تقييم معامل المرونة الديناميكي لطبقة القميص الإسفلتي بالمقاربة بين الطرق التجريبية والقياسات الحقلية

المهندس لؤي أكرم الخطيب*

الأستاذ الدكتور المهندس أندراوس سعود**

الدكتور المهندس محمد فواز المسوتي***

الملخص

يعدُّ تحديد خواص مواد بناء طبقات الرصف الطرقي والتعبير عن سلوكية هذه المواد ضمن شروط معينة، عاملاً أساسياً للوصول إلى تصميم إنشائي دقيق لطبقات الرصف، ويمكن تحديد هذه الخواص بناءً على نتائج التجارب المخبرية، أو من خلال العلاقات التجريبية.

في هذا البحث تم تمثيل طبقة القميص الإسفلتي على أنها ذات سلوكية لزجة مرنة، وتم التعبير عن هذه السلوكية باستخدام نموذج بيلنين وويتزاك المعتمد من قبل NCHRP، الذي يعكس تغير خواص الخلطة الإسفلتية تحت تأثير العوامل المختلفة كالحمولات وزمن تطبيقها ودرجة الحرارة من خلال استنتاج معامل المرونة الديناميكي E^* لعينات مختلفة مأخوذة من أتوستراد دمشق قارة وإجراء تجارب مارشال عليها، كما تم قياس E^* حقلياً بواسطة جهاز FWD للطريق المدروس نفسه.

الهدف من هذا البحث دراسة تأثير كل من التقادم وتغير العمق فضلاً عن شروط التحميل والحرارة على نموذج بيلنين وويتزاك، ومقارنة القيم المحسوبة وفق هذا النموذج بالقياسات الحقلية بواسطة جهاز FWD والوصول لعلاقة تربط بين القيم الحسابية والحقلية لـ E^*. كما تمت المقارنة بين قيم E^* المحسوبة وفق النموذج المعتمد بنتائج تجربة مارشال للعينات نفسها.

* أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس لؤي أكرم الخطيب بإشراف الأستاذ الدكتور أندراوس سعود ومشاركة الدكتور محمد فواز المسوتي - قسم هندسة النقل والمواصلات - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

***قسم هندسة النقل والمواصلات - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

**قسم هندسة النقل والمواصلات -كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق

1. مقدمة Introduction:

تطور التحليل الإنشائي لطبقات الرصف تطوراً كبيراً خلال السنوات الخمسين الماضية من خلال صياغة العديد من النماذج الإنشائية، فمثلاً عادة ما تعتمد الأساليب التقليدية المتبعة عند استخدام طرق التصميم الميكانيكية على نظرية تعدد الطبقات المرنة للتنبؤ بشكل استجابة طبقات الرصف المرن لحمولة المركبات، طُوّرِت هذه النظرية بالأصل من قبل بيرميستر (Burmister) عام 1943 [1] وذلك لنظام مرن خطي مؤلف من طبقتين، ثم ما لبثت هذه الطريقة أن انتشرت بشكل واسع لتغطي مختلف أنواع المسائل المتعلقة بالرصف، وحتى اليوم تعدُّ الأكثر شيوعاً في الحساب والتصميم الإنشائي لطبقات الرصف، حيث تتباين طرائق التصميم المعتمدة على هذه الطريقة فيما بينها بدقة تمثيلها للواقع. ومن أهم العوامل الجوهرية المؤثرة على دقة النتائج هي تحديد خواص مواد البناء لاستخدامها كإدخالات في معادلات تصميم طبقات الرصف بالطرائق الميكانيكية، ويمكن تحديد هذه الخواص بناءً على نتائج التجارب المخبرية، أو من خلال العلاقات التجريبية التي تم تطويرها استناداً إلى التقييم والمشاهدات الحقلية للطرق القائمة خلال الاستثمار؛ وذلك بهدف تمثيل سلوكية مواد الرصف لتماثل الواقع، فعلى سبيل المثال قد تمثل طبقة القميص الإسفلتي على أنها مادة ذات سلوكية لزجة مرنة (viscoelastic)، ومن ثمَّ يجب استخدام النموذج المناسب لهذه السلوكية الذي يمثل خواص الخلطة الإسفلتية تحت تأثير العوامل المختلفة كشروط التحميل ودرجة الحرارة وتأثير التقادم (aging) على الرابط الإسفلتي وغيرها من عوامل متباينة، ولتمثيل هذه السلوكية استخدمت في هذا البحث المعادلات المشتقة بشكل تجريبي اعتماداً على نموذج بيلنين وويتزاك (Pellinen and Witczak) [2]الذي تم تبنيه من قبل NCHRP [3].

يمكن أيضاً استنتاج خواص المواد اعتماداً على التقييم الإنشائي لطبقات الرصف الذي شهد مؤخراً قفزة نوعية نتيجة استخدام أجهزة قادرة على محاكاة ظروف التحميل الناتجة عن حمولات المرور سريعة الحركة، وأكثر طرائق التقييم انتشاراً لتمثيل رد فعل طبقات الرصف لمثل هذا النوع من الحمولات هو استخدام أجهزة قياس السهم (Deflection)، حيث تختلف هذه الأجهزة عن بعضها بعضاً في قيمة الحمولة وشكلها وزمن التحميل المطبق على طبقات الرصف. والهدف من قياس السهم هو تحديد خواص الطبقات لاستخدامها في طرائق التقييم التحليلي. ومن بين الأجهزة المتاحة للتقييم الإنشائي لطبقات الرصف جهاز قياس السهم بالوزن الساقط (Falling Weight Deflectometer) FWD المستخدم بشكل واسع في مختلف أنحاء العالم وذلك لتمثيله إلى حد كبير حمولات المرور الحقيقية، حيث تستخدم قياسات السهم من خلاله لتعيين معاملات الطبقات المختلفة الممكن استنتاجها بالحساب التراجعي (Backcalculation) اعتماداً على برامج الحاسوب بهدف استخدامها لتقييم طبقات الرصف القائمة ولتعيين العمر المتبقي لها [4].

في هذا البحث قيّمت الكفاءة الإنشائية لأتوستراد دمشق قارة بالاتجاهين باستخدام جهاز FWD ماركة Dynatest 8000 وذلك لقياس سهم سطح الرصف الطرقي الموجود، من ثم حلّلت المعطيات وما تلاها من تحديد قيم عوامل الطبقات بالحساب التراجعي باستخدام المنهجية الميكانيكية لتقييم الوضع الراهن والمتبعة عند التصميم وفق طريقة الـ AASHTO [5]. كما أُخِذَتْ عينات على شكل جزرات من طبقة القميص الإسفلتي من النقاط نفسها التي اختبرت

بواسطة جهاز FWD بهدف تحديد سماكة هذه الطبقة وخواص مواد بنائها، من خلال إجراء التجارب المخبرية على هذه العينات كتجربة التدرج الحبي ونسبة البيتومين وتجربتي الوزن الحجمي والنوعي على الحصويات المكونة للخلطة لاستنتاج الوزن النوعي الفعال [13]، كذلك حُدِّدَ الوزن النوعي الحجمي للعينة لاستنتاج النسبة المئوية لحجم الفراغات الهوائية ونسبة البيتومين الفعالة في الخلطة، وإجراء تجربة مارشال لتحديد قيمة الثبات والانسياب لهذه العينات.

