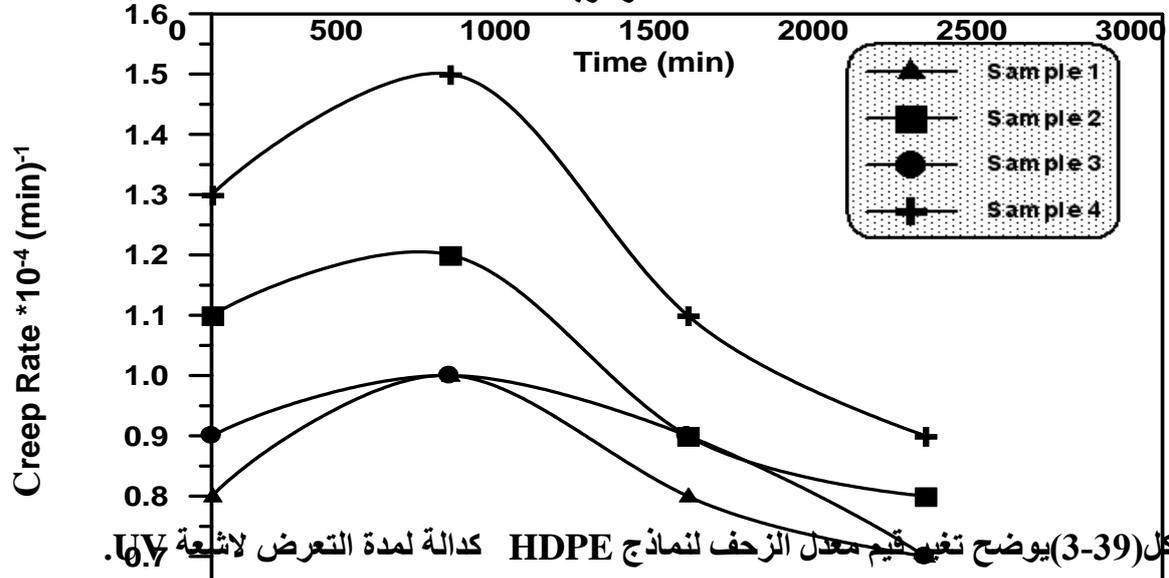
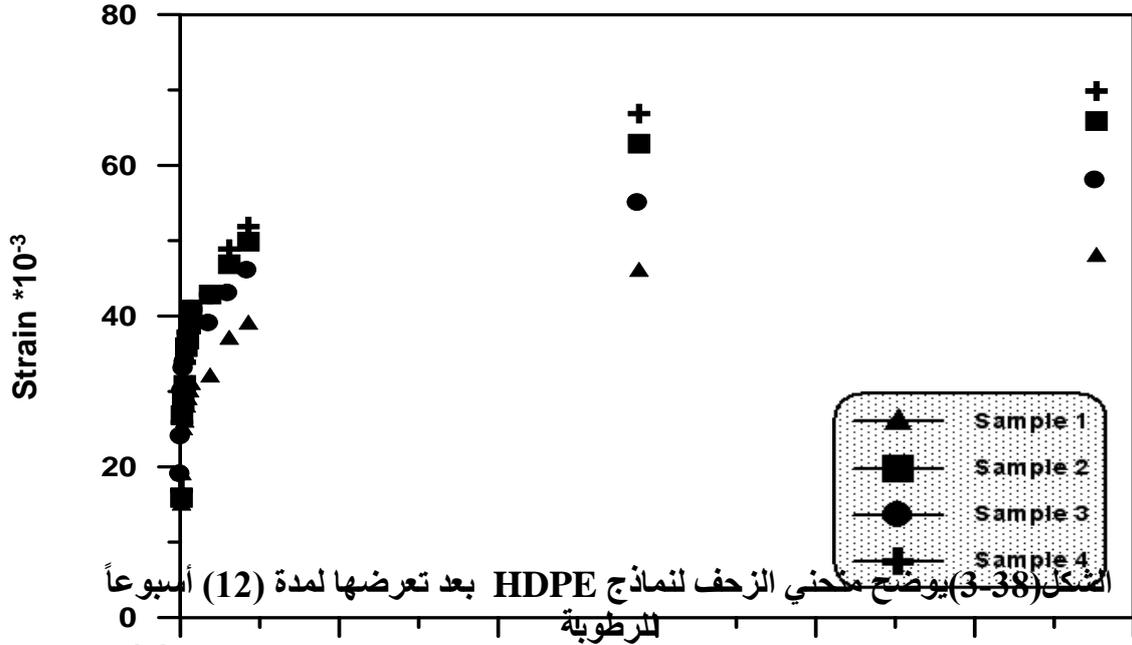
الشكل (3-35) يوضح منحنى الزحف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (300) ساعة لإشعة UV₀



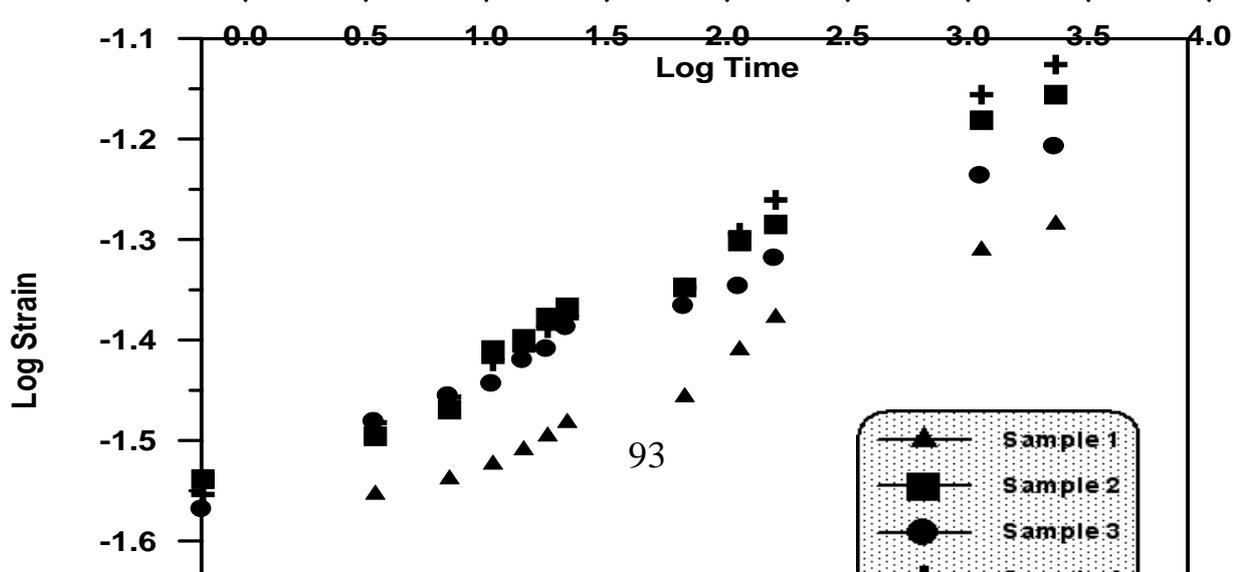
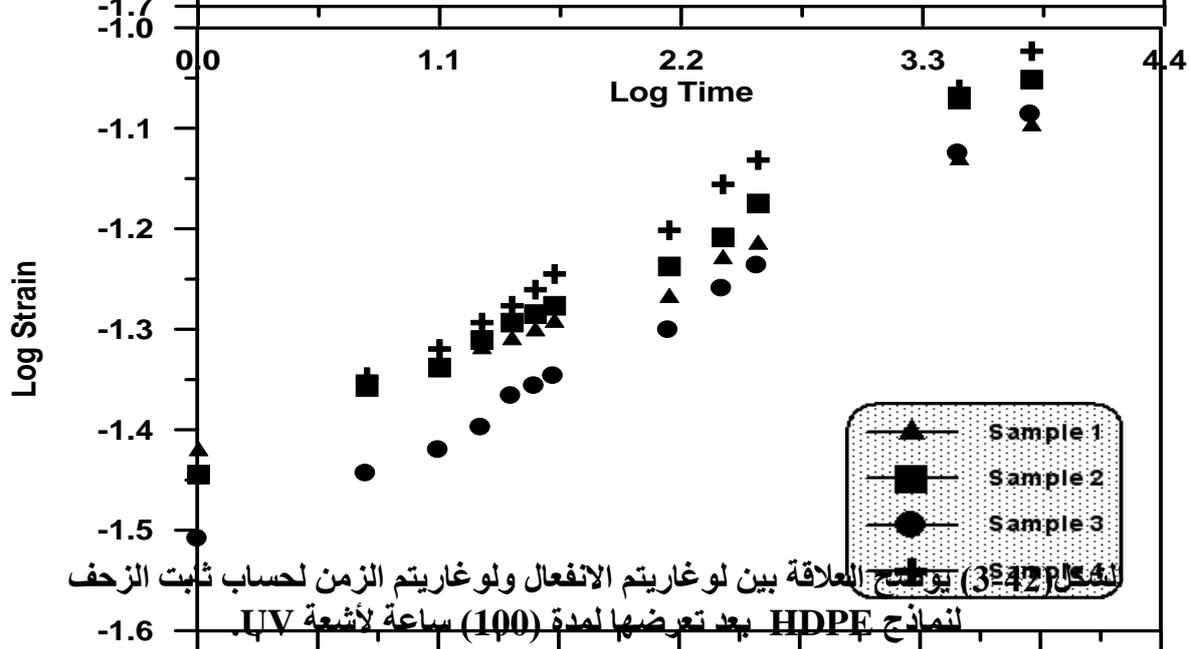
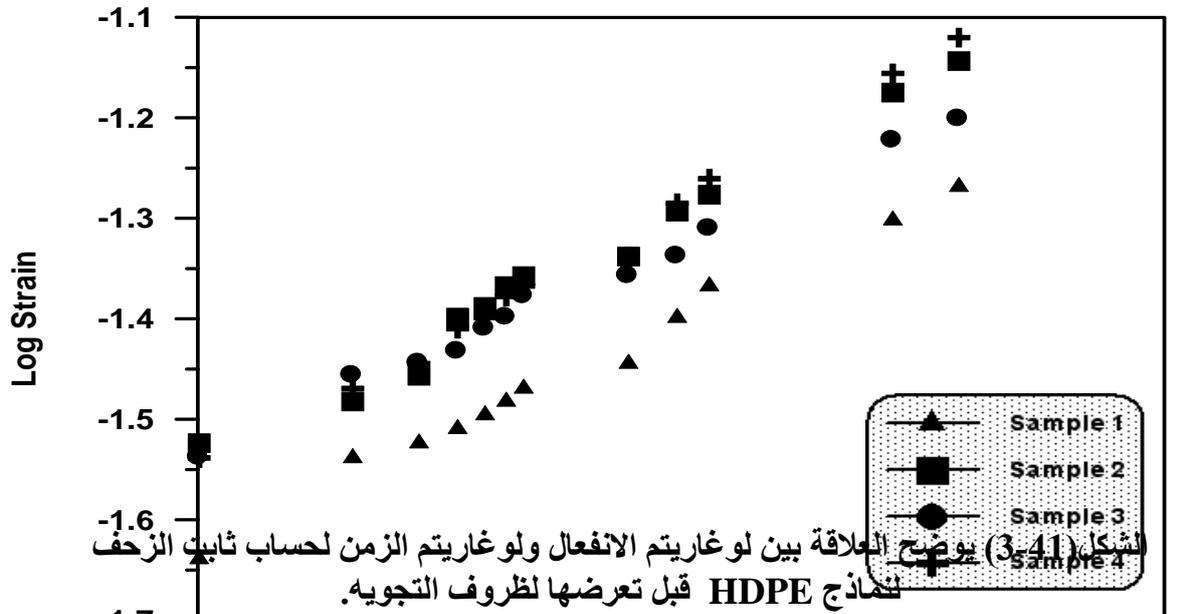
الشكل (3-36) يوضح منحنى الزحف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (400) أسابيع للرطوبة



