

## تحديد العمر التشغيلي الآمن لغشاء عديد الإثيلين المُنخفض الكثافة (LDPE) المُستخدم في التبطين الجيوبلاستيكي لأبار مياه الصرف الصحي المنزلية

عبد الحميد المبروك الدجن<sup>1,\*</sup>، أسامة محمد محمد خليفة الحسنوي<sup>2</sup>

<sup>1</sup> مركز بحوث اللدائن بتاجوراء ، هيئة أبحاث العلوم الطبيعية والتكنولوجيا

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي ، طرابلس ، ليبيا

<sup>2</sup> شركة القطر السريع للمقاولات العامة بتاجوراء ، مصلحة الطرق والسكك الحديدية

وزارة المواصلات ، طرابلس ، ليبيا

\*E-Mail: amdajan@yahoo.com

### ملخص البحث:

تم في هذا البحث وضع أساس علمي لتطبيق مفهوم العزل الموضعي لمياه الصرف الصحي المنزلية بغشاء بولييمري لمادة عديد الإثيلين المُنخفض الكثافة (LDPE) كبطانة جيوبلاستيكية سُمكها 0.18 mm وذلك لحد من دور ضغط التصريف في توجيه المجاري نحو طبقات التربة والإنشاءات المائية المجاورة للأبار السوداء المُقفلة. إنجاز هذا الهدف تم بتصميم وبناء نموذج لبئر أسود منزلي حجمه 9.7 m<sup>3</sup> وعمقه 1.77 m كإنشاء يستوفي شروط الحماية والوقاية من حيث العمل بنظام التبطين البوليمري المُغلق لهضم 3.55 m<sup>3</sup> من المياه السوداء في تجربة بيئية استغرقت 224 يوم. الأعمال العملية المُكتملة لهذه الدراسة شملت توصيف لخواص التربة الفيزيائية التي تميزت بمُعامل نفاذية وقع في المدى  $10^{-4} \leq k [m/s] \leq 10^{-7}$  بقيمة 1.22 ميكرون لكل ثانية والخواص الميكانيكية التي برزت فيها نسبة تحمل كاليفورنيا (CBR<sub>Bottom</sub>) بقيمة 34.72% والتي تُطابق مدى التصنيف عند المُستوى الجيد للتربة كرمل ناعم طمي مع قليل من الحصى. الخاصية الميكانيكية الأخرى التي لها أهمية خاصة كانت في نتائج إختبار إجهاد القص المُباشر التي حددت قوة التماسك وزاوية الإحتكاك الداخلي ( $\phi$ ) بين حبيبات التربة والتي أُستخدمت في تقييم سعة تحمل التربة بقيمة صافي سعة التحمل المسموح بها ( $q_{net-all}$ ). نمذجة العلاقة الرياضية بين زمن التغلغل (t) والمُتغلغل الذي هو المحور العمودي للماء الأسود ( $h_{inf}$ ) تمت بقياسات ميدانية لتغير مُستوى السطح المائي في البئر كقراءات لدالة زمن مدتها قاربت الثمانية أشهر (7.47 شهر). بذلك، تم إستنباط العمر التشغيلي للبطانة الجيوبلاستيكية الذي تحدد بفترة زمنية لا تزيد عن أربعة سنوات (3.8 سنة) بعد مرورها بثلاثة مراحل بدأت بالتعارف ثم السيطرة الكيميائية وأخرها حالة الإستقرار الكيميائي التي تلعب دور هام في تحديد العمر الحقيقي لغشاء التبطين. أنتهى البحث بفحص عيني للغشاء بعد التجربة حيث أتضح أن البطانة قد إكتسبت الصلادة اللازمة لمُقاومة إجهادات الشد ولعوامل التهشيم الجيوكيميائي.

الكلمات المفتاحية: غشاء ، بوليمر ، جيوبلاستيك ، نمذجة ، إستنباط ، صلادة

### المقدمة والخلفيات الدراسية:

يهتم هذا البحث بتطبيق مفهوم تبطين آبار مياه الصرف الصحي المعروفة محلياً بالأبار السوداء وذلك بتوظيف أغشية جيوبلاستيكية يرجع أصلها لبوليمرات عديد الإثيلين العالي الكثافة (HDPE) والمُنخفض الكثافة (LDPE) كإجراء وقائي إلى حين إستكمال البنية التحتية لشبكات تصريف المجاري ومُعالجتها. إختيار مثل هذه العوازل يستند على أن تصميمها البوليمري يكفل حماية آبار المياه الجوفية وإنشاءات مياه الري وخزانات مياه الشرب (الماجن) من التغلغل الجيوكيميائي للملوثات نحو طبقات التربة الواقعة في مُحيط الآبار السوداء. أي بمعنى أن فعالية العزل لبطانة مُصنعة من مادة HDPE أو LDPE ترجع إلى إكتساب مادة التكوين البوليمري لخاصية التصلد عند تعرضها لكيمياء الماء الأسود وأن تماسك هذا التكوين من حيث النفاذية يُميزها عن

نظيرتها الخرسانية المعروفة بمساميتها التي تسمح بنفاذ الملوثات. القيمة الفنية والأهمية العملية لهذه النتيجة أبرزت المرجعين [2،1] كمصادر لنتائج أبحاث تميزت بمساهمات أصيلة للمعرفة العلمية في مجال عزل مخاطر التلوث بتغلغل السائل القمامي من المكبات البلدية كإنشاءات عامة ومن الإنشاءات الخاصة كأبار تصريف مياه الصرف الصحي.