2. خواص الخلطة الإسفلتية Asphalt Mix Characteristics:

عند دراسة خواص الخلطة الإسفلتية لابد أن نأخذ بالحسبان الخصائص المتعلقة بعلاقة الإجهادات مع التشوه النسبي (Stress - strain) التي تستخدم لتحليل الإجهادات والتشوهات المرتدة (Resilient) عند النقطة الحرجة، وهذا يتضمن بشكل طبيعي إيجاد معامل المرونة الديناميكي E^* [6]، والذي تكون عادة مجالات زمن تطبيق الحمولة 0.01 0.1 ثانية للحمولات السريعة، و 0.1 1.0 ثانية لحمولات الفرملة والإقلاع، و1.0 دقيقة 10.0 ساعة لحمولات توقف الشاحنات [7]. أما بالنسبة إلى حرارة القميص الإسفلتي فتتغير ضمن مجال واسع وفقاً لمناخ موقع الطريق مثلاً يمكن أن تتغير ضمن مجال -60^{0}C 10^{0}C، وعادة يتم اختيار تأثير درجات حرارة (5^{0}C , 25^{0}C , 40^{0}C) على نتائج قيم معامل المرونة الديناميكي [8].

درس بيلنين وويتزاك [2] سلوك 205 خلطة إسفلتية و23 رابطاً بيتومينياً بدرجات حرارة ضمن مجال 5^0 C 54^0 C وبحمولات متكررة مجال ترددها متغير، حيث تم معايرة نموذج تنبؤ المعامل الديناميكي باستخدام منحنى سمي المنحنى الأساسي (Master Curve) [2]، ويعطي هذا النموذج وفقاً لغراسيا وسمبسون (Garc a and Thompson) [9] نتائج دقيقة مقارنة بالتجارب المخبرية ويستنتج معامل المرونة الديناميكي وفق نموذج بيلنين وويتزاك من خلال المعادلة [2] :

(1)

$|E^*|$:المعامل الديناميكي للخلطة الإسفلتية، [10^5 psi].

f: تواتر الحمولة، [Hz]. إذ: $f = 1/t$ ، t: زمن تطبيق الحمولة [sec].

V_a :النسبة المئوية لحجم الفراغات الهوائية في الخلطة، [%].

V_{beff}: نسبة البيتومين الفعال،[%] .

P_{34} : نسبة المحجوز الكلي على المنخل رقم 3/4 in (19 mm) من الوزن الكلي للحصويات.

P_{38} : نسبة المحجوز الكلي على المنخل رقم (9 mm) 3/8 in من الوزن الكلي للحصويات.

P_4 : نسبة المحجوز الكلي على المنخل رقم (4.75 mm) 4 من الوزن الكلي للحصويات.

P_{200} : نسبة المار من المنخل رقم 200 (0.075 mm) من الوزن الكلي للحصويات.

η : لزوجة البيتومين، [10^6 poise]. يمكن حساب η بالعلاقة مع درجة الغرز وفق المعادلة [3]:

$$\log \eta = 10.5012 - 2.2601 \log (Pen) + 0.00389 \log (Pen)^2 \quad (2)$$

إذ: η : اللزوجة [Poise] Pen: درجة الغرز.

نستطيع من العلاقة (2) استنتاج قيمة لزوجة البيتومين لحظة الخلط دون الأخذ بالحسبان تقادم وأكسدة مادة الإسفلت التي تحدث خلال ثلاث مراحل [10]، المرحلة الأولى متمثلة بنقل مادة الإسفلت من المصفاة إلى المجبل وما يحدث في خزانات المجبل من عمليات تفريغ وتعبئة، ثم المرحلة الثانية وهي ما يحدث خلال عملية الخلط وفرش الخلطة الإسفلتية ورصها، أخيراً المرحلة الثالثة هي ما يتعرض له الإسفلت في طبقة القميص الإسفلتي من عمليات أكسدة خلال سنوات الاستثمار، ولأخذ هذه العوامل بالحسبان يمكن استخدام نموذج نظام التقادم الشامل (Global Aging System) الذي يعبر عنه من خلال المعادلة:

[11]

$$\log\log(\eta_{aged}) = \frac{\log\log(\eta_{t=0}) + At}{1 + Bt} \quad (3)$$

$$A = -0.004166 + 1.4123 * C + C * \log(Maat) + D * \log\log(\eta_{t=0}) \quad (4)$$

$$B = 0.197725 + 0.0683841 \log(C) \quad (5)$$

$$C = 10^{(274.4946 \quad 193.831 \log(T_R) + 33.9366 \log 2(T_R)} \quad (6)$$

$$D=-14.5521+10.47662 \log(T_R) \quad 1.88161 \log^2(T_R) \quad (7)$$

η_{aged} : اللزوجة عند عمر معين مقدرة بـــ سنتي بواز [cP].

$\eta_{t=0}$: اللزوجة عند فرش الخلطة الإسفلتية ضمن طبقة القميص في الموقع مقدرة بـــ [cP].

$$\log\log(\eta_{t=0}) = 0.054405 + 0.972035 \log\log(\eta) \quad (8)$$

Matt : المعدل السنوي لدرجة الحرارة مقدرة بـــ [F]، حيث تساوي: $^0F = 1.8 * {}^0C + 32$

T_R : درجة الحرارة مقدرة بالرانكين [Rankine]. حيث تساوي $^0Ra = {}^0F + 460$

t : عمر الخلطة الإسفلتية مقدراً بالشهر.

إن العلاقة (3) تعطي لزوجة الخلطة الإسفلتية المكونة لطبقة القميص عند عمر معين وعلى عمق قدره 0.25 in (6.35 mm) أما اللزوجة عند عمق معين فتعطى بالعلاقة: [11]

$$\eta_{aged,z} = \frac{\eta_{aged}(4+\alpha) - \alpha(\eta_{t=0})(1-z)}{4(1+\alpha z)} \quad (9)$$

$\eta_{aged.z}$: اللزوجة عند عمر معين وعمق z [in] مقدرة بـــ ميغا بواز [MPoise] .

η_{aged} : اللزوجة عند عمر معين وعمق 0.25 in مقدرة بـــ ميغا بواز [MPoise] .

$$\alpha = 23.83\, e^{(-0.0308\ Maat)} \quad (10)$$

تم اختيار قيم العوامل المؤثرة في نتائج معامل المرونة الديناميكي عند المقارنة بنتائج القياس وفق FWD لتماثل شروط الحقل أثناء التجربة وفق ما يأتي:

- درجة الحرارة: تم اختيار درجة حرارة (33^0C)، لتوافق درجة حرارة القميص الإسفلتي عند إجراء قياسات FWD.
- المعدل السنوي لدرجة الحرارة: تساوي (18^0C) وفق بيانات الهيئة العامة للأرصاد الجوية [14].
- تردد الحمولة: تساوي إلى 0.1 Hz [12].

يظهر الجدول رقم (1) في الملحق A النتائج المخبرية التي تم التوصل إليها نتيجة اختبار عشرين عينة مأخوذة من طبقة القميص الإسفلتي لأتوستراد دمشق قارة بالاتجاهين، ويظهر الجدول رقم (2) قيمة معامل المرونة الديناميكي E^* لكل عينة نموذج بيلنين وويتزاك، أما الجدول رقم (3) فيلخص نتائج حساب قيم معامل المرونة الديناميكي ونتائج تجربة مارشال (الثبات والانسياب) كنوع من المقارنة والاستقراء رغم الاختلاف بين طبيعتي التجربتين. أخيراً تم اختيار العينات بعد تقييم

حالة الرصف بالمشاهدة البصرية لمسح العيوب وقد غطت هذه العينات مناطق ذات حالة إنشائية جيدة وأخرى ذات حالة إنشائية سيئة.