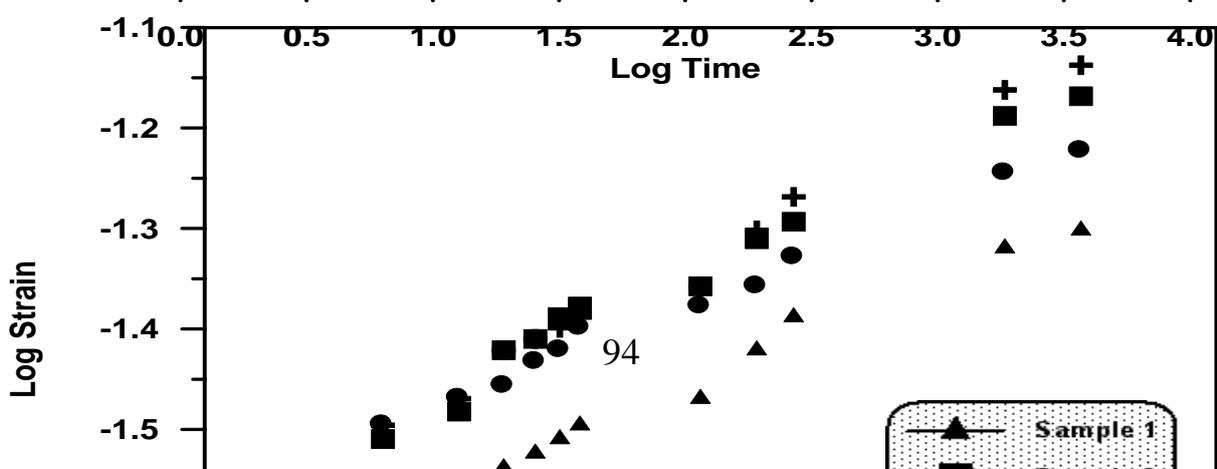
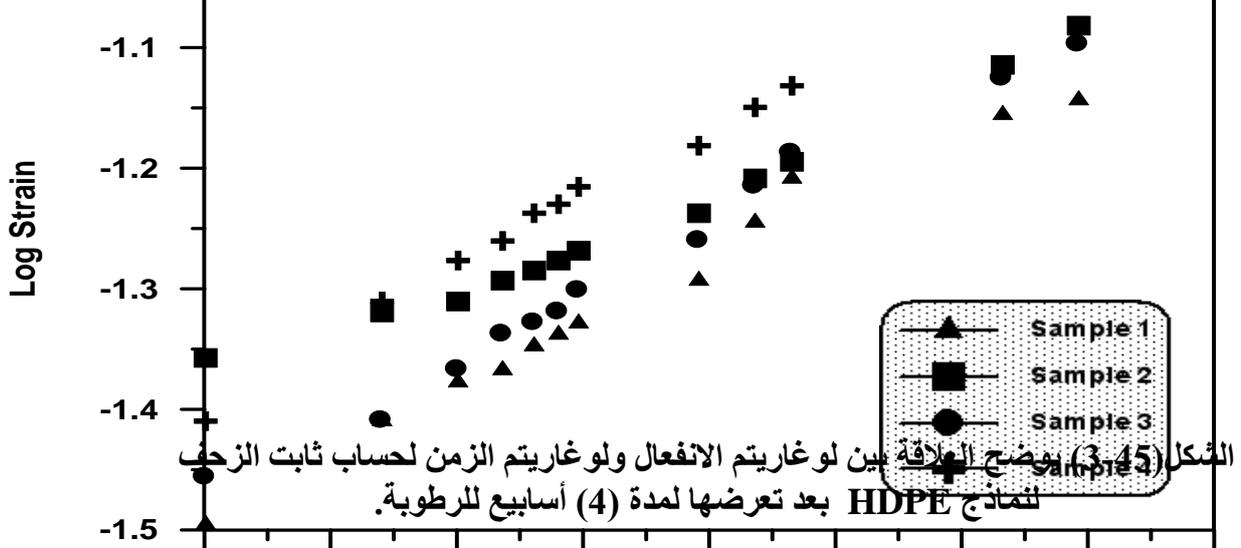
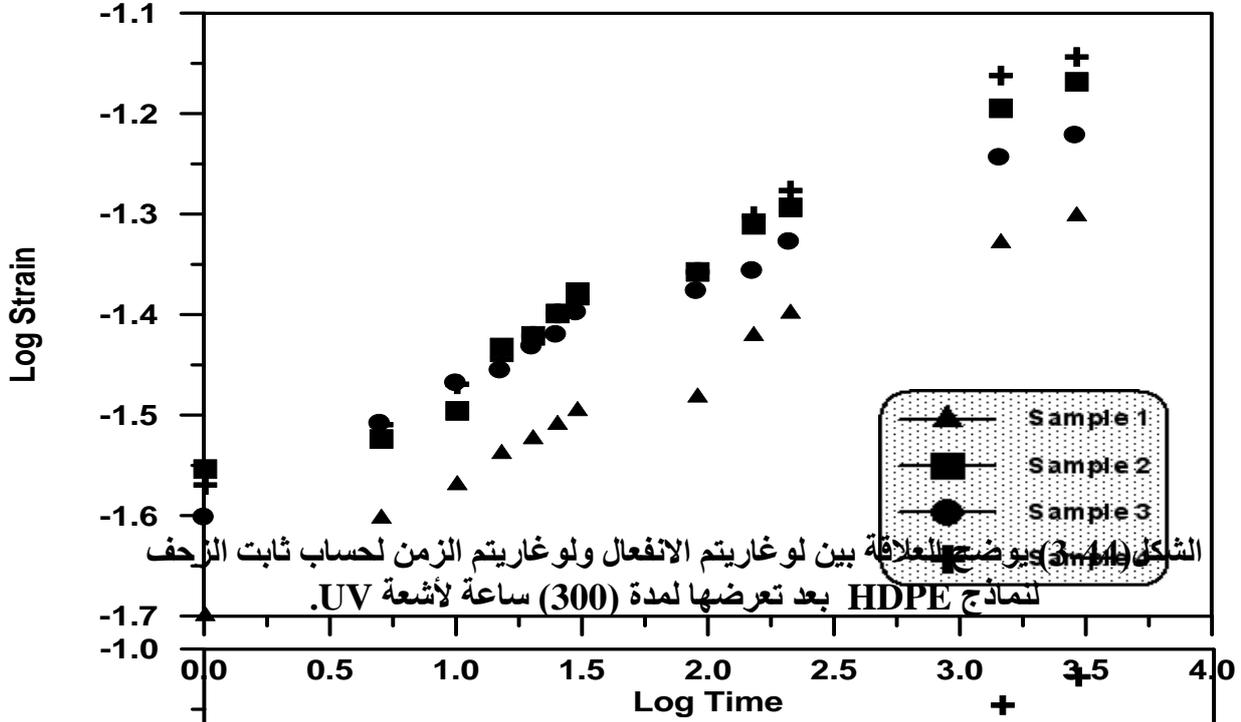
الشكل (3-37) يوضح منحنى الزحف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (8) أسابيع للرطوبة