بالإضافة إلى أفضلية بوليمرات عديد الإثيلين بتكوينها المادي المطلوب لعملية عزل أضرار الملوثات في سائل القمامة ومياه الصرف الصحي، فإن أفضل سُمك للعازل البوليمري يقع في المدى  $0.15 \leq \delta \leq 1.5 \text{ mm}$  كعامل هندسي لغشاء آمن يتميز بمقاومة تأثير إجهادات الشد والتعامل مع الأحمال العمودية وسهولة التركيب والتغيير وقلة التكلفة. الإختبار الحقيقي لأفضلية العازل البوليمري بدأ بتعرض مُنتج من عديد الإثيلين العالي الكثافة (HDPE) كغشاء جيوبلاستيكي أرضي لسائل قمامي مُركّز بسبعة أحماض تفاعلية مُتطايّرة ناتجة عن تجربة هضم كمية من مُخلفات مطاعم الوجبات الغذائية السريعة في مُفاعل حيوي مُغلق [1]. الجدول 1 يعطي نسب تركيز هذه الأحماض في المجموع الكلي لتركيزها في السائل القمامي.

الجدول 1: توزيع مُتوسط نسب تركيز الأحماض التفاعلية المُتطايّرة في السائل القمامي المُركّز [3].

| Average Percentage Distribution of Acids in Total Volatile Fatty Acids (TVFA); TVFA = 19134 [mg/L] |        |           |             |         |             |         |          |
|--|--------|-----------|-------------|---------|-------------|---------|----------|
| Acid in Pure Leachate  | Acetic | Propionic | iso-Butyric | Butyric | iso-Valeric | Valeric | Hexanoic |
| % in TVFA  | 67.49  | 6.67      | 0.416       | 22.91   | 0.947       | 1.43    | 0.142    |



الشكل 1: مراحل تجربة هضم المُخلفات البروتينية الصلبة وحالة تصلد الغشاء البوليمري بعد تفريغ العبوة [1].

الشكل 1 يُصور مراحل العملية التجريبية من حيث التجهيز الهندسي للمُفاعل الحيوي وحجم عبوة المُخلفات البروتينية الصلبة (Solid Protein Waste as SPW = 11.6 kg) في دراسة فورد والدجن [1] التي أصبحت مرجع أساسي للمُهتمين بتصميم المكبات البلدية. الصور توضح حالة غشاء عديد الإثيلين العالي الكثافة (HDPE) كعازل بوليمري أرضي بعد تفريغ العبوة والتعرض لنواتج

عملية الهضم التي زادت بقليل عن ثمانية أشهر. فالفحص العيني لهذه الحالة يُبين أن الطبقة الأرضية البلاستيكية قد إكتسبت صلادة حماية ملحوظة نتيجة تغير في تكوينها البوليمري. هذا التغير ساهم في تصدي الغشاء لشدة عوامل التهشيم الكيميائي المتوفرة في السائل القمامي المُركز طيلة الفترة الزمنية للتجربة البيئية. هذه النتيجة إحتاجت لإختبارات توصيف الخواص الريومترية لطبقة HDPE كعازل أرضي قبل وبعد التعرض لكيمياء السائل القمامي المُركز وهو ما سوف تتم مناقشته في حالة غشاء LDPE كبطانة جيوبلاستيكية [2].

### التصميم الإنشائي لنموذج البئر الأسود:

البداية كانت بدراسة شاملة للتربة للمؤسس عليها نموذج البئر الأسود في منطقة السوانى التي تقع جنوب مدينة طرابلس بحوالي 20 كم. هذه المنطقة تم إختيارها كموقع عمل يُمثل المُتغيرات القائمة حالياً في الوضع المائي في المدن الليبية من حيث تأثير إنتشار الآبار السوداء في الأراضي السكنية والعامّة والزراعية على التُرب والمياه الجوفية. أي بمعنى أن هذه المنطقة لا توجد فيها بُنية تحتية تواجه بها تزايد عدد السكان الذي وصل إلى 57000 نسمة والنمو الإقتصادي وأن التجمعات السكانية فيها تعتمد بالدرجة الأولى على الآبار السوداء في تصريف جميع أنواع المجاري. هذا الواقع جعل من منطقة السوانى من أكثر المناطق تلوثاً مقارنةً بالمناطق المُحيطة بالعاصمة طرابلس. الجداول 2 و 3 تعطي حصيلة نتائج ما تم من إختبارات لتوصيف الخواص الفيزيائية والميكانيكية لتربة القاعدة الأرضية لنموذج البئر الأسود في موقع العمل البحثي. قيمة صافي سعة التحمل المسموح بها ( $q_{net-all}$ ) تمت مُقارنتها بقيمة ضغط عمود الماء الأسود  $h_{bw} = 65 \text{ cm}$  عند تعبئة البئر بكضغط مائي ساكن (Hydrostatic Pressure) قيمته  $P_{bw} = \gamma_{bw} h_{bw} = 6.3765 \text{ kPa}$  حيث يتضح أن  $q_{net-all} \gg P_{bw}$  وأن هذا الفرق الكبير يكفل السلامة الإنشائية للبئر الأسود وضمان عدم إنهيار طبقات التربة بإجهادات القص والأحمال العمودية [2]. نُضيف هنا وجوب دعم جوانب البئر الأسود وخاصةً في حالة وجود تُرب ردم بمُكوناتها المتنوعة مثل الرمل المُفكك (Loose or Very Loose Sand) والتربة الزراعية (Peat Soil) التي تحتوي على مواد عضوية لجذور مُتشممة والتي عند تعرضها لكيمياء الماء الأسود تتحلل فيها الألياف بسرعة تاركاً فراغ في التربة قد يتسبب في التعجيل بهبوط وإنهيار الجدران الداخلية للبئر. إمتداد هذا الجزء الهام من العمل الدراسي كان في التجهيز للتجربة البيئية التي يصف خطواتها الشكل 2 والتي استغرقت 224 يوم (7.47 شهر) كمسلك علمي أساسي لمعلومات التغلغل الجيوكيميائي بقياسات التغير في المنسوب المائي لمُحتوى البئر الأسود طيلة هذه الفترة الزمنية.