3. القياسات الحقلية: Field Measurements

كما أشرنا أُجري التقييم الإنشائي لطبقات الرصف باستخدام جهاز الحمولة الساقطة FWD وهذه طريقة غير إتلافية تسمح بتطبيق حمولة نابضية بمستوى تحميل نحو 4.09 طناً مشابهة من حيث المدة والقوة دولاب شاحنة متحركة بهدف استنتاج معامل المرونة الديناميكي لطبقة القميص الإسفلتي E^* في الموقع وذلك وفق المواصفة الأمريكية رقم ASTM 1026. ثم قياس السهم الناتج في طبقات الرصف الناتج عن تطبيق هذه الحمولة باستخدام سبعة حساسات إحداها كان موضوعاً في مركز صفيحة التحميل، أما الحساسات الستة الباقية فكان تباعدها عن مركز صفيحة التحميل هو بالتتالي: (0 , 450 , 300 , 200 , 1200 , 900 , 600) ملم.

أجري الاختبار في نقاط مختلفة من أتوستراد دمشق قارة في كلي الاتجاهين وقد غطى العمل فقط حارات المرور اليمينية على مسار دواليب السيارات (أي نحو 50 إلى 100 سم عن الكتف) بتردد وسطي بحدود نقطة في الكيلومتر فضلاً عن أماكن انتشار العيوب، مع الإشارة إلى أن نقاط الاختبار شملت العينات العشرين التي تم أخذها من طبقة القميص الإسفلتي جميعها.

أجريت عمليات حسابية باستخدام برنامج WESDF الذي تم تطويره لصالح فيلق المهندسين الأمريكي [12] وذلك من أجل عمليات الحساب التراجعي لنتائج اختبار الـ FWD، إذ يعتمد هذا البرنامج على نظرية المرونة للتنبؤ بمجموعة من قيم العوامل التي تنتج حوض سهم قريب جداً من تلك المقيسة حقلياً في كل موقع عند اختبار FWD . ويكون الفرق بين قيم السهم المحسوبة والمقيسة مقبولاً إذا كان بحدود 10 15 %. والشكل رقم (2) في الملحق A يوضح قيم معامل المرونة الديناميكي E^*، التي تم التوصل إليها لمسربي الذهاب والإياب.

الشكل رقم (1)

النتائج Conclusion:

1. تظهر نتائج E^* التي تم التوصل إليها من خلال القياسات الحقلية بواسطة جهاز FWD ما يأتي:

- يوجد خلل إنشائي بشكل عام في طبقة القميص الإسفلتي.
- تدل المعطيات على أن اتجاه الذهاب هو عموماً أفضل حالاً من اتجاه الإياب ويظهر ذلك واضحاً بالمقارنة بين قيم E^* للاتجاهين

كما هو موضح في الشكل رقم (2)، ويعود السبب إلى أن الاتجاه السائد من حيث الحمولات هو باتجاه مدينة دمشق (الإياب).

2. بمقارنة قيم الثبات والانسياب ومعامل القساوة (نسبة الثبات إلى الانسياب) والمستنتجة من تجارب مارشال، مع قيم E^* المستنتجة وفق نموذج بيلنين وويتزاك، - انظر إلى الجدول رقم (1) والأشكال ذات الأرقام (3، 4، 5) نجد أنه لا توجد علاقة صريحة بين أي من قيم نتائج تجارب مارشال وقيم تنبؤ E^*، ويعود السبب إلى أن تجربة مارشال لا تجرى على العينات المستخرجة من الحقل نظراً إلى كون سطح التحميل الاسطواني يكون مضرباً نتيجة لعملية الاستخراج وتتبع شدة ودرجة الاضطراب لعدة عوامل منها بيئية وكفاءة آلة الاستخراج وخبرة العامل عليها وغير ذلك من عوامل، فضلاً عن الاختلافات في طبيعة التجربتين إذ أن طريقة مارشال طريقة تجريبية تقوم على تحقيق أفضل توازن بين متطلبات أو مواصفات تصميم الخلطة بتغيير نسبة الإسفلت، وقد تكون هذه المتطلبات متناقضة فيما بينها، وتؤثر فيما بعد على السلوك الإنشائي لطبقة الرصف الإسفلتية ضمن شروط الاستثمار، فمثلاً زيادة نسبة الإسفلت قد تكون إيجابية نحو تقليل حدوث الشقوق لكنها في الوقت نفسه تزيد فرص حدوث التخدد والتموج. بينما الهدف من استنتاج E^* وفق إما التجارب المخبرية أو التجارب الحقلية غير الإتلافية أو حتى نماذج التنبؤ هو تقييم الجودة النسبية للخلطة الإسفلتية تحت تأثير تغير الحرارة والحمولة.

3. تأثير التقادم على نتائج معامل المرونة الديناميكي:

تحدث تغيرات فيزيائية وكيميائية للرابط الإسفلتي خلال عمر الاستثمار قصير وطويل الأمد، إذ تتصلب الخلطة نتيجة تبخر وتطاير بعض المواد ضمن منظومة الرابط الإسفلتي، فضلاً عن تأكسد الإسفلت خلال سنوات الخدمة، الأمر الذي يسبب زيادة اللزوجة ومن ثمَّ زيادة معامل المرونة الديناميكي، يوضح الشكل رقم (6) تأثير الزمن على معامل المرونة الديناميكي المستنتج من نموذج بيلنين وويتزاك وذلك لثلاث درجات حرارة: (5^0C , 25^0C , 40^0C)، ونلاحظ أن الزيادة تكون واضحة خلال السنوات الأولى من الاستثمار خصوصاً عند درجات الحرارة المنخفضة، وتظهر بشكل واضح السلوكية اللزجة للخلطة الإسفلتية. بالنتيجة تتزايد اللزوجة ومن ثمَّ معامل المرونة الديناميكي مع تقدم الزمن خصوصاً في السنوات الأولى وتتناسب شدة التغير مع انخفاض درجات الحرارة.

4. تأثير تغير العمق على نتائج معامل المرونة الديناميكي:

كلما ازداد عمق الطبقات الإسفلتية انخفض تأثير كل من الشروط البيئية المحيطية وكذلك الحمولات على مواد الخلطة الإسفلتية وخصوصاً الرابط الإسفلتي، ومن ثمَّ تحافظ الخلطة الإسفلتية في الطبقات الدنيا على السلوكية المرنة أكثر من الطبقات العليا على حساب السلوكية اللزجة، أي بمعنى آخر تنخفض اللزوجة مع العمق، والمنحنى في الشكل رقم (7) يوضح النتائج التي تم التوصل إليها لثلاث درجات حرارة: (5^0C,25^0C,40^0C)، إذ نستنتج أنه تتناقص قيم E^* بشكل طفيف مع تغير العمق.

5. تأثير الحرارة وزمن التحميل على معامل المرونة الديناميكي:

تؤثر الحرارة وزمن تحميل الحمولة تأثيراً كبيراً على سلوكية المواد التي يدخل في تركيبها الإسفلت وخصوصاً الخلطات الإسفلتية، ويعبر عن ذلك من خلال معامل المرونة الديناميكي الذي يعرّف على أنه علاقة بين الإجهاد والتشوه كتابع لزمن تطبيق الحمولة والحرارة، وتبرز أهمية تحديده لتعيين سلوك الخلطة الإسفلتية والتي تعرف عادة على أنها ذات سلوك لزج مرن (viscoelastic)، حيث تتباين هذه السلوكية نتيجة تغير درجات الحرارة وزمن تطبيق الحمولة، فعند درجة حرارة معينة ولزمن تحميل قصير جداً يكون معامل المرونة الديناميكي مستقلاً عن الزمن ويقترب من معامل المرونة E (معامل يونغ)، ولزمن تحميل طويل يتناقص معامل المرونة الديناميكي بنسبة منتظمة ويصبح السلوك لزج تماماً، وعند زمن تحميل متوسط تظهر السلوكية اللزجة المرنة، كذلك يأخذ الإسفلت بالنسبة لدرجات الحرارة أشكالاً مختلفة فعند درجات الحرارة العالية تظهر أكثر السلوكية اللزجة، وعند الدرجات المنخفضة تظهر السلوكية المرنة.