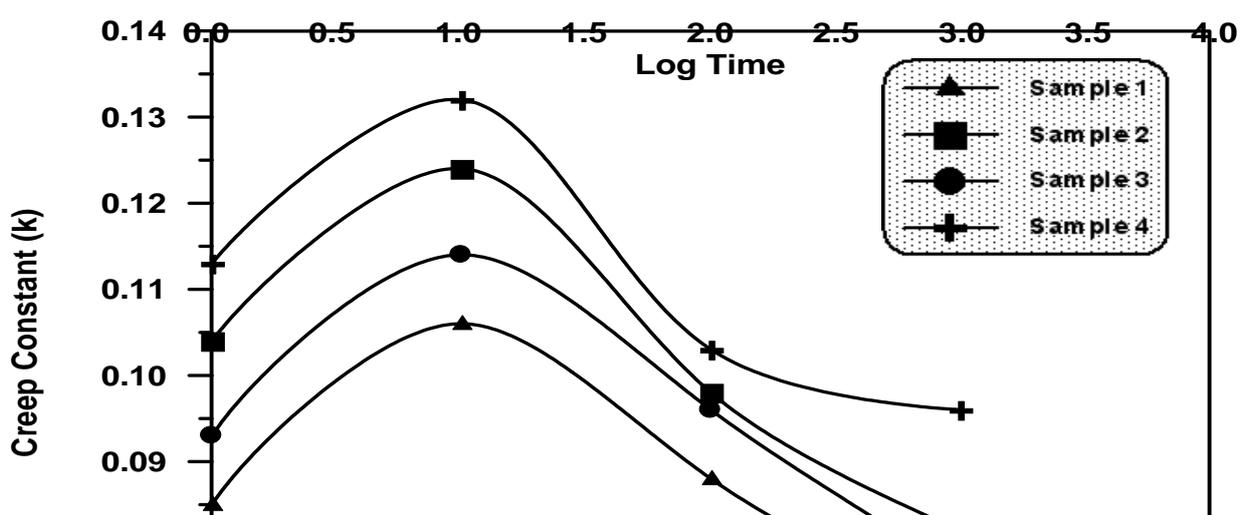
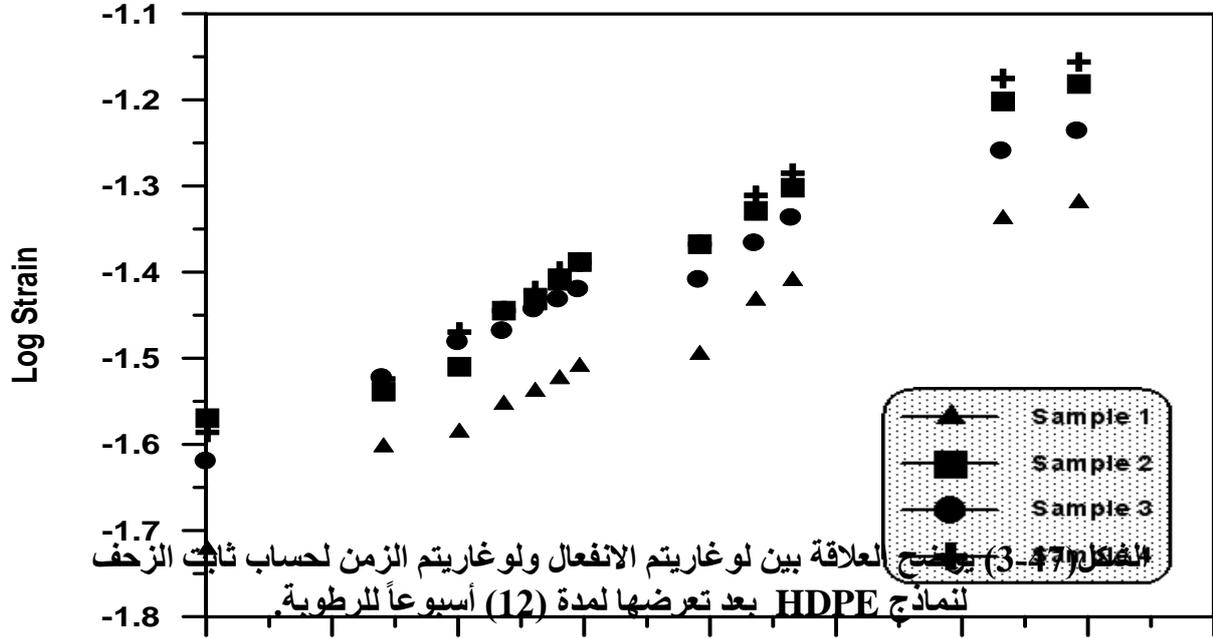
الشكل (3-40) يوضح تغير قيم معدل الزحف لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للرطوبة.



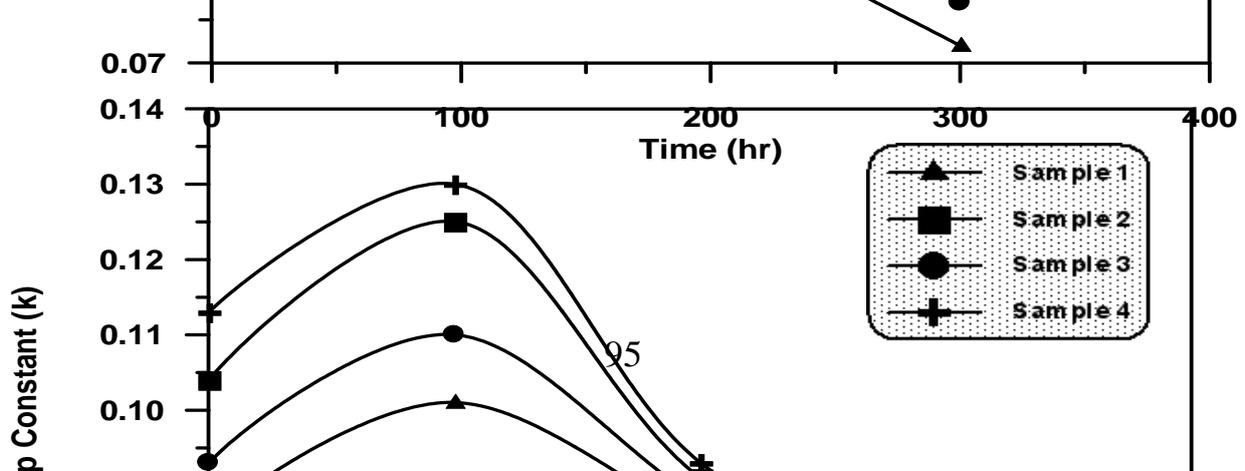
الشكل (3-43) يوضح العلاقة بين لوغاريتم الانفعال ولوغاريتم الزمن لحساب ثابت الزحف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (200) ساعة لأشعة UV.



الشكل (3-46) يوضح العلاقة بين لوغاريتم الانفعال ولوغاريتم الزمن لحساب ثابت الزحف لنماذج HDPE بعد تعرضها لمدة (8) أسابيع للرطوبة.