الجدول 2: نتائج الخواص الفيزيائية لتربة القاعدة الأرضية لنموذج البئر الأسود في منطقة السوانى [2].

| الخصائص الفيزيائية للتربة (Physical Properties of Soil)                              |  |  |  |
|--|--|--|--|
| حصى Gravel [%]   | غرين Fine [%]  | رمل Sand [%]   | التوزيع الحجمي لجُسيمات التُرب<br>Particles Size Distribution – PSD          |
| 1.98   | 16.1   | 81.92  |  |
| مُعامل التقوس $C_c = (D_{30})^2 / D_{10}D_{60}$<br>Coefficient of Curvature          |  | مُعامل التناسق $C_u = D_{60} / D_{10}$<br>Uniformity Coefficient | مُعاملات مُنحى التدرج الحبيبي<br>Gradation Coefficients<br>in Sieve Analysis |
| $C_c = (0.09)^2 / (0.05)(0.12) = 1.35$   |  | $C_u = 0.12 / 0.05 = 2.4$  |  |
| نظام USCS<br>Unified Soil Classification<br>System                                   | نظام AASHTO<br>American Association of State Highway and<br>Transportation Officials |  | تصنيف التربة<br>Soil Classification  |
| SM   | A-2-4  |  |  |
| تقييم التكوين الترابي في الموقع هو لتربة رملية مع تربة ناعمة في وجود بعض الحصى       |  |  |  |
| $k_{corrected \text{ to } 20^\circ\text{C}} = 1.2183 \times 10^{-6} \text{ [m/sec]}$ |  | مُعامل نفاذية التربة (Soil Permeability)                         |  |
| $G_s = 2.633$  |  | الوزن النوعي للتربة (Specific Gravity)                           |  |



الجدول 3: نتائج الخواص الميكانيكية لتربة القاعدة الأرضية لنموذج البئر الأسود في منطقة السواني [2].

| الخصائص الميكانيكية للتربة (Mechanical Properties of Soil)    |   |   |
|---|---|---|
| $\rho_d = 1.706 \text{ g/cm}^3$                               |   | أقصى كثافة جافة (Maximum Dry Density – MDD)           |
| $W_{opt} = 10.4\%$  |   | أفضل محتوى رطوبي (Optimum Moisture Content – OMC)     |
| CBR @ 5 mm  | CBR @ 2.5 mm  | نسبة تحمل كاليفورنيا (California Bearing Ratio – CBR) |
| 34.72%  | 17.674%   |   |
| قوة التماسك للتربة<br>Cohesion of Soil – C                    | زاوية الإحتكاك الداخلي بين حبيبات التربة<br>Angle of Internal Friction – $\phi$ | إجهاد القص المباشر<br>Direct Shear Stress – $\tau_s$  |
| 8.4 kPa   | 23.28°  |   |
| صافي سعة التحمل المسموح بها<br>Net Allowable Bearing Capacity | سعة التحمل القصوى<br>Ultimate Bearing Capacity                                  | سعة تحمل التربة<br>Soil Bearing Capacity              |
| $q_{net-all.} = 200 \text{ kPa}$                              | $q_{ult.} = 540.7 \text{ kPa}$  |   |



الشكل 2: خطوات التجهيز لتجربة تبطين نموذج بئر مياه الصرف الصحي المنزلية بغشاء جيوبلاستيكي.

التجهيزات المساعدة للتجربة البيئية شملت: (1) بئر مراقبة يقع بالقرب من النموذج المُبطن بمسافة أفقية  $1.5$  متر وعمق تُرابي  $1.88$  متر كحفرة عمقها أكبر من عمق البئر الأسود وذلك لمُتابعة التغير في كيمياء المُحتوى المائي لبئر المُراقبة الذي يتم تزويده بالمياه النقية بمعدل مرتين لكل أسبوع طيلة فترة التجربة و(2) مواضع إستخراج عينات مائية لتحديد فترات مراحل التغير الكيموفيزيائي

في عمليات هضم وتغلغل المياه السوداء و(3) جهاز Geo-Tool لقياس التغير في مُستوى المنسوب المائي في البئر النموذجي كدالة في الزمن.

### أداء البطانة الجيوبلاستيكية:

نتائج العمل الميداني التي سبقت إستبيان أداء البطانة الجيوبلاستيكية في نموذج البئر الأسود توزعت على ستة فترات تجريبية بين العامين 2012 م و 2013 م والتي كان من أهمها الفحص العيني لحالة الغشاء البوليمري بعد تفريغ عبوة مياه الصرف الصحي المنزلية. المُشاهدات المُصورة في الشكل 3 تؤكد على أن الأفضلية المادية تبقى لبطانات عديد الإثيلين بنوعها العالي والمُنخفض الكثافة من حيث ظروف التعرض للأحمال المائية والكيمياء التفاعلية في الإنشاءات الخاصة بتصريف المجاري. هذه النتيجة استندت على: (1) عدم وجود تهشم في جدران البطانة البلاستيكية المُتعرضة مُباشرةً لكيمياء الماء الأسود و(2) الصورة 3-4 في الشكل 3 توضح جفاف القاعدة الأرضية للبئر الأسود كدليل على توقف عملية تغلغل المياه السوداء أو إختفاء آثارها أثناء الفترة الزمنية للتجربة البيئية و(3) نجاح مادة العزل البوليمري في فرض حالة الإستقرار الكيموحيوي على عملية الهضم من حيث إنعدام الروائح الكريهة بآليات تخفيف تأثير تراكيز مُكونات المياه السوداء على مُقاومة العازل للتآكل وبالتالي التصدي لثقلها العمودي في البئر و(4) التغير الكيموحيوي داخل البئر أدى إلى تراكم المُترسبات اللزجة والعوالق المُصاحبة لمياه الصرف الصحي على السطح السفلي للبطانة. بالنسبة لحالة التصلد التي إكتسبتها بطانة LDPE المُتعرضة مُباشرةً لكيمياء المياه السوداء، تم توثيق هذا التغير في الشكل 4 كُمشاهدات عينية بعد الكشف عن أداء غشاء العزل البوليمري أثناء إزالة جدران التلامس من البئر الأسود.