تسمى العلاقة بين لوغاريتم زمن التحميل ولوغاريتم معامل المرونة الديناميكي بالمنحنى الأساسي (Master Curve)، ويوضح الشكل رقم (8) المنحنى الأساسي لعينات إسفلتية مأخوذة بعد مدة زمنية طويلة من الاستثمار ضمن شروط سورية (أتوستراد دمشق - قارة) وذلك لثلاث درجات حرارة مختلفة، ونلاحظ انخفاض معامل المرونة الديناميكي نتيجة زيادة زمن التحميل وشدة الانخفاض تتناسب مع زيادة درجات الحرارة، إذ نجد أنه عند درجة حرارة 5^0 C يكون تغير معامل المرونة الديناميكي أقل بكثير مقارنة بدرجات حرارة 25^0, 40^0 C وذلك بسبب أن السلوكية اللزجة تنخفض عند درجات الحرارة المنخفضة ومن ثمَّ تقل الحساسية لتأثير زمن التحميل، وينعكس ذلك على قيم معامل المرونة الديناميكي والمتعلق بقيم اللزوجة.

6. مقارنة بين القياسات الحقلية والقيم الحسابية لمعامل المرونة الديناميكي:

يظهر الجدول رقم (4) مقارنة بين قيم معامل المرونة الديناميكي المستنتجة من القياسات الحقلية بواسطة جهاز FWD بالحساب التراجعي، وقيم معامل المرونة الديناميكي المستنتجة من خلال نموذج بيلنين وويتزاك، أما الشكل رقم (9) فيوضح منحنى العلاقة بين هذه القيم حيث يتبين بالنتيجة أن العلاقة بين هذه القيم هي وفق المعادلة الآتية:

$$E^* (FWD) = 0.93 * E^* (Model) \qquad (11)$$

معامل الارتباط: $R^2 = 0.86$

المراجع

[1] Burmister. D.M, "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways". Highway Research Board, Vol. 23, 1943.

[2] Pellinen. T. K, and Witczak. M. W, "Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus", Journal Association of Asphalt Paving Technologists, (2002).

[3] National Cooperative Highway Research Program "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", NCHRP, Project 1-37A, Final Report, Part 2 "Design Inputs", Chapter 2 "Material Characterization", Illinois, March 2004.

[4] Per. Ullidtz, and Coetzee.N.F, "Analytical Procedures in Nondestructive Testing Pavement Evaluation" , In Transportation Research Record 1482, TRB, National Research Council, Washington, D.C.,1995.

[5] AASHTO, "Guide for Design of Pavement Structure (1993)", Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials, Chapter III and Index L.

[6] SHELL, "The Shell Bitumen Handbook", Published by Shell Bitumen, Chapter 15 "The mechanical properties of bituminous mixes". U.K. September 1991

[7] Pell. P.S, "Characterization of Bituminous and Bound Paving Materials", Conference on the Analytical Design of Flexible Pavements, University of Glasgow, 3rd to 5th April 1979.

[8] American Society for Testing and Materials, ASTM - D 4123-82 "Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures", ASTM - D3497-85 "Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures", Philadelphia, 1991.

[9] Garc a. G, and Thompson. M, "Hot Mix Asphalt (HMA) Dynamic Modulus Prediction" State of the Art of Pavement Structural Design and the New AASHTO Interim Guide: CONICYT Project, 2005.

[10] Strategic Highway Research Program, "Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt Aggregate Mixtures", Robert SHRP-A-383, USA, Washington D.C,1994.

[11] Mirza. M.W. and Witczak. M. W, "Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cement", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 64. 1995.

[12] A. Crovetti. James, Shahin. M. Y, E. Touma. Bassam, "Comparison of Two Falling Weight Deflectometer Devices, Dynatest 8000 and KUAB 2M-FWD". Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Pavement Moduli, ASTM 1026,1989.

[13] سعود. أ.د.أندراوس, التقـــرير النهائي الخاص بتنفيذ اختبارات وتقديم دراسات في مجال تقييم ودراسة الحصويات المنتجة في مقـــالع القـــطر إلى المؤسسة العامة للجيولوجيا والثروة المعدنية, جامعة دمشق 2005.

[14] بيانات الهيئة العامة للأرصاد الجوية بين عامي (1980 - 2005).

الملحق A

قائمة الجداول والأشكال

أ. قائمة الجداول:

- الجدول رقم (1): خواص الخلطة الإسفلتية للعينات المأخوذة من طبقة القميص الإسفلتي للطريق المدروس.
- الجدول رقم (2): معامل المرونة الديناميكي E^* المحسوب من نموذج التنبؤ للعينات المأخوذة من طبقة القميص الإسفلتي للطريق المدروس.
- الجدول رقم (3): مقارنة بين قيم معامل المرونة الديناميكي ونتائج تجربة مارشال (الثبات والانسياب ومعامل القساوة).
- الجدول رقم (4): مقارنة بين قيم معامل المرونة الديناميكي المستنتجة من القياسات الحقلية بواسطة جهاز FWD والمستنتجة من خلال نموذج التنبؤ.

ب. قائمة الأشكال:

- الشكل رقم (1): جهاز FWD.
- الشكل رقم (2): معامل المرونة الديناميكي المستنتج وفق قياسات FWD.
- الشكل رقم (3): مقارنة ثبات مارشال مع معامل المرونة الديناميكي E^*.
- الشكل رقم (4): مقارنة الانسياب بمعامل المرونة الديناميكي E^*.
- الشكل رقم (5): مقارنة معامل القساوة مع معامل المرونة الديناميكي E^*.
- الشكل رقم (6): تأثير التقادم بمعامل المرونة الديناميكي E^*.
- الشكل رقم(7): تأثير تغير العمق بمعامل المرونة الديناميكي E^*.
- الشكل رقم(8): المنحنى الأساسي (Master Curve) لمعامل المرونة الديناميكي E^* عند ثلاث درجات حرارة مختلفة (5^0 C , 25^0 C , 40^0 C).
- الشكل رقم(9): منحنى العلاقة بين قيم معامل المرونة الديناميكي المستنتجة من القياسات الحقلية بواسطة جهاز FWD، وقيم معامل المرونة الديناميكي المستنتجة من خلال نموذج بيلنين وويتزاك.