الشكل (3-48) يوضح تغير قيم ثابت الزحف (k) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض لأشعة UV.



الشكل (3-49) يوضح تغير قيم ثابت الزحف (k) لنماذج HDPE كدالة لمدة التعرض للرطوبة.

3-8 اختبار الموصلية الحرارية

(Thermal Conductivity Test)

أن المفهوم الفيزيائي للتوصيل الحراري هو انتقال الطاقة من جسم الى آخر بآليات مختلفة ففي المواد الصلبة يتم انتقال الحرارة من موقع الى آخر بالاعتماد على آلية التوصيل عن طريق الفونونات (Phonons) او الالكترونات (Electrons) او كلاهما تبعاً لنوع المادة الصلبة التي نتعامل معها، واستناداً الى ذلك نجد ان المواد الصلبة الفلزية الخالية نسبياً من العيوب و كذلك المواد شبه الموصلة ان التوصيل الحراري فيها يتم بالفونونات والالكترونات، حيث أن الالكترونات الحرة في هذه المواد لها دور رئيسي في التوصيل الحراري بينما تذبذب الجزيئات والذرات له دور ثانوي في نقل الطاقة الحرارية، يفهم من ذلك ان التوصيل الكهربائي العالي لهذه المواد هو السبب في توصيلها الحراري العالي، أما التوصيل الحراري في المواد الصلبة العازلة كهربائياً فيكون بالفونونات التي تعد الناقل الوحيد للطاقة الحرارية، و من الجدير بالذكر ان الفونونات تؤدي دوراً رئيسياً في عملية التوصيل الحراري لجميع المواد الصلبة عند الدرجات الحرارية العالية [47].

ولكي نستكمل الصورة التي قدمتها المعلومات الواردة اعلاه عن المواد الصلبة ذات العزل الكهربائي، تم حساب قيم الموصلية الحرارية (Thermal Conductivity) لجميع النماذج المهيئة لهذا الغرض باستخدام العلاقتين (1.13) و (1.14) والجداول (26,27,28) (الملحق A-) تبين تلك القيم و لجميع النماذج .

يلاحظ من الشكلين (3-50) و (3-51) بان قيم الموصلية الحرارية للنماذج (1,2,3,4) في درجة حرارة المختبر 23°C وقبل تعرضها لظروف التجوية كانت متباينة بسبب اختلاف قيم الكثافة الكتلية لها.

اما بعد تعرض النماذج لأشعة UV لمدة (100) ساعة لوحظ زيادة قيم الموصلية الحرارية لها وبشكل متباين بسبب حدوث عملية استكمال التقسية التي تقود الى زيادة كثافة الترابط التشابكي وكما موضح سابقاً [31].

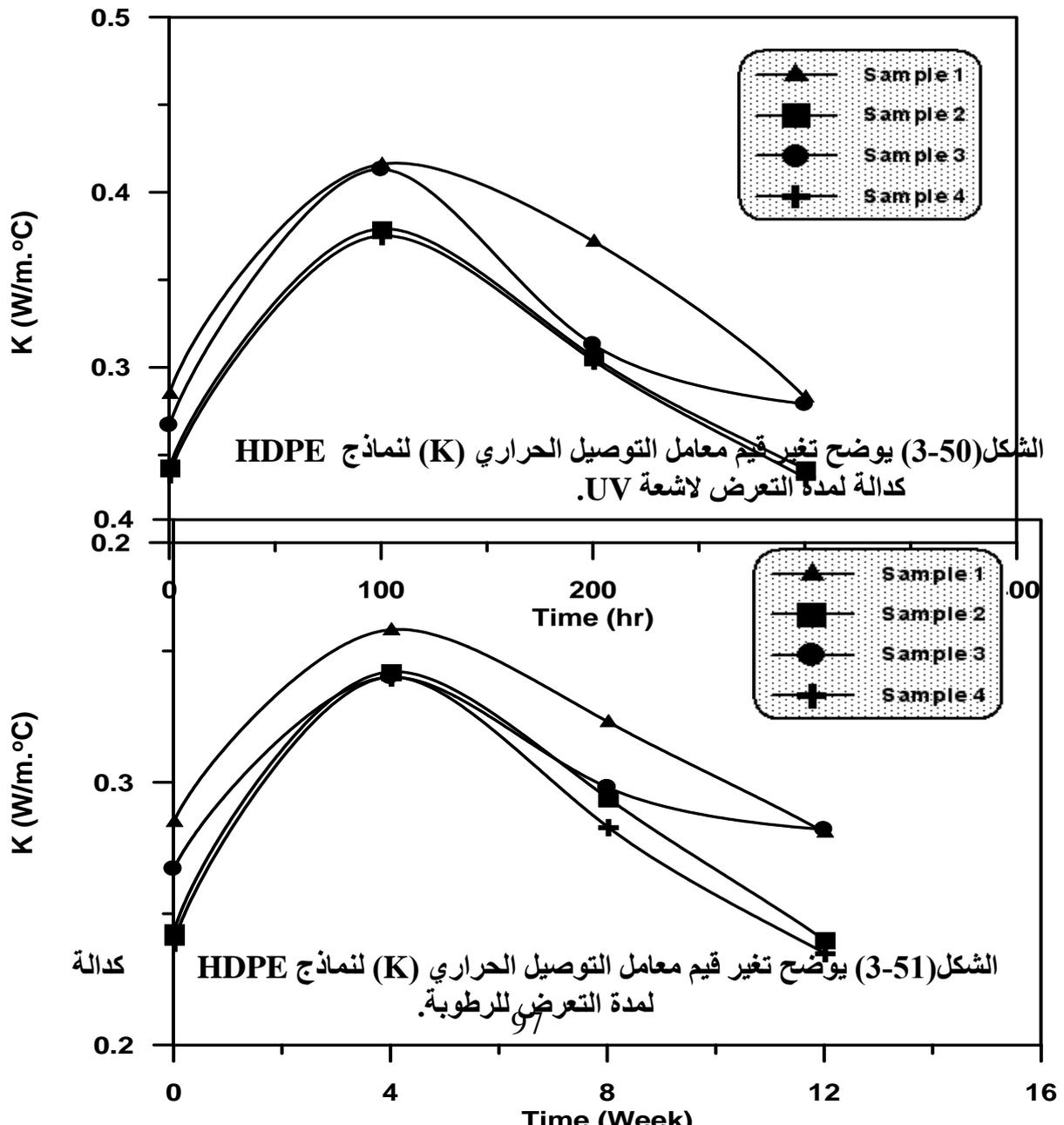
اما بعد مرور (200) و (300) ساعة من التشعيع فان جميع قيم الموصلية الحرارية قد انحدرت وبشكل متباين لجميع النماذج وهذا ناتج من فك الارتباط بين السلاسل البوليميرية ومن ثم تكسر اواصرها [60].

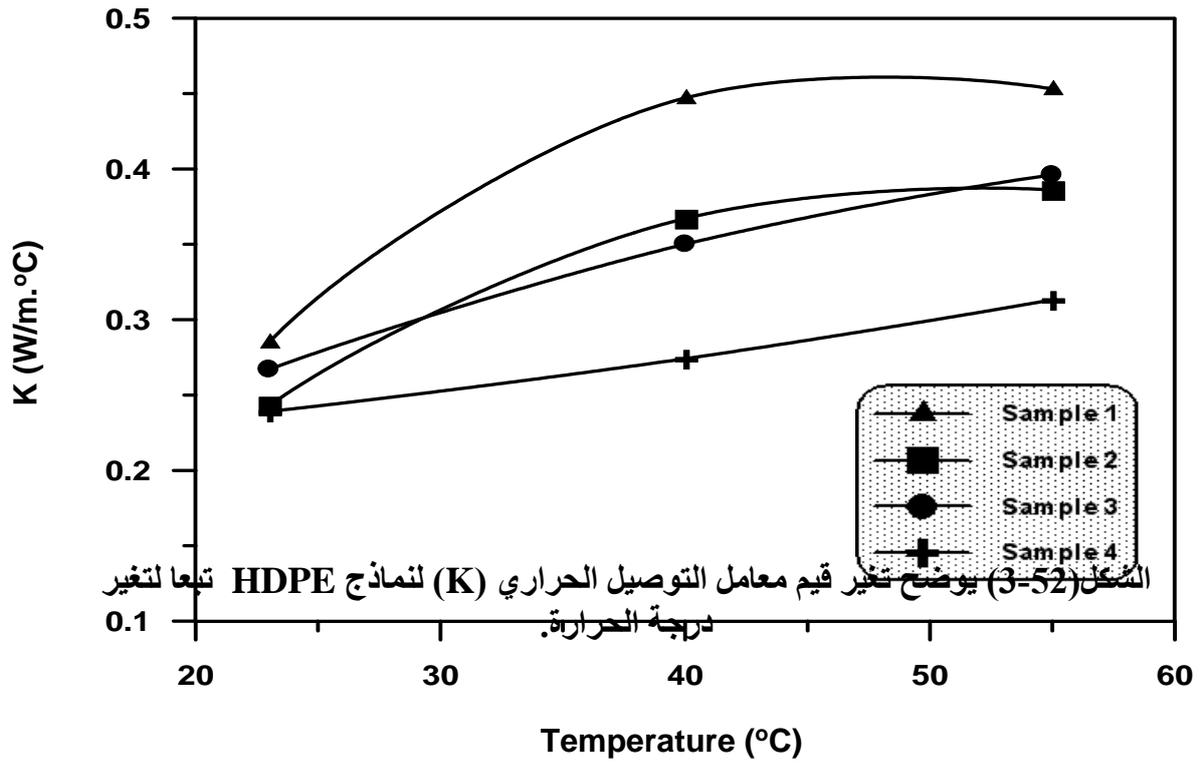
وفي حالة غمر النماذج في الماء وبدرجة حرارة المختبر 23°C لوحظ ان قيم الموصلية الحرارية لجميع النماذج سوف قد زادت بعد (4) اسابيع من الترطيب ويعزى هذا الى حدوث عملية استكمال التقسية وزيادة قوة الترابط بين السلاسل الجزيئية للمادة الاساس [56]، حيث كانت هذه القيم متباينة لجميع النماذج بسبب اختلاف قيم الكثافة الكتلية لها.