الشكل 3: المُشاهدات العينية لحالة البطانة الجيوبلاستيكية في البئر التجريبي بعد تفريغ عبوة المياه السوداء.





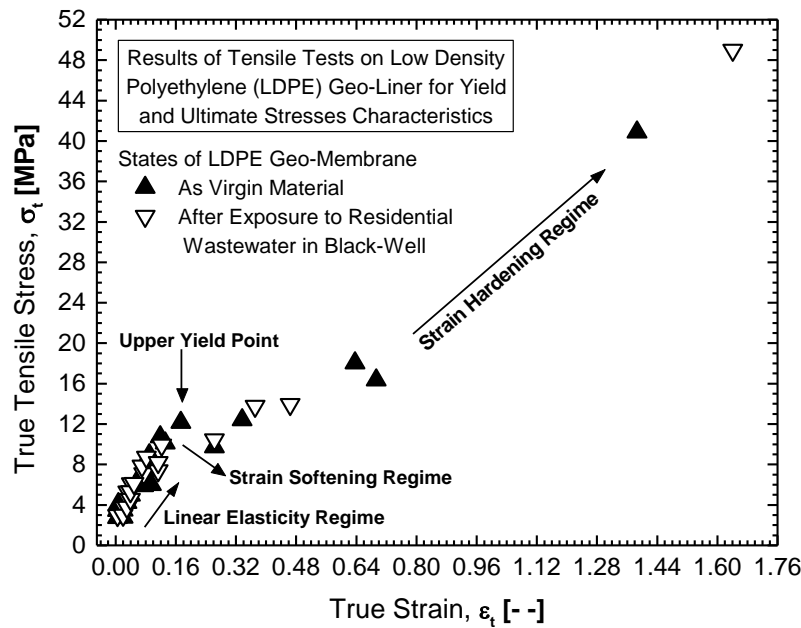
الشكل 4: مشاهدات تصلد الجزء الجداري لغشاء التبتين وحالة طبقات التربة الملامسة لجدران الغشاء.

الصور 1-4 و 3-4 في الشكل 4 توضح: (1) التغير الملحوظ في ملمس البطانة خاصة في العمق الترابي الحاوي للماء الأسود كنتيجة لإكتساب العازل البوليمري للصلادة اللازمة لتحقيق مُتطلبات الحماية والوقاية و(2) إحتفاظ التربة الملامسة لجدران البطانة بحالة الإستقرار الترابي والتراصف مع ملاحظة عدم وجود أية تبلل في طبقاتها و(3) التغير في لون غشاء التبتين الملامس للمياه السوداء من الأصفر الليموني إلى الأصفر الباهت. بعد ذلك، تم أخذ مقاطع من أجزاء البطانة التي تعرضت مُباشرةً للماء الأسود في البئر وتجهيز عينات منها لإختبارات مُقاومة إجهادات الشد أو السحب طبقاً للمواصفات القياسية في المراجع [5,4]. تطلب ذلك تصميم وبناء نظام إختباري كامل من الخشب ليعمل وفقاً للمبادئ الأساسية لعلوم مُقاومة المواد كجهاز تجريبي مُثبتة في أعلاه عينة البلاستيك المُعلق بها الوزن الإختباري الذي يقع تحت تأثير الجاذبية الأرضية والذي يُمثل قوة الشد المؤثرة على العينة. قبل البدء في عرض ومُقارنة نتائج هذا النظام بنتائج إختبارات الشد القياسية، فإنه يجب التنبيه إلى أن التكوين البوليمري لمادة العينات الإختبارية يحتوي على نسبة 25% من بوليمر عديد الإثيلين المُنخفض الكثافة الخطي (LANUFENE-LLDPE) كُمضافة يتم خلطها مع المادة الأساسية Sabic-LDPE لتحسين أداء أغشية التغليف [6]. خطة العمل بهذه الخلطة سمحت أيضاً بتطبيق برنامج التدوير وإعادة الإستخدام حيث يتم إضافة المُنتجات العائبة إلى خط إنتاج مُخصص لذلك [6]. أي بمعنى أن: (1) مادة البطانة الجيوبلاستيكية غير مُتجانسة وليست نقية بنسبة 100% و(2) إضافة نسب عشوائية من بوليمرات ومُنتجات عائبة مُجددة مُسبقاً إلى مادة الأساس يؤدي إلى إختلال التوازن الكيموفيزيائي في المُنتج المطلوب. إختبارات إجهاد الشد شملت أوزان مداها 0.75-3.75 kg كقوى شد تتزايد بوزن مقداره 0.25 kg لعشرة عينات من مادة الأصل لُمثل بلاستيك التبتين البكر ( Virgin LDPE Specimens) وعشرة عينات من أجزاء البطانة التي تعرضت لمياه الصرف الصحي (Exposed LDPE Specimens).