الجدول رقم (1)

رقم العينة		المحور %		المار %	الوزن النوعي المحجمي للتربة	الوزن النوعي الظاهري للحصويات	الوزن النوعي المحجمي للحصويات	الوزن النوعي الفعال للحصويات	الوزن النوعي للإسفلت	الوزن النوعي الأعظمي	نسبة المشرب	نسبة الفراغات الهوائية	نسبة الإسفلت إلى الحصويات	نسبة الإسفلت إلى الخلطة	نسبة الإسفلت الفعالة
		3/4"	38"	no. 4	no. 200										
						G_{sb}	G_{sa}	G_{sb}	$G_{se}=(G_{sb}+G_{sa})/2$	G_b	G_{mm}	Pb_a %	V_a %	%	%	V_{ef} %
الطريق الحر	1	0	16.64	35.72	6.62	2.268	2.714	2.565	2.640	1.01	2.406	1.111	5.73	6.41	6.02	4.98
	4	1.63	32.74	40.76	7.67	2.259	2.782	2.615	2.699	1.01	2.498	1.195	9.57	5.04	4.80	3.66
	10	0	16.45	49.78	2.26	2.314	2.800	2.610	2.705	1.01	2.438	1.359	5.10	6.98	6.53	5.26
	13	0	13.52	37.07	4.12	2.232	2.758	2.615	2.687	1.01	2.452	1.028	8.97	6.11	5.76	4.79
	17	0	19.01	48.56	4.38	2.284	2.758	2.615	2.687	1.01	2.445	1.028	6.58	6.33	5.95	4.99
	19	0	18.76	37.79	7.43	2.213	2.700	2.600	2.650	1.01	2.423	0.733	8.68	6.12	5.77	5.08
	22	0	6.67	35.63	3.55	2.223	2.700	2.600	2.650	1.01	2.430	0.733	8.49	5.91	5.58	4.89
	29	0	10.84	36.08	5.25	2.256	2.700	2.580	2.640	1.01	2.452	0.890	7.98	5.00	4.76	3.92
	33	0	12.07	20.82	5.85	2.182	2.752	2.600	2.676	1.01	2.442	1.103	10.64	6.17	5.81	4.77
	36	1	9.34	18.44	6.28	2.195	2.745	2.615	2.680	1.01	2.415	0.937	9.12	7.10	6.63	5.75
الطريق	3	0	19.48	49.35	3.00	2.198	2.758	2.615	2.687	1.01	2.448	1.028	10.23	6.22	5.86	4.89
	10	1.2	24.85	41.39	6.08	2.281	2.758	2.615	2.687	1.01	2.442	1.028	6.60	6.42	6.03	5.07
	11	0	19.48	49.35	3.00	2.255	2.800	2.610	2.705	1.01	2.458	1.359	8.26	6.38	6.00	4.72
	13	2	11.65	22.44	7.28	2.333	2.758	2.615	2.687	1.01	2.521	1.028	7.45	4.12	3.96	2.97
	17	0	5.76	16.94	7.9	2.228	2.758	2.615	2.687	1.01	2.475	1.028	9.98	5.42	5.15	4.17
	27	0.46	10.61	20.75	3.63	2.223	2.711	2.602	2.657	1.01	2.491	0.796	10.77	4.24	4.07	3.31
	29	0	20.54	35.37	3.12	2.211	2.727	2.591	2.659	1.01	2.433	0.997	9.14	6.02	5.68	4.74
	30	1.92	24.64	33.34	3.47	2.199	2.751	2.591	2.671	1.01	2.430	1.168	9.49	6.43	6.04	4.94
	34	0	12.2	36.5	3.35	2.283	2.756	2.611	2.684	1.01	2.535	1.045	9.93	3.67	3.54	2.53
	36	6.32	23.52	43.06	5.12	2.277	2.754	2.600	2.677	1.01	2.426	1.117	6.13	6.70	6.28	5.23

الجدول رقم (2)

الاتجاه	رقم العينة	تواتر الحمولة Hz	درجة الحرارة	اللزوجة 10^6 Poise	E^* 10^5 Psi	المشاهدة البصرية
ذهاب	1	0.10	33^0 C	0.18072937	1.54396	تخدد طفيف
	4	0.10	33^0 C	0.18072937	1.44247	تخدد طفيف في الحارة الوسط
	10	0.10	33^0 C	0.18072937	1.43422	تموج طفيف
	13	0.10	33^0 C	0.18072937	1.16187	تموج واضح وتخدد
	17	0.10	33^0 C	0.18072937	1.48331	هبوط في الكتف
	19	0.10	33^0 C	0.18072937	1.27317	هبوط طفيف
	22	0.10	33^0 C	0.18072937	1.13622	تشققات مختلفة وهبوط
	29	0.10	33^0 C	0.18072937	1.39963	تشققات بسيطة
	33	0.10	33^0 C	0.18072937	0.97166	تشققات مختلفة وتصدع
	36	0.10	33^0 C	0.18072937	1.02534	تشققات مختلفة وتخدد
إياب	3	0.10	33^0 C	0.18072937	1.06064	تشققات
	10	0.10	33^0 C	0.18072937	1.53302	تطاير
	11	0.10	33^0 C	0.18072937	1.28177	هبوط في الكتف
	13	0.10	33^0 C	0.18072937	1.61732	هبوط طفيف في الكتف
	17	0.10	33^0 C	0.18072937	1.07016	تخدد وهبوط واضح في الكتف
	27	0.10	33^0 C	0.18072937	1.02576	تشققات وتصدعات
	29	0.10	33^0 C	0.18072937	1.13051	تموج مع بض التشققات
	30	0.10	33^0 C	0.18072937	1.11224	تشققات تمساحية وهبوط وتموج
	34	0.10	33^0 C	0.18072937	1.28821	هبوط في الكتف
	36	0.10	33^0 C	0.18072937	1.57699	شق طولي محوري

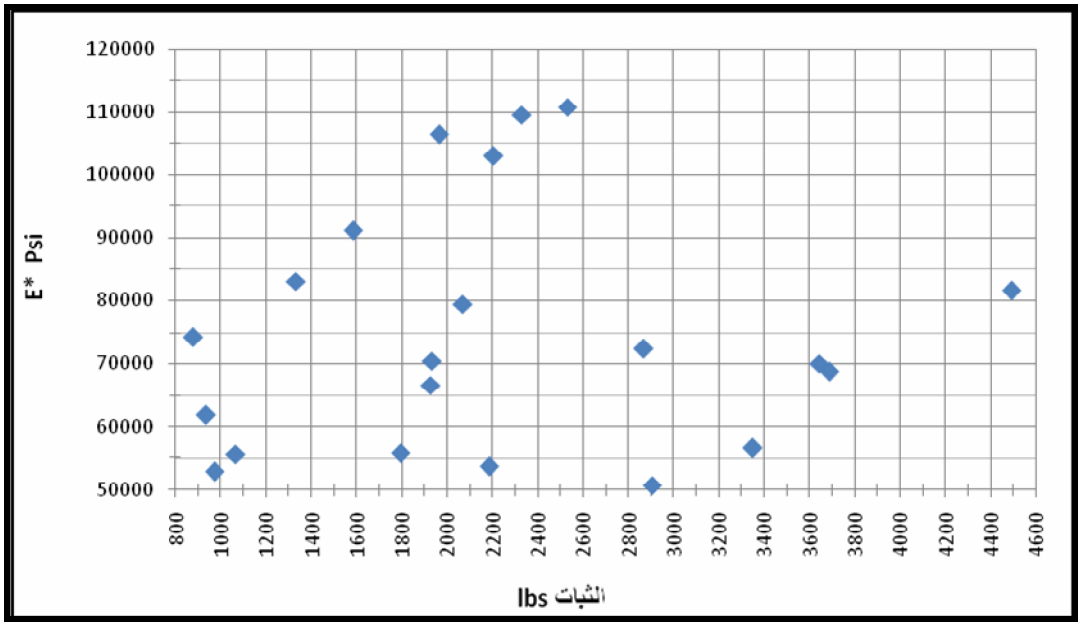
الجدول رقم (3)