اما بعد (8) و(12) اسبوع من الترتيب لوحظ انحدار في قيم الموصلية الحرارية ولجميع النماذج بسبب ان زيادة زمن التعرض للماء يؤثر في تماسك جزيئات سطح المادة وبالتالي تؤدي الى ضعف المادة و تحللها [31].

يلاحظ من الشكل (3-52) عند تعرض النماذج لدرجات حرارية مختلفة لدرجة حرارة لجميع النماذج، وقد يعزى التحسن في القيم عند درجة حرارة $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ الى حدوث عملية استكمال التقسية التي تقود الى زيادة كثافة الترابط التشابكي كما موضح سابقاً ومع ارتفاع درجة الحرارة الى $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ استمرت الزيادة في القيم ولجميع النماذج وبشكل متباين ويمكن تفسير ذلك استناداً الى النظرية الحركية للجزيئات التي تشير الى ان جزيئات المادة دائمة الحركة وتزداد هذه الحركة اذا ارتفعت درجة الحرارة [56].

كما نعرف ان الاجسام تشع طاقة حرارية عندما تكون ساخنة والطاقة هذه تشع بشكل موجات كهرومغناطيسية وهي تمتص من الاجسام الاخرى وتتحول الى طاقة فيها وهذا ما حدث مع النماذج عند ارتفاع درجة حرارة المحيط لأن جزيئات المادة بامتصاصها الطاقة الحرارية سوف تزيد من سعة ذبذباتها حول موضع الاتزان وبتصادمها مع ما يجاورها من الجزيئات تكتسب تلك الجزيئات المجاورة لها طاقة تجعلها تنذبذب بسعة اكبر مما كانت عليه وبتصادم هذه الجزيئات بدورها مع ما يجاورها من الجزيئات الاخرى تكسبها طاقة وهكذا نرى ان الحرارة تنتقل عن طريق ذبذبة الجزيئات من دون انتقالها من موضع الاتزان [47].





الفصل الرابع

Chapter Four

الاستنتاجات والتوصيات

Conclusions and Recommendations

Conclusions

4-1 الاستنتاجات

من نتائج إجراء البحث حول تأثير الظروف البيئية (الأشعة فوق البنفسجية والرطوبة ودرجة الحرارة) في متراكبات البولي اثلين عالي الكثافة المدعم باسود الكاربون تم التوصل الى الاستنتاجات التالية :

- 1- هنالك زيادة في قيم الخواص الميكانيكية والحرارية والمتمثلة بـ (الشد، معامل المرونة، متانة الانحناء، اجهاد القص، مقاومة الصدمة، الصلادة، الانضغاطية، الزحف ومعامل التوصيل الحراري) بعد تعرض النماذج لمدة (100) ساعة لأشعة UV بطول موجي مقداره (320)nm وشدة إشعاعية مقدارها 2.3 W/m^2 عما هي عليه قبل التأثير، لكن لوحظ حصول انحدار في قيمها بعد مرور (200) و(300) ساعة من التشعيع.
- 2- هنالك زيادة في قيم الخواص المذكورة اعلاه بعد تعرض النماذج للرطوبة لمدة (4) اسابيع وفي درجة حرارة المختبر 23°C عما هي عليه قبل التأثير، لكن حصل نقصان في قيم هذه الخواص بعد زيادة فترة الترتيب لمدة (8) و(12) أسبوعا على التوالي.
- 3- هنالك نقصان في قيم الخواص المذكورة أعلاه بعد رفع درجة الحرارة من 23°C إلى 40°C ثم إلى 55°C عدا مقاومة الصدمة ومعامل التوصيل الحراري فهنالك زيادة في قيمها مع زيادة درجة الحرارة.
- 4- إن تأثير الظروف البيئية (الأشعة فوق البنفسجية والرطوبة ودرجة الحرارة) في قيم الخواص الميكانيكية والحرارية للنماذج كان مختلفا، إذ أن تأثير درجة الحرارة 55°C كان أكثر من تأثير الرطوبة لمدة (12) أسبوعا وهذا بدوره أكثر من تأثير أشعة UV بطول موجي مقداره (320)nm وشدة إشعاعية مقدارها 2.3 W/m^2 لمدة (300) ساعة.
- 5- إن أفضل النماذج لتحمل ظروف التجويه المدروسة كان النموذج البلجيكي يليه النموذج الفرنسي ثم النموذج الدانمركي وأخيرا النموذج الإماراتي في مجمل الاختبارات الميكانيكية والحرارية عدا اختبار مقاومة الصدمة حيث كانت الأفضلية للنموذج الإماراتي يليه الدانمركي ثم الفرنسي وأخيرا النموذج البلجيكي.
- 6- يعد النموذج البلجيكي هو النموذج الافضل في تحمل ظروف التجويه العراقية والتي تتمثل بشدة اشعاعية مقدارها 2.3 W/m^2 لمدة (300) ساعة ورطوبة لمدة (12) اسبوعا ودرجة حرارة تصل الى 55°C .

Recommendations

4-2 التوصيات

- 1- مد انابيب الري بالرش في مناطق الظل وفي اعماق لا تقل عن (10) سم عن مستوى سطح التربة.

- 2- مراعاة درجات حرارة التلدين والصهر وزمنه في اثناء عمليات الصب بالبتق المستخدمة في صناعة الأنابيب.
- 3- دراسة تقنية الصب العراقية في ضوء مواصفات عالمية دقيقة بالاتصال مع خبراء في هذا المجال.
- 4- دراسة نماذج من البولي اثيلين عالي الكثافة المدعم باسود الكربون من منافذ عالمية اخرى لاختبارها في الاجواء العراقية.
- 5- دراسة الخواص الميكانيكية والحرارية في نماذج من اللدائن الاخرى (LDPE,PVC) واختبار تأثير الظروف البيئية عليها.
- 6- دراسة تأثير انواع المياه المعدنية (الجوفية) في الخواص الميكانيكية والحرارية للأنابيب قيد الدراسة.
- 7- دراسة تأثير زيادة زمن التجويه في الأنابيب قيد الدراسة.