الجدول 4: العلاقات الحسابية لمُحددات سلوك مادة عينات البطانة الجيوبلاستيكية المُتأثرة بإجهادات الشد.

|  |                  |                  |                                  |
|--|------------------|------------------|----------------------------------|
| Engineering Stress, $\sigma_e = \frac{F}{A_0}$   | $A_0 [m^2]$      | $F [N]$          | $\sigma_e [N/m^2 \text{ or Pa}]$ |
|  | مساحة مقطع الأصل | قوة الثقل المؤثر | إجهاد الشد الهندسي               |
| Engineering Strain, $\epsilon_e = \frac{L_f - L_i}{L_i} = \frac{\Delta L}{L_i}$  | $L_f [cm]$       | $L_i [cm]$       | $\epsilon_e [- -]$               |
|  | الطول النهائي    | طول الأصل        | مُعامل الإستطالة الهندسي         |
| True Strain, $\epsilon_t = \int_{L_i}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln \left( \frac{L_f}{L_i} \right) = \ln \left( \frac{L_i + \Delta L}{L_i} \right) = \ln(1 + \epsilon_e)$ |                  |                  | $\epsilon_t [- -]$               |
|  |                  |                  | مُعامل الإستطالة الحقيقي         |
| True Tensile Stress, $\sigma_t = (1 + \epsilon_e) \sigma_e$  |                  |                  | $\sigma_t [N/m^2 \text{ or Pa}]$ |
|  |                  |                  | إجهاد الشد الحقيقي               |

الجدول 4 يصف المفاهيم الأساسية التي أُستُخدمت في دراسة نتائج هذه الإختبارات من حيث التعرف على التغير في السلوكيات الميكانيكية لمادة العزل البوليمري قبل وبعد التعرض لمكونات مياه الصرف الصحي المتزلي في نموذج البئر الأسود.



الشكل 5: نتائج السلوك الميكانيكي لعينات البطانة الجيوبولاستيكية قبل وبعد التعرض لمياه الصرف الصحي.

الجدول 5: مناقشة نتائج مراحل أنماط سلوكيات مادة البطانة الجيوبولاستيكية في الشكل 5.

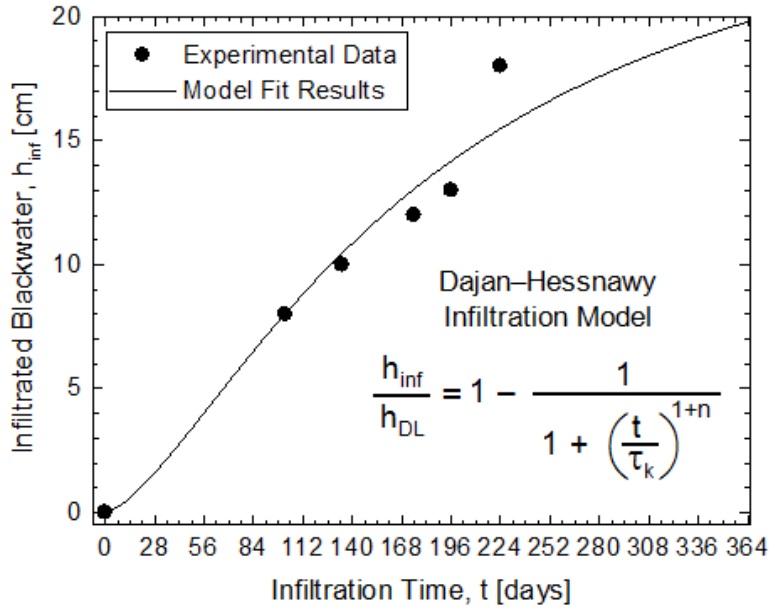
| نتائج السلوك البوليمري لغشاء التبطين<br>Results of Geo-Membrane Behavior   | الأنماط المرحلية للإجهادات<br>Stress-Strain Regimes |
|--|---|
| الميل للعينة البكر 51.3 MPa وللعينة المتعرضة 77.5 MPa كعوامل مرونة أقل بكثير من القيم المعروفة للبوليمرات النقية والخالية من مضافات مواد لها تاريخ إجهاد مسبق مثل المخلفات البلاستيكية. النتيجة الهامة هنا تؤكد على أن البطانة قد تصلبت (Stiffer) بالفعل بعد تعرضها لمياه الصرف الصحي في البئر الأسود. | مرحلة المرونة الخطية<br>Linear Elasticity           |
| العينة المتعرضة خضعت بإجهاد شد 9 MPa لتزداد تصلباً بينما بدأت نظيرتها البكر في الخضوع عند 11 MPa لتستمر بهذا السلوك إلى 12.15 MPa كأعلى نقطة خضوع التي تبدأ منها مرحلة التليين. مدى الخضوع لحالي العينات المختبرة مطابق للمدى القياسي 10-13 MPa لكل من LDPE و LLDPE [5,4].                             | مرحلة الخضوع<br>Yield Points                        |
| التليين حدث بإزدياد الإستطالة في المدى التنازلي 12-9.7 MPa كنتيجة لإنفكك لفات سلاسل المادة البكر وإستقامتها علماً بأن حدة ذلك لا تظهر في حالة التصلد.  | مرحلة التليين<br>Strain Softening                   |
| التصلب المادي هنا يعني أن سلاسل التكوين المستطالة حثت على مقاومة التشويه بالشد وأن خاصية التصلد التي إكتسبها غشاء العزل البوليمري بعد تعرضه لكيمياء الماء الأسود في البئر ساعدت العينة المتعرضة على مقاومة تخطت بها مقاومة العينة البكر حيث وصل مقدارها إلى 48.96 [MPa] كأقصى قيمة.                    | مرحلة التصلب<br>Strain Hardening                    |

الشكل 5 يؤكد على وجود تغير مادي في التكوين البوليمري لغشاء التبطين الجيوبلاستيكي أثناء المواجهات الكيميائية والميكانيكية في البئر الأسود. هذا التغير يوضح دور إختبارات إجهاد الشد في ترسيخ مفهوم العزل البوليمري للملوثات وذلك إستناداً على النتائج المرئية لأنماط السلوكيات المادية التي يصفها الشكل 5 والتي يُناقش مراحلها الجدول 5.