رقم النقطة	رقم الطبقة	الاتجاه	الحرارة C	زمن التحميل sec	E^* Psi	الثبات Pound	التشوه in	معامل القساوة P./in
10	1	ذهاب	60	60	102921	2206	0.152	14514
	2	ذهاب	60	60	70091	3645	0.182	20038
	3	ذهاب	60	60	66588	1927	0.201	9598
17	1	ذهاب	60	60	106401	1963	0.157	12464
	2	ذهاب	60	60	72380	2867	0.161	17764
	3	ذهاب	60	60	68753	3687	0.183	20139
19	1	ذهاب	60	60	91118	1583	0.165	9573
	2	ذهاب	60	60	61848	935	0.242	3869
20	1	ذهاب	60	60	81613	4491	0.285	15733
	2	ذهاب	60	60	55608	1064	0.335	3180
	3	ذهاب	60	60	52833	972	0.315	3087
	4	ذهاب	60	60	50707	2903	0.248	11716
5	1	إياب	60	60	110783	2530	0.187	13531
	2	إياب	60	60	79436	2068	0.193	10719
	3	إياب	60	60	55782	1794	0.230	7816
10	1	إياب	60	60	109576	2328	0.169	13753

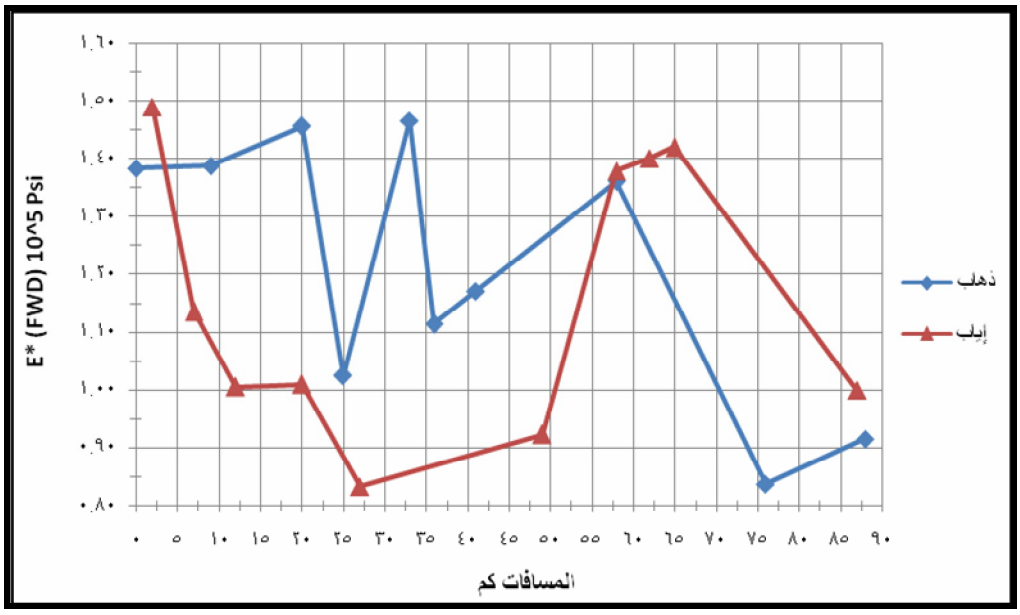
رقم النقطة	رقم الطبقة	الاتجاه	الحرارة	زمن التحميل	E^*	الثبات	التشوه	معامل القساوة
			C	sec	Psi	Pound	in	P./in
	2	إياب	60	60	74238	879	0.201	4377
	3	إياب	60	60	70479	1934	0.205	9446
11	1	إياب	60	60	83098	1331	0.154	8672
	2	إياب	60	60	56528	3350	0.266	12606
	3	إياب	60	60	53695	2185	0.277	7893

الجدول رقم (4)

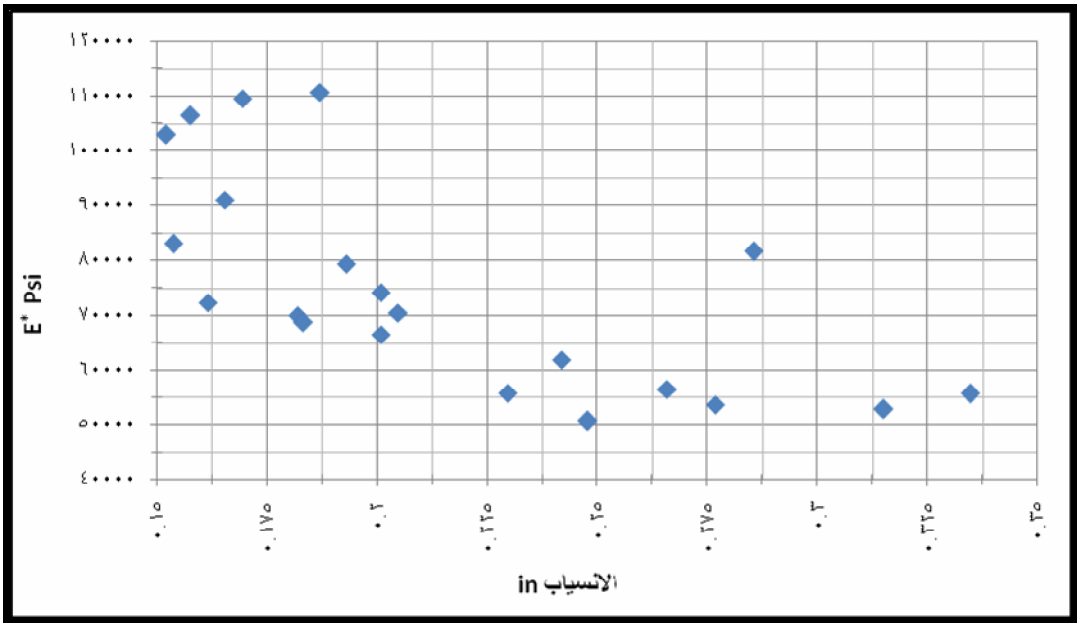
الاتجاه	رقم العينة	E^* (model) 10^5 Psi	E^* (FWD) 10^5 Psi
ذهاب	1	1.543959	1.3833
	4	1.442468	1.38765
	10	1.434217	1.4558
	13	1.161874	1.0237
	17	1.483314	1.46595
	19	1.273174	1.1136
	22	1.13622	1.17015
	29	1.399632	1.3601
	33	0.971659	0.83665
	36	1.025338	0.91495
إياب	3	1.060644	0.99905
	10	1.533023	1.41955
	11	1.281767	1.4007
	13	1.617317	1.37895
	17	1.070163	0.9222
	27	1.025758	0.8323
	29	1.130512	1.0092
	30	1.112243	1.00485
	34	1.288208	1.13535
	36	1.576987	1.48915



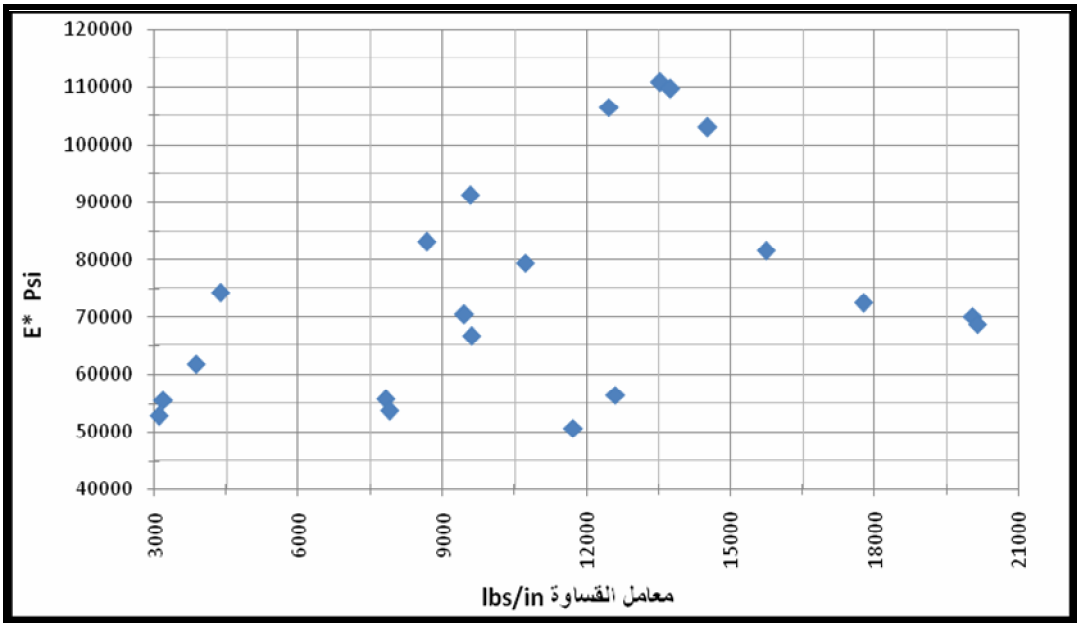
الشكل رقم (2)