References

المصادر

- [1] M.O.W. Richarson, "Polymer Engineering Composites", Applied Science Published LTD, London, (1977).
- [2] United Nations Industrial Development Organization, "Advances in Material Technology: Monitor", Issue N0.5, P.(59-61), December (1985).
- [3] G.Lubin, "Hand Book of Fiber Glass and Advanced Plastics Composites", Litton Educational Co. New York, (1969).
- [4] فريد بليمير، "أساسيات علم البوليمر"، ط2، ترجمة د. صلاح محسن عليوي، جامعة الموصل، كلية العلوم، (1971).
- [5] R.J. Crawford, "Plastics Engineering", 2nd Edition, Pergamon Press, New York, (1987).
- [6] V.K. Tewary, "Mechanics of Fiber Composites Materials", Wiley Eastern Limited, New Delhi, (1978).
- [7] D. Hull, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge University Press, First Published in (1981).
- [8] N. Butter, "Plastic Materials ", 3rd Edition, Worth Grope-England- Brydson, (1975).
- [9] A. Davis, "Weathering of Polymers ", Applied Science Pub., (1983).
- [10] Microsoft, Encarta, "Composite Materials", Encyclopedia, (2000).
- [11] J. Morton and E.W. Godwin, "Gomposite Structures ", Vol.13, No.1, PP. (1-5), (1989).
- [12] د. كوركيس عبد آل آدم ود. حسين علي كاشف الغطاء، "تكنولوجيا وكيمياء البوليمرات"، جامعة البصرة، كلية العلوم، (1983).
- [13] أنا.أ. تاكر، "الكيمياء الفيزيائية للبوليمرات"، ترجمة د. اكرم عزيز محمد، جامعة الموصل، (1984).
- [14] مالكولم. ب. ستيفنسين، "كيمياء البلمرة"، ترجمة د. قيس عبد الكريم إبراهيم ود. كاظم غياض اللامي، جامعة البصرة، كلية العلوم، (1984).
- [15] زياد العبادي "دراسة تأثير اشعة كما على الخصائص الفيزيائية لبولي ستايرين" رسالة ماجستير، جامعة بغداد - كلية التربية الثانية - ابن الهيثم، (1995).
- [16] د. ذنون محمد عزيز بيربادي و د. كوركيس عبد آل آدم، "كيمياء الجزئيات الكبيرة"، جامعة بغداد، كلية العلوم (1989).
- [17] Jown Weeton and Dean M. Peters, "Engineers Guide to Composite Materials," Published by American Metals, (1987).
- [18] Lawrence. E. Nielsen, "Dynamic Mechanical Properties of Polymers Filled with Agglomerated Particles," J. Of Polymers Sci., Vol. 17, No.11, PP. 1898, (1978).
- [19] P. Ghosh and N. Bose, "Journal of Applied Polymer Science," Vo1.58, PP. (2177-2184), (1995).

- [20] M.M. Schwarts, "Composite Materials," Hand Book, Mc. Graw- Hill Co., (1984).
- [21] احمد علي مكي ، "دراسة الخواص الميكانيكية لمواد مركبة باستخدام مسحوق معدني" ، رسالة ماجستير ، الجامعة التكنولوجية ، قسم هندسة المكائى والمعدات (2001).
- [22] د. اكرم عزيز محمد ، "كيمياء اللدائن" ، جامعة الموصل ، كلية العلوم ، (1993).
- [23] W. Bolyon, "Engineering Materials Technology ", 3rd Edition Butter Worth- Heinemann, (1998).
- [24] Schwartz Good man, "Plastics Materials and Processes ", Van Nostrand Rein hold, (1982).
- [25] L. Holiday, "Composite Materials ", Elsevier Publishing, London, (1966).
- [26] R.P. Sheldon, "Composite Polymeric Materials", School of Materials Science Publishing, London, (1982).
- [27] د. محمد زهير الحمصي، "موسوعة اللدائن"، مطبعة الهندي، دمشق، سوريا، (1981).
- [28] B. Michael, "Encyclopedia of Material Science and Engineering", Vol.5, (1989).
- [29] M. Mickel and P. Groover, "Fundamental and Modern Manufacturing ", Published by Mc Graw- Hill, (1996).
- [30] P.A. Thornton and V.J. Colangelo, "Fundamentals of Engineering Materials ", Prentic- Hall, Inc., (1985).
- [31] بلقيس محمد ضياء، "تصنيع ودراسة خواص مواد بوليمرية مركبة"، رسالة دكتوراه، الجامعة التكنولوجية، قسم العلوم التطبيقية ، (1996).
- [32] سلوان بهنام عبد الأحد، "دراسة الخواص الميكانيكية باستخدام الياف الزجاج والكفلر"، رسالة ماجستير ، الجامعة التكنولوجية ، قسم المكائى والمعدات (1998).
- [33] زيجينيف، د. ستروذييسكي، "طبيعة وخواص المواد نظام SI ترجمة عواد الزحلف الجزء الأول، الطبعة الثانية، مؤسسة جون ويلي وأولاده، لندن، (1985).
- [34] حسين محمد الخفاجي ، "دراسة الخواص الميكانيكية للمواد المركبة المقواة بقشور الالمنيوم" ، رسالة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، قسم هندسة المكائى والمعدات، (1999).
- [35] M.A. Meyers and K.K. Chawla, "Mechanical Behavior of Materials ", Prentice Hall, (1999).
- [36] A.A. Berlin, S.A. Volfson," Principle of Polymer Composites ", Springer-Overflag, New york, (1986).
- [37] K.K. Chawla, "Composite Material ", Springer- Verlag, New York, Printed in Germany, (1987).
- [38] G. Piatti, "Advances in Composite Materials ", Applied Science Publishers LTD, London, (1978).
- [39] David. J. Green, "Fracture of Brittle Particulate Composite ", Journal of Materials Science, Vol. 14, PP. (1657-1661), (1979).
- [40] F.Michael Asby and R.H. David Jones, "Engineering Materials", 1st Edition Pergamon Press LTD, U.K., (1986).

- [41] محمد احمد عبد الباهلي، "تكنولوجيا عراقية لانتاج وتقييم سبائك جديدة للبولي ايثيلين وتطبيقاتها في تغليف اقطاب الكرافيت والسطوح المقاومة للمواد المسببة للتآكل"، رسالة ماجستير، جامعة البصرة، كلية العلوم، (2001).
- [42] M.P. Stevens, "Polymer Chemistry- An Introduction ", 3rd ed. Oxford University Press, Oxford, (1999).
- [43] H.G. Elias, " Macromolecules : Synthesis and Material ", Plenum Press, N.Y., (1977) .
- [44] هيثم رزوقي صالح، "دراسة خواص المواد البوليمرية المقواة بدقائق الألمنيوم" رسالة ماجستير ، الجامعة التكنولوجية ، قسم هندسة الانتاج والمعادن، (2002).
- [45] H.S. Kaufman, " Introduction to Polymer Science and Technology: SPE Text Book ", John Wiley and Sons, New York, (1977)
- [46] M.D. Baijal, "Plastics Polymer Science and Technology," John Wiley and Sons, New York, (1982).
- [47] إبراهيم شريف إبراهيم "الحرارة وخواص المادة والصوت"، منشورات دارالراتب للأبحاث الجامعية، بيروت، لبنان، (1983).
- [48] C.A. Harper, "Hand Book of Plastic and Elastomers ", Mc Graw -Hill Co., (1975).
- [49] G.C. Shin and L. J. Ebert, "Composites", Vol. 17, No.4, pp. (309-320), October (1986).
- [50] W. E. Driver, "Plastics Chemistry and Technology ", published simultaneously in Canada by Van Nostrand Reinhold LTD, (1979).
- [51] G. Tolf and P.Clarin, "Fiber science and Technology", Vol .21, No .4, pp. (319-326), (1984).
- [52] اوهام محمد حميد السعدي، "دراسة تأثير التدعيم بالألياف على بعض الخصائص الفيزيائية لمادة متراكبة"، رسالة ماجستير ، الجامعة التكنولوجية، قسم العلوم التطبيقية، (2000).
- [53] جي. اي .ديتر ، " الميتالوجيا الميكانيكية "، ترجمة د. عبد الرزاق اسماعيل خضر، د. عبد الوهاب محمد عبد الله ، الجامعة التكنولوجية ، قسم هندسة الإنتاج، (1994)
- [54] د. ج.ديفز، ل.أ. اويليمان، "المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية"، ترجمة د. جعفر طاهر الحيدري، السيد عدنان نعمة، الجامعة التكنولوجية، (1989).
- [55] د. عارف أبو صفية، "الميتالوجية الفيزيائية الهندسية"، الجامعة التكنولوجية ، قسم هندسة الإنتاج والمعادن ، (1994)
- [56] رولا عبد الخضر عباس الصافي ، "دراسة الخصائص الحرارية والميكانيكية لمادة النوفولاك ومتراكباتها " ، الجامعة التكنولوجية، قسم العلوم التطبيقية، (2001)
- [57] R.N H award , " The Physics of Glassy Polymer " , Applied Science pub., London ,(1973) .
- [58] H. Hausen , " Heat Transfer Counter Flow, Parallel Flow & Cross Flow " , Mc Graw -Hill Co ., (1976) .
- [59] E. Grimsehl, " A Text Book of Physics " , Vol . 11, Blacki & Sons, London , (1944) .
- [60] فراس فؤاد عبد الله العبيدي ، " تأثير الظروف البيئية على الية الكسر بالصدمة لمتراكبات هجينة "، رسالة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، قسم العلوم التطبيقية، (2002).