### إستنباط العمر التشغيلي الآمن للغشاء الجيوبلاستيكي:

التكوين الطبيعي لطبقات التربة يلعب دوراً هاماً في تحديد إتجاهات عملية تغلغل الملوثات التي تتم بين محتويات البئر الأسود وتربة المحيط وذلك بسبب التباين المعروف بين أحجام حبيبات التربة ونمط الترابط الذي يأخذ شكل قنوات أو أنابيب إتصال تسمح بمرور المتغلغل (ماء الصرف الصحي) من خلالها. أي بمعنى أن خواص تربة موقع التصريف من حيث التوزيع الحبيبي تلعب دوراً هاماً في توصيف العلاقة بين عملية التغلغل والمتغلغل وأن ذلك يؤدي إلى إختيار مادة التبطين كإضافة إنشائية يتم بها حماية التربة والمياه الجوفية من هذا النوع من الملوثات الخطرة والحد من إختراق مياه الصرف الصحي للجدران الداخلية للآبار السوداء. هذا الهدف تحقق بعلاقة غير خطية بين حجم المتغلغل وزمن التغلغل لنظام تبطين جيوبلاستيكي يعمل لفترة زمنية مُقيدة بعمر إستبدال آمن للبطانة كمعيار إنشائي مُحدد مُسبقاً.

النمذجة الرياضية للعلاقة بين زمن التغلغل ( $t$ ) والمتغلغل الذي يُمثله المحور العمودي للماء الأسود ( $h_{inf}$ ) تمت من خلال قياسات ميدانية للتغير في مستوى سطح الماء الأسود كدالة في الزمن. تطلب ذلك تجميع بيانات من موقع البئر التجريبي كقراءات موزعة على أسابيع وشهور بمجموع أيام هضم للمُحتوى المائي وصل إلى 224 يوم (7.47 شهر). الشكل 6 يعطي نمط توزيع هذه البيانات والصيغة الرياضية التي تصف عملية التغلغل علماً بأن مثل هذه القياسات قد تستغرق فترة زمنية تفوق الأربعة سنوات من أجل التوصيف العملي للعلاقة بين زمن التغلغل والمتغلغل والوصول بنتائج التجربة إلى مرحلة تحديد العمر الآمن للبطانة.



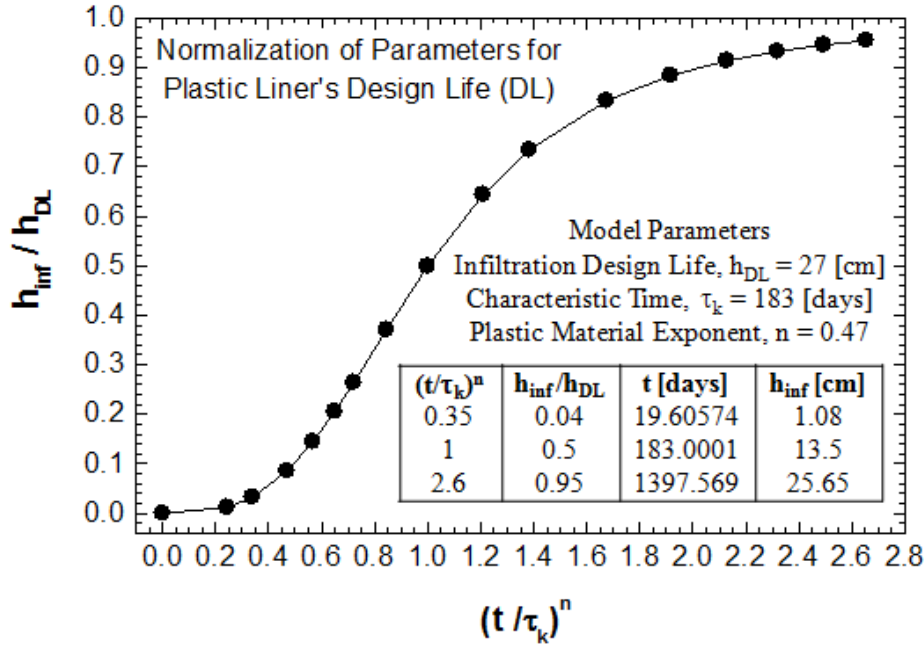
الشكل 6: نتائج تجربة التبطين البوليمري لبئر تصريف مياه الصرف الصحي والصيغة الرياضية لمُحددات التغلغل.



النتائج العملية لمعدلات التغلغل ( $h_{inf}/t$ ) في الشكل 6 تؤكد على أن مجموع الفترات الزمنية لقياسات تغلغل مياه البئر الأسود كانت كافية لدراسة آليات التغلغل من حيث المدى الزمني الذي يكفل للجانب النظري الخلفيات التجريبية اللازمة لتحديد العمر الحقيقي للبطانة الجيوبلاستيكية وبالتالي ضمان صلاحيتها كعازل بوليمري فعال. عليه، تم وضع المبادئ النظرية التي تأسست عليها طريقة حساب العمر التشغيلي الآمن لبطانة النظام المدروس والتي تعتمد نتائجها على قيم مُحددات النموذج الرياضي التالي:

$$\frac{h_{inf}}{h_{DL}} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t}{\tau_k}\right)^{1+n}} \dots\dots\dots \text{Dajan-Hessawy Infiltration Model}$$