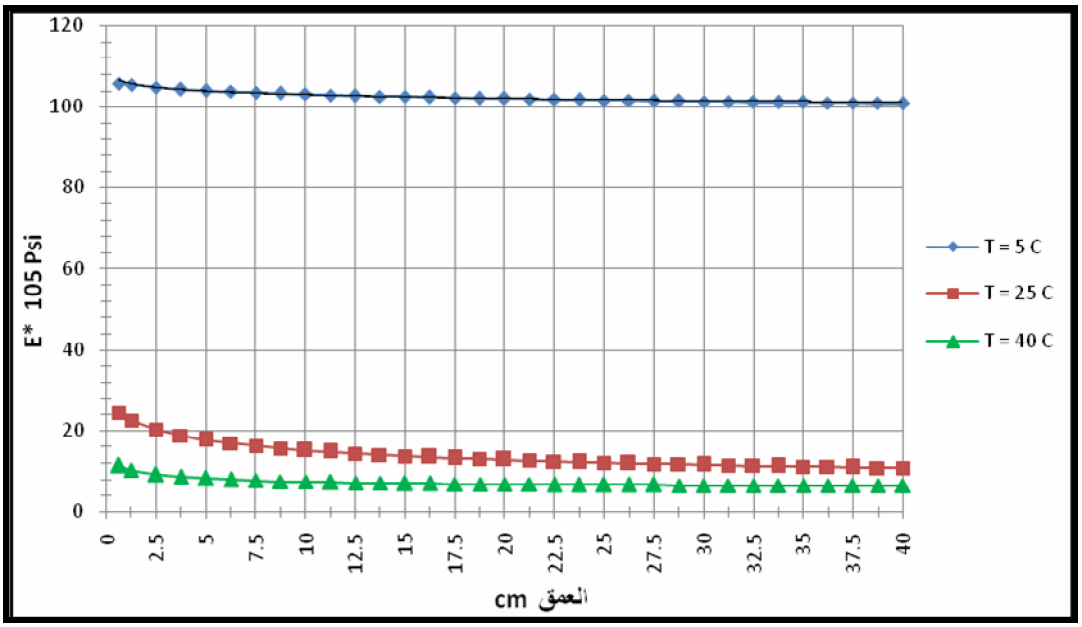
الشكل رقم (3)



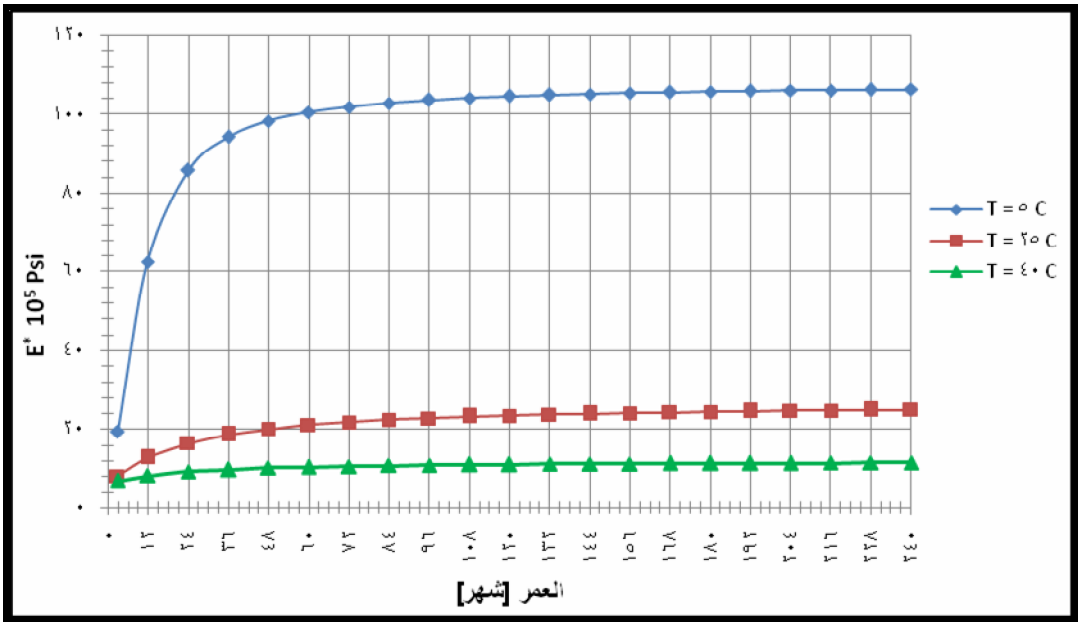
الشكل رقم (4)



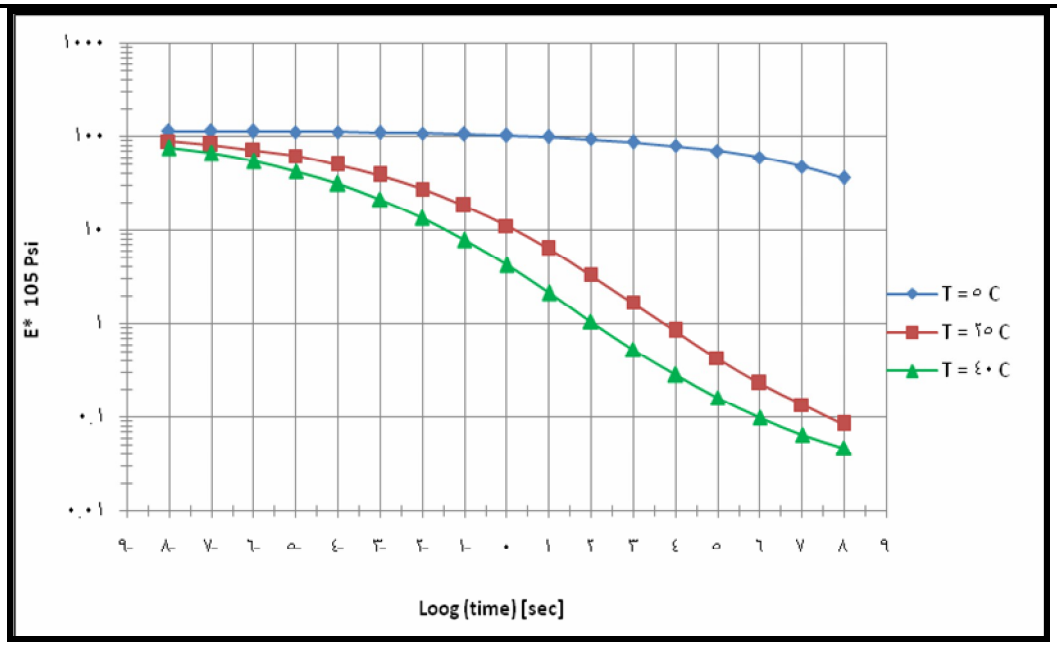
الشكل رقم (5)