- [61] S.M. Jawad, " Study The Effect of Weathering on polyethylene, Polypropylene and polystyrene ", M. SC Thesis, Chemical Engineering Department, University of Technology, (1992).
- [62] أو هام محمد حميد، د. بلقيس محمد ضياء، فراس فؤاد عبد الله، "التأثير البيئي على سلوكية متراكبات الايبوكسي"، مجلة الهندسة والتكنولوجيا، العدد6، المجلد 21، (2002).
- [63] ألاء فرحان الزبيدي، "تأثير بعض الظروف البيئية في تلف المطاط"، رسالة ماجستير، جامعة بابل، كلية العلوم، (2002).
- [64] Sanchez and Apadilla, "Journal of Composite Material", 22, 30,(1988).
- [65] S. Briger , " The Effects of Thermal and Hydro Thermal Ageing on the Failure Mechanisms of Graphite – Fabric Epoxy Composites ", Vol 20, No.4 ,pp. (341- 384), July (1989) .
- [66] وفاء عبد سعود، "الخواص الميكانيكية للمواد المركبة باستخدام الياق النخيل"، رسالة ماجستير، الجامعة التكنولوجية، قسم العلوم التطبيقية، (1994).
- [67] Hoekstra and Breen, "Mechanical Behavior of UV – Degraded HDPE", Esis, Congress, June (1995) .
- [68] D.Gradiner, "Natural and Artificial Weathering of White PVC Window Profiles", Plastics Rubber and Composites Processing and Application, Vol. 26, No.2, pp. (59- 65), (1997).
- [69] Hoekstra and Spoomaker , " Mechanical Properties of Stabilized and non – Stabilized HDPE Versus Exposure Time ", Die Angewandte Micromole Kulare Chemie 247, 91- 110, (1997).
- [70] C. Dubois," Degradation of an Epoxy- Glass Fiber Laminate under Photo – Oxidation ", Journal of Applied Science and Manufacturing, Vol . 30, pp. 361, (1999) .
- [71] A. Johnson, "Weathering Characteristics of Fiber/Polymer Composite ", Fifth International Conference on Wood Fiber-Plastic Composites, Forest Product Society, pp . (203-209), (1999).
- [72] M. Medhat and B. M Deya, " Study of the Environmental Effects on the Mechanical and Thermal properties of composite Materials", Fourth International Conference on Physics of Condensed Matter, University of Jordan, April 18 -20, (2000) .
- [73] N. peethambaran, K. Kurian and K. Mary, " J. Appl. polym . Sci. 78, 304,(2000) .
- [74] S. Ulutan and M. Jilbert, "Journal of Materials Science," 35 (9), 2115, (2000).
- [75] J.Y .Kim and B.C. Chun, " Journal of Materials Science ", 35 (19), 4833, (2000)
- [76] W. Shishan and Z. Jun, "polymer International", 52, 350 – 355, (2003).
- [77] ASTM, " Annual Book of ASTM Standard ", Section 8- Plastic, Vol. (8.02), Easton , M.V . S. A, (1985).

- [78] B. R.Sanders and T.L. Weitraub," Metal Hand Book Mechanical Testing", Vol. 8, 9 th Edition, American Society for Metals, USA, (1985).
- [79] حسام علوان كريم ، "دراسة الخواص الميكانيكية لمواد مركبة مقواة بمسحوق النيكل"، رسالة ماجستير ، الجامعة التكنولوجية، قسم هندسة المكائن و المعدات، (2000).
- [80] ضياء عبد المحسن حسن ، "دراسة بعض الخصائص الميكانيكية و الانسيابية للبولي اثيلين ومركباته المقواة باللكنين القاعدي و خلاات السليلوز و مزيجهما" ،رسالة ماجستير، جامعة البصرة ، كلية العلوم ، (2001)

الجدول (1) نتائج قيم متانة الشد القصوى (UTS) لنماذج HDPE قبل التشعيع وبعده

| Samples | Ultimate Tensile Strength (UTS) MPa | | | |
|---------|-------------------------------------|----------------------|--------|--------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 23.942 | 26.670 | 25.873 | 19.905 |
| 2 | 23.599 | 25.870 | 24.670 | 18.876 |
| 3 | 23.793 | 26.292 | 25.530 | 19.920 |
| 4 | 23.101 | 25.321 | 24.287 | 18.265 |

الجدول (2) نتائج قيم متانة الشد القصوى (UTS) لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة وبعدها

| Samples | Ultimate Tensile Strength (UTS) MPa | | | |
|---------|-------------------------------------|----------------------|--------|--------|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 23.942 | 25.135 | 18.668 | 16.913 |
| 2 | 23.599 | 24.612 | 17.482 | 16.225 |
| 3 | 23.793 | 24.975 | 17.646 | 16.814 |
| 4 | 23.101 | 24.216 | 16.879 | 15.314 |

الجدول (3) نتائج قيم متانة الشد القصوى (UTS) لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | Ultimate Tensile Strength (UTS) MPa | | |
|---------|-------------------------------------|----------|----------|
| | (23±2)°C | (40±2)°C | (55±2)°C |
| 1 | 23.942 | 16.982 | 13.900 |
| 2 | 23.599 | 15.121 | 12.720 |
| 3 | 23.793 | 15.865 | 13.813 |
| 4 | 23.101 | 14.487 | 12.711 |

الجدول (4) نتائج قيم معامل المرونة (E) لنماذج HDPE قبل التشعيع وبعده

| Samples | E(Gpa) | | | |
|---------|-------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 0.998 | 1.672 | 0.989 | 0.782 |
| 2 | 0.809 | 1.598 | 0.967 | 0.722 |
| 3 | 0.908 | 1.563 | 0.974 | 0.720 |
| 4 | 0.779 | 1.321 | 0.949 | 0.693 |

الجدول (5) نتائج قيم معامل المرونة (UTS) لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة وبعدها

| Samples | E(Gpa) | | | |
|---------|-------------|----------------------|----|-----|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.998 | 1.136 | 0.908 | 0.712 |
| 2 | 0.809 | 1.021 | 0.857 | 0.682 |
| 3 | 0.908 | 1.127 | 0.889 | 0.710 |
| 4 | 0.779 | 0.991 | 0.834 | 0.667 |

الجدول (6) نتائج قيم معامل المرونة (E) لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | E(Gpa) | | |
|---------|----------|----------|----------|
| | (23+2)°C | (40+2)°C | (55+2)°C |
| 1 | 0.998 | 0.757 | 0.511 |
| 2 | 0.809 | 0.631 | 0.453 |
| 3 | 0.908 | 0.712 | 0.489 |
| 4 | 0.779 | 0.612 | 0.449 |

الجدول (7) نتائج قيم متانة الانحناء (F.S.) لنماذج HDPE قبل التشعيع و بعده

| Samples | Flexural strength (MPa) | | | |
|---------|-------------------------|----------------------|---------|---------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 169.832 | 180.355 | 151.389 | 137.980 |
| 2 | 160.567 | 175.895 | 143.875 | 129.700 |
| 3 | 164.550 | 179.125 | 147.585 | 136.815 |
| 4 | 155.370 | 170.780 | 139.125 | 125.470 |

الجدول (8) نتائج قيم متانة الانحناء (F.S) لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة وبعدها

| Samples | Flexural strength (MPa) | | | |
|---------|-------------------------|----------------------|---------|---------|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 169.832 | 178.666 | 150.701 | 135.220 |
| 2 | 160.567 | 173.010 | 139.921 | 125.770 |
| 3 | 164.550 | 175.240 | 141.232 | 130.117 |
| 4 | 155.370 | 171.111 | 135.201 | 124.330 |

الجدول (9) نتائج قيم متانة الانحناء (F.S) لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | Flexural Strength (MPa) | | |
|---------|-------------------------|----------|----------|
| | (23+2)°C | (40+2)°C | (55+2)°C |
| 1 | 169.832 | 149.567 | 120.237 |
| 2 | 160.657 | 135.332 | 116.078 |
| 3 | 164.550 | 143.109 | 117.237 |

| | | | |
|---|---------|---------|---------|
| 4 | 155.370 | 130.370 | 115.193 |
|---|---------|---------|---------|

الجدول (10) نتائج قيم اجهاد القص (τ) لنماذج HDPE قبل التشعيع و بعده

| Samples | Shear Stress (MPa) | | | |
|---------|--------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 2.990 | 3.220 | 2.875 | 2.530 |
| 2 | 2.645 | 2.875 | 2.415 | 2.185 |
| 3 | 2.875 | 3.105 | 2.530 | 2.400 |
| 4 | 2.400 | 2.645 | 2.300 | 2.070 |

الجدول (11) نتائج قيم اجهاد القص (τ) لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة و بعدها .