السماحية العمرية للنفاذ ( $h_{DL}$ ) وزمن خصوصية نظام العزل ببوليمر ( $\tau_k$ ) والمؤشر الكيموبوليمري لحركة سلاسل مادة العزل ( $n$ ) تم ربطها بمعدلات التغلغل ( $h_{inf}/t$ ) كعوامل تطبيع (Normalized Parameters) للعلاقات المُحددة للتغير الكيموفيزيائي أثناء مرور البطانة بمراحل التعرض للماء الأسود. نتائج تطبيق هذا المفهوم يعطيها الشكل 7 في علاقة تطبيع تربط بين مُتغيرات الزمن  $\left(\frac{t}{\tau_k}\right)^n$  على المحور الأفقي ومُحددات المسافة  $\frac{h_{inf}}{h_{DL}}$  على المحور العمودي.



الشكل 7: نتائج تطبيق مفهوم تطبيع العلاقات في تحديد العمر الحقيقي للبطانة الجيوبلاستيكية.

الجدول 6 يُناقش دور مفهوم تطبيع العلاقات في التمييز بين المراحل الزمنية التي مرت بها البطانة الجيوبلاستيكية بدءاً بمرحلة التعارف الكيميائي وصولاً إلى مرحلة الإستقرار كُمُحددة فعلية للعمر الحقيقي لغشاء العزل البوليمري. العمر التشغيلي الآمن للبطانة الجيوبلاستيكية في الجدول 6 يُشير إلى أنه من المُستحسن تغيير غشاء العزل البوليمري بعد حوالي أربعة سنوات وذلك لتفادي تهشم جدران البطانة بفعل الزيادة في تراكيز المُعلقات الكيميائية والبكتيرية.

الجدول 6: مُناقشة نتائج مراحل تحديد العمر التشغيلي الآمن للغشاء الجيوبلاستيكي في الشكل 7.

| مراحل التغيير                                 | خصائص مدى الفترة الزمنية   |
|---|--|
| مرحلة التعارف<br>$(t/\tau_k)^n = 0.0 - 0.35$  | الفترة الزمنية لمدى هذه المرحلة تصل إلى حوالي 20 يوم وهي الأيام التي تلي مباشرة خطوة تعبئة البئر بمياه الصرف الصحي المنزلية. السبب في طول زمن التعارف يرجع إلى أن التكوين الكيميائي لهذا النوع من المجاري يغلب عليه الماء كُحتوى أساسي وأن النشاط الفعلي للمُكونات الأخرى يحتاج إلى حوالي 20 يوم للبدأ في عملية الهضم.                                 |
| مرحلة التعامل<br>$(t/\tau_k)^n = 0.35 - 1.0$  | إجتياز البطانة لهذا المدى يعني نجاح المادة البوليمرية في السيطرة على كيمياء المياه السوداء من حيث التصدي لتغلغل المُلوّثات نحو طبقات التربة. هنا تتضح معالم تعامل العازل مع عبوة البئر حيث يظهر دور العاملين $n$ و $\tau_k$ في سرعة توجيه ميل علاقتهما بالزمن $t$ إلى حالة الإستقرار وهو ما يعني سيطرة لصالح كيمياء الغشاء البوليمري.                  |
| مرحلة الإستقرار<br>$(t/\tau_k)^n = 1.0 - 2.6$ | مدى هذه المرحلة يبدأ من بداية النهاية لكل المؤثرات الكيميائية المُتمثلة في تغير ميل العلاقة المُتحكّمة في عملية التغلغل وينتهي عند الوصول إلى حالة الإستقرار. أقصى حد لهذا المدى $t = 2.6 (183)^{0.47}$ تم أخذه كمدخل آمن لمستوى الإستقرار التام حيث أدى ذلك إلى $t \cong 1398$ وهو العمر الحقيقي لغشاء التبتين. $\text{days} \cong 3.8 \text{ years}$ |

#### الإستنتاجات والتوصيات:

خلصت الورقة بعدد هام من الحلول العملية لظاهرة لجوء الأهالي إلى التصريف الصحي في آبار سوداء كنتيجة حتمية لغياب بُنية تحتية تُساهم في تقليص هذه الممارسة [7]. الحلول المُقترحة استندت على نتائج لنهج علمي يضمن الحد من تغلغل المُلوّثات في آبار تصريف المجاري نحو طبقات التربة والمياه الجوفية. كل ذلك يتلخص في التالي:

1. تقييم نتائج إختبارات توصيف الخواص الفيزيائية والميكانيكية لتربة القاعدة الأرضية لبئر التجربة انحصار في قيمة صافي سعة التحمل المسموح بها ( $q_{net-all}$ ) التي تضمنت سلامة الإنشاء وعدم إنبهار طبقات التربة المُؤسس عليها.
2. تُرب الردم بمُكوناتها القابلة للتشم لا يُنصح بإستخدامها كجزء تُرابي في أعمال البناء الخاصة بالإنشاءات المائية نظراً لوجود فراغات في توزيعها الحبيبي قد تتسبب في التعجيل بهبوط وإنهيار الجدران الداخلية للإنشاء.
3. درجة نفاوة مادة الغشاء يجب أن لا تقل عن 100% لتكوينات بوليمرية من عديد الإثيلين المُنخفض والعالي الكثافة وأن لا يدخل أي جزء وزني من المُنتجات العائبة في تصنيع أغشية منها وذلك تفادياً لعوامل ذاكرة الإجهادات المُسبقة التي تحملها المُخلفات البلاستيكية والتي يبرز تأثيرها السلبي على خواص المادة بعد عملية التدوير وإعادة الإستخدام.
4. الفحص العيني لحالة البطانة الجيوبلاستيكية بعد 224 يوم (7.47 شهر) من التعرض لكيمياء المياه السوداء أكد على أن إكتساب أغشية عديد الإثيلين بنوعها العالي والمنخفض الكثافة لخاصية التصلد طيلة الفترات الزمنية لتجارب البيئية جعل منها العوازل الأفضل مادياً لتطبيقات عزل المُلوّثات في المكبات البلدية وآبار مياه الصرف الصحي.
5. نتائج المُشاهدات العينية لحالة تصلد بطانة البئر الأسود أكدت مرحلة المرونة الخطية في نتائج إختبارات مُقاومة إجهادات الشد حيث يتضح أن هذا التغيير بدأ مُبكراً وذلك بناءً على الزيادة في قيمة مُعامل المرونة للعينة المُتعرضة.
6. تطابقت نتائج إجهادات الشد في مرحلة الخضوع مع المدى القياسي (10-13 MPa) المُوثق لمواد عديد الإثيلين المُنخفض الكثافة والخطي حيث أظهرت العينة المُتعرضة لمياه الصرف الصحي إستمرارية في سلوك التصلب.
7. اتفق نمط السلوك البوليمري لعينة البطانة البكر في مرحلة التليين بإجهادات الشد مع المبادئ الأساسية لإختبارات مُقاومة المواد حيث انحصار ذلك بين 12 MPa و 9.7 MPa كنتيجة لإنفكاك لفات سلاسل المادة البكر وإستقامتها.

8. الأفضلية المادية في مرحلة التصلب كانت لصالح العينة المتعرضة التي قاومت التشويه بإجهادات الشد بمقاومة قصوى قيمتها  $48.96 \text{ [MPa]}$  والتي أكبر بكثير من مقاومة العينة البكر ( $40.9 \text{ MPa}$ ).
9. المدى الزمني لقياسات معدلات التغلغل في التجربة البيئية كان كافي لصياغة العلاقة الرياضية بين زمن التغلغل والمتغلغل التي أدت إلى مفهوم تطبيع العلاقات كأداة تمييز زمني لمراحل مرور البطانة بمُتغيرات نظام الهضم.
10. نتائج تطبيق مفهوم تطبيع العلاقات كشفت عن ثلاثة مراحل زمنية مرت بها البطانة الجيوبلاستيكية بنمط يبدأ من مرحلة التعارف مروراً بمرحلة التعامل الكيميائي لينتهى في مرحلة الإستقرار التي حددت العمر التشغيلي الآمن للبطانة.
11. التغير الإيجابي لحالة تصلد البطانة الجيوبلاستيكية بعد التعرض المباشر للمياه السوداء في بئر التصريف يحتاج إلى ربط بالتغير في توزيع الوزن الجزيئي (MWD) لمادة التكوين البوليمري من خلال إختبارات ريومترية تهتم بسلوك علاقة اللزوجة الديناميكية ( $\eta$ ) للبوليمر بالمحيط الكيميائي وذلك إستناداً على أن قيمة لزوجة خط الثباتية ( $\eta_0$ ) للعازل بعد التعرض للسوائل الملوثة تزداد بمسلك حصري لتوزيع الوزن الجزيئي المتسع (Broad MWD) [10,9,8].
12. موقع العمل البحثي يُمثل أحد دواعي البحث في تطوير معيار إنشائي يشترط تبطين الآبار السوداء وذلك لمواجهة إرتفاع مُعدل النمو السكاني والتوزيع العشوائي للإنشاءات المائية المحيطة بآبار المجاري ومخاطر تغلغل الملوّثات.

#### المراجع:

1. Bethany Forde and Abdulhamid M. Dajan, "The Effect of Waste Leachate on the Mechanical and Rheological Properties of Landfill Plastic Liners", Research Report, Department of Chemical Engineering, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, 27 October 2000.
2. Osama Muhamed M. Khalifa Al-Hessnawy, "Lining of Black Wastewater Wells with LDPE Plastic Geo-Membrane to Protect the Soil Layers and Groundwater from Infiltration of Pollutants", M.Sc. Thesis, Department of Environmental Sciences and Engineering, The Libyan Academy, Janzour, Tripoli, Libya, 4 December 2014.
3. Abdulhamid Dajan, Gary Asmussen, Marion Dunstan, Bill Clarke, and Victor Rudolph, "Simulation of a Fast Food Chain Landfill in a Static Bed Bioreactor for the Natural Anaerobic Digestion of Solid Protein Waste (SPW)", 6<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering, 23–27 September 2001, Melbourne, Australia.
4. American Society for Testing and Materials, "ASTM D638–08 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", West Conshohocken, Pennsylvania (PA), USA.
5. American Society for Testing and Materials, "ASTM D882–02 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting", West Conshohocken, PA, USA.
6. Abdulhamid M. Dajan, "Environmental Impact Assessment (EIA) of Elwefaq Company for Manufacturing of Plastic Covers", Environment General Authority (EGA), 23 August 2009, Janzour, Tripoli, Libya.
7. Abdulhamid M. Dajan and Abdulazziz M. Omran, "Geochemical Mapping of the Infiltration of Blackwell Waters in the Residential and Public Lands in Tajouraa City", 1<sup>st</sup> National Conference on the Technologies of Wastewater Treatment, Environment General Authority and World Health Organization (WHO), 6–8 June 2005, Benghazi, Libya.
8. M. M. Cross, J. Appl. Polymer Sci., 13, 765, 1969.
9. K. Iwakura and T. Fujimura, J. Appl. Polymer Sci., 19, 1427, 1975.
10. L. D'Orazio, C. Mancarella, and E. Martuscelli, Polymer, 32, 1186, 1991.