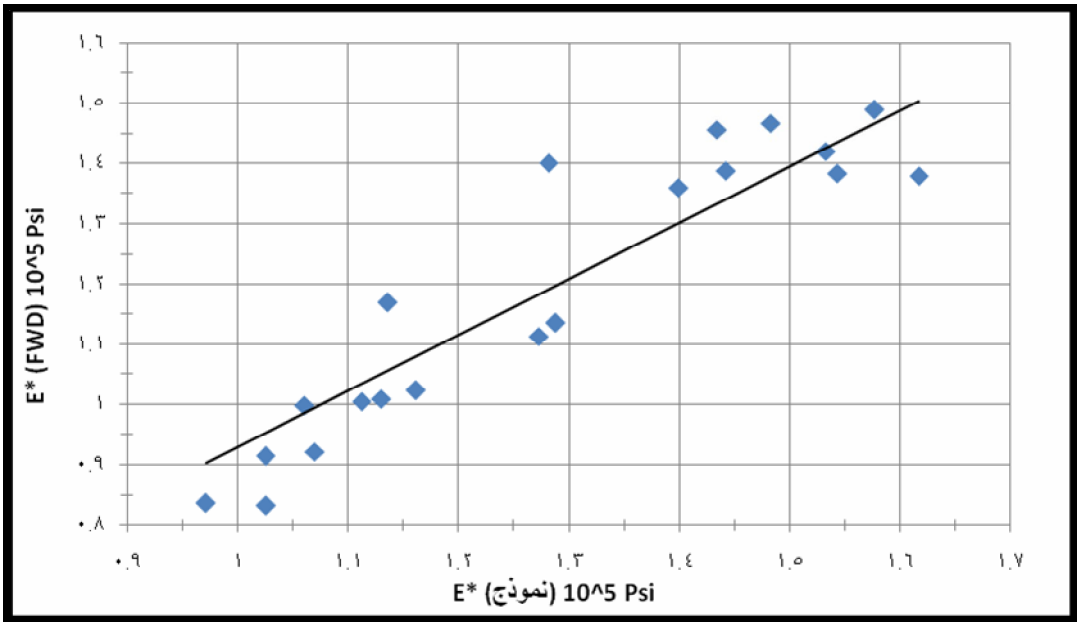


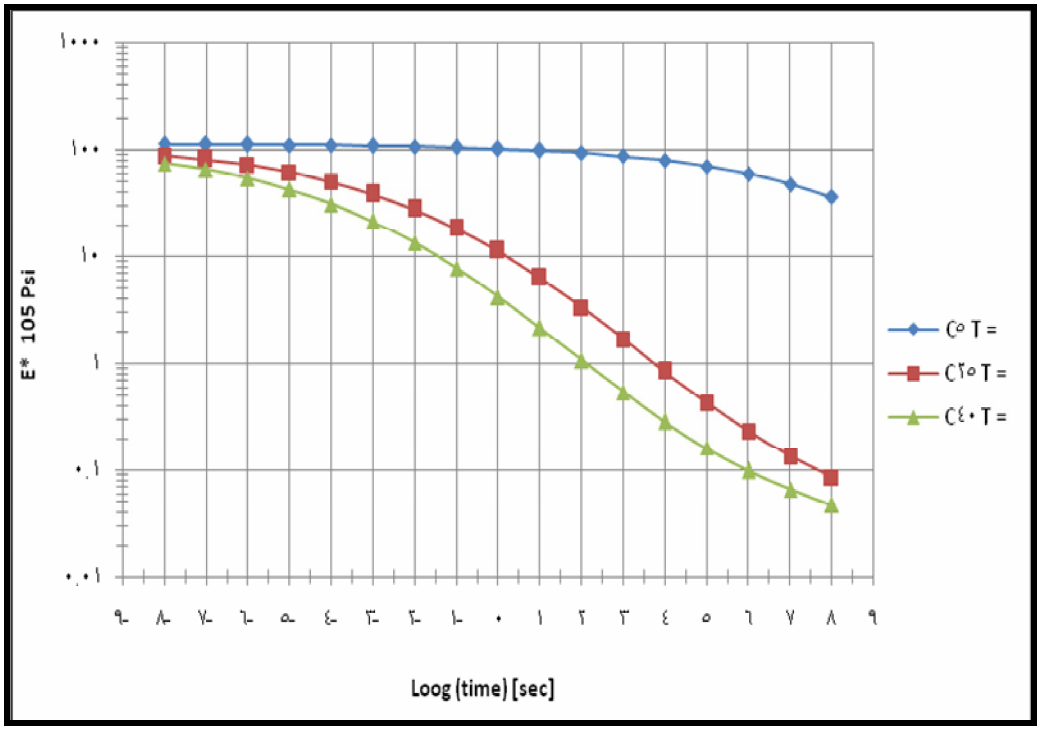
الشكل رقم(6)



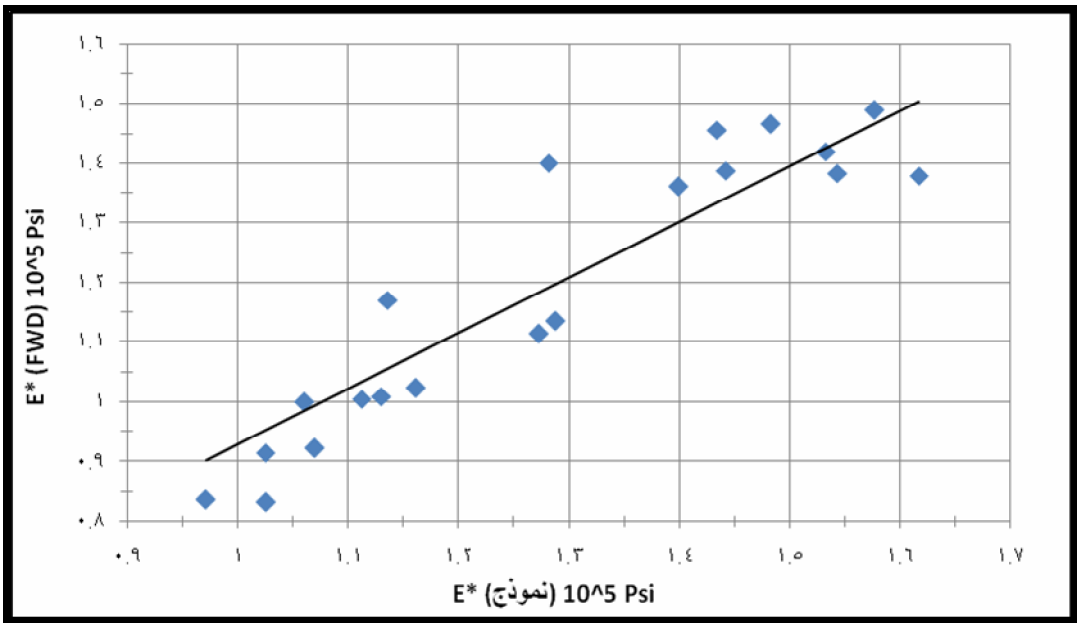
الشكل رقم(7)


E* 105 Psi
Loog (time) [sec]
T = ٥ C
T = ٢٥ C
T = ٤٠ C


E* (FWD) 10^5 Psi
E* (نموذج) 10^5 Psi



الشكل رقم (8)



الشكل رقم (9) العلاقة بين قيم E^* الحسابية والحقلية

.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/4/28.