| Samples | Shear Stress (MPa) | | | |
|---------|--------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 2.990 | 3.005 | 2.793 | 2.460 |
| 2 | 2.645 | 2.760 | 2.390 | 2.100 |
| 3 | 2.875 | 2.990 | 2.472 | 2.250 |
| 4 | 2.400 | 2.630 | 2.355 | 1.976 |

الجدول (12) نتائج قيم اجهاد القص (τ) لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | Shear Stress (MPa) | | |
|---------|--------------------|----------|----------|
| | (23±2)°C | (40±2)°C | (55±2)°C |
| 1 | 2.990 | 2.631 | 2.300 |
| 2 | 2.645 | 2.300 | 2.070 |
| 3 | 2.875 | 2.530 | 2.197 |
| 4 | 2.400 | 2.170 | 1.899 |

الجدول (13) نتائج قيم مقاومة الصدمة لنماذج HDPE قبل التشعيع و بعده

| Samples | Impact Strength (kJ/m ²) | | | |
|---------|--------------------------------------|----------------------|--------|--------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 25.792 | 30.593 | 25.963 | 18.122 |
| 2 | 27.750 | 31.185 | 26.965 | 19.677 |
| 3 | 26.121 | 30.741 | 26.019 | 18.503 |
| 4 | 28.012 | 32.815 | 27.852 | 19.987 |

الجدول (14) نتائج قيم مقاومة الصدمة لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة و بعدها

| Samples | Impact Strength (kJ/m ²) | | | |
|---------|--------------------------------------|----------------------|--------|--------|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 25.792 | 29.741 | 22.212 | 15.550 |
| 2 | 27.750 | 30.851 | 23.743 | 16.965 |
| 3 | 26.121 | 30.172 | 22.971 | 16.240 |
| 4 | 28.012 | 31.160 | 23.991 | 17.213 |

الجدول (15) نتائج قيم مقاومة الصدمة لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | Impact Strength (kJ/m ²) | | |
|---------|--------------------------------------|----------|----------|
| | (23±2)°C | (40±2)°C | (55±2)°C |
| 1 | 25.792 | 28.037 | 35.122 |
| 2 | 27.750 | 29.111 | 36.333 |
| 3 | 26.121 | 29.963 | 35.720 |
| 4 | 28.012 | 30.407 | 36.852 |

الجدول (16) نتائج قيم صلادة برينل لنماذج HDPE قبل التشعيع و بعده

| Samples | Brinell Hardness No. | | | |
|---------|----------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 4.246 | 4.870 | 4.373 | 3.862 |
| 2 | 3.712 | 4.336 | 3.877 | 3.311 |
| 3 | 3.969 | 4.521 | 4.009 | 3.562 |
| 4 | 3.512 | 4.196 | 3.789 | 3.326 |

الجدول (17) نتائج قيم صلادة برينل لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة و بعدها

| Samples | Brinell Hardness No. | | | |
|---------|----------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 4.246 | 4.621 | 4.293 | 3.792 |
| 2 | 3.712 | 4.392 | 3.921 | 3.422 |
| 3 | 3.969 | 4.386 | 3.923 | 3.413 |
| 4 | 3.512 | 4.000 | 3.601 | 3.007 |

الجدول (18) نتائج قيم صلادة برينل لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | Brinell Hardness No. | | |
|---------|----------------------|----------|----------|
| | (23±2)°C | (40±2)°C | (55±2)°C |
| 1 | 4.246 | 3.472 | 2.841 |
| 2 | 3.712 | 3.248 | 2.474 |
| 3 | 3.969 | 3.300 | 2.853 |
| 4 | 3.512 | 3.039 | 2.268 |

الجدول (19) نتائج قيم مقاومة الاتضغاط لنماذج HDPE قبل التشعيع و بعده

| Samples | Compression Strength (MPa) | | | |
|---------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 48 | 65 | 48 | 41 |
| 2 | 44 | 60 | 45 | 39 |
| 3 | 46 | 63 | 47 | 40 |
| 4 | 42 | 59 | 45 | 38 |

الجدول (20) نتائج قيم مقاومة الانضغاط لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة و بعدها

| Samples | Compression Strength (MPa) | | | |
|---------|----------------------------|----------------------|----|-----|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 48 | 62 | 47 | 40 |
| 2 | 44 | 57 | 42 | 36 |
| 3 | 46 | 61 | 43 | 36 |
| 4 | 42 | 56 | 40 | 35 |

الجدول (21) نتائج قيم مقاومة الانضغاط لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | Compression Strength (MPa). | | |
|---------|-----------------------------|----------|----------|
| | (23±2)°C | (40±2)°C | (55±2)°C |
| 1 | 48 | 44 | 38 |
| 2 | 44 | 40 | 34 |
| 3 | 46 | 41 | 35 |
| 4 | 42 | 39 | 34 |

الجدول (22) نتائج قيم معدل الزحف لنماذج HDPE قبل التشعيع و بعده

| Samples | Creep Rate * 10 ⁻⁴ (min) ⁻¹ | | | |
|---------|---|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 48 | 65 | 48 | 41 |
| 2 | 44 | 60 | 45 | 39 |
| 3 | 46 | 63 | 47 | 40 |
| 4 | 42 | 59 | 45 | 38 |

| Sample No. | Creep Rate * 10 ⁻⁴ (min) ⁻¹ |
|------------|---|---|---|---|
| 1 | 0.8 | 1.0 | 0.8 | 0.7 |
| 2 | 1.1 | 1.2 | 0.9 | 0.8 |
| 3 | 0.9 | 1.0 | 0.9 | 0.7 |
| 4 | 1.3 | 1.5 | 1.1 | 0.9 |

الجدول (23) نتائج قيم معدل الزحف لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة و بعدها

| Samples | Creep Rate * 10 ⁻⁴ (min) ⁻¹ | | | |
|---------|---|----------------------|-----|-----|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 0.8 | 1.0 | 0.8 | 0.6 |
| 2 | 1.1 | 1.3 | 0.9 | 0.7 |
| 3 | 0.9 | 1.1 | 0.8 | 0.7 |
| 4 | 1.3 | 1.4 | 0.9 | 0.8 |

الجدول (24) نتائج قيم ثابت الزحف (k) لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة .

| Samples | Creep Constant (k) | | | |
|---------|--------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 0.085 | 0.106 | 0.088 | 0.072 |
| 2 | 0.104 | 0.123 | 0.098 | 0.082 |
| 3 | 0.093 | 0.114 | 0.096 | 0.077 |
| 4 | 0.113 | 0.132 | 0.103 | 0.096 |

الجدول (25) نتائج قيم ثابت الزحف (k) لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة و بعدها

| Samples | Creep Constant (k) | | | |
|---------|--------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 0.085 | 0.101 | 0.085 | 0.070 |
| 2 | 0.104 | 0.125 | 0.091 | 0.080 |
| 3 | 0.093 | 0.110 | 0.088 | 0.076 |
| 4 | 0.113 | 0.130 | 0.093 | 0.081 |

الجدول (26) نتائج قيم معامل التوصيل الحراري (K) لنماذج HDPE قبل التشعيع و بعده

| Samples | K-value (W/m. °C) | | | |
|---------|-------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After UV Irradiation | | |
| | | 100 hr | 200hr | 300hr |
| 1 | 0.285 | 0.416 | 0.372 | 0.283 |

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 2 | 0.243 | 0.379 | 0.306 | 0.242 |
| 3 | 0.267 | 0.413 | 0.313 | 0.279 |
| 4 | 0.239 | 0.375 | 0.304 | 0.237 |

الجدول (27) نتائج قيم معامل التوصيل الحراري (K) لنماذج HDPE قبل تأثير الرطوبة و بعدها

| Samples | K-value (W/m. °C) | | | |
|---------|-------------------|----------------------|-------|-------|
| | As Received | After Water Sorption | | |
| | | 4W | 8W | 12W |
| 1 | 0.285 | 0.358 | 0.323 | 0.281 |
| 2 | 0.243 | 0.342 | 0.294 | 0.240 |
| 3 | 0.267 | 0.340 | 0.298 | 0.282 |
| 4 | 0.239 | 0.340 | 0.283 | 0.235 |

الجدول (28) نتائج قيم معامل التوصيل الحراري (K) لنماذج HDPE مع تغير درجة الحرارة

| Samples | K-value (W/m. °C) | | |
|---------|-------------------|----------|----------|
| | (23±2)°C | (40±2)°C | (55±2)°C |
| 1 | 0.285 | 0.447 | 0.453 |
| 2 | 0.243 | 0.367 | 0.386 |
| 3 | 0.267 | 0.350 | 0.396 |
| 4 | 0.239 | 0.274 | 0.313 |