مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (2) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (2) 2016

دراسة عملية لتأثير خصائص مواد و سطوح الترميم على إجهاد الالتصاق

الدكتور عماد فاضل*
الدكتور علي خيربك **

(تاريخ الإيداع 29 / 11 / 2015. قُبِل للنشر في 7/ 3 / 2016)

□ ملخّص □

يُعتبر ترميم العناصر الإنشائية من الأعمال الأكثر حضوراً في عالم البناء، يعود ذلك لقصور في التنفيذ أحياناً، و للظروف القاسية التي تتعرض لها المنشآت الهندسية أحياناً أخرى. تُستخدم في عمليات الترميم و التدعيم مواد خاصة يجب أن تتصف بسرعة التصلب و المقاومة و الديمومة العاليتين و جودة الالتصاق مع السطوح المعدة للترميم.

قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير طبيعة مادة الترميم و السطح المقابل على نجاح الترميم و الذي يُعتبر إجهاد الالتصاق من أهم مؤشراته. اعتمدنا في قياس إجهاد الالتصاق على تقنية نزع مادة الترميم عن سطح محدد بتطبيق إجهاد شد مباشر عليه لاقتلاعه عن السطح (Pull Off Adhesion Testing – ASTM D4541).

تُظهر النتائج التي حصلنا عليها الأهمية القصوى لخصائص مادة الترميم و طبيعة السطح على إجهاد الالتصاق المقاس، إذ تراوحت قيم إجهاد الالتصاق على السطوح بين 0.2 و 3Mpa. و تأثرت قيم الإجهاد بعاملين رئيسيين هما مقاومة مادة الترميم المطبقة و قوامها، مع الإشارة إلى أن القوام يجب أن يترافق مع قيم جيدة للمقاومة الميكانيكية و هو ما يستدعي العمل على تحسين القوام من خلال استخدام بعض الملدنات عالية الأداء، أو الإضافات البوليميرية الخاصة كمطاط الستيرين بوتادين (SBR *styrene–butadiene rubber*).

الكلمات المفتاحية : إجهاد الالتصاق، اختبار الالتصاق pull off test، مواد الترميم، المونة الإسمنتية، مطاط الستيرين بوتادين SBR.

*أستاذ مساعد – قسم هندسة و إدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.
**أستاذ – قسم هندسة و إدارة التشييد – كلية الهندسة المدنية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (38) العدد (2) 2016
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (2) 2016

Etude pratique de l'influence des propriétés des matériaux et des surfaces de restauration sur la contraint d'adhésion

Dr. Imad Fadel [*]
Dr. Ali KHEIRBEK [**]

(Déposé le 29 / 11 / 2015 . Accepté 7 / 3 / 2016)

□ Résumé □

La restauration et la réparation des éléments des structures est un travail bien répandu en construction, cela est dû soit au non respect des cahiers des charges, soit aux conditions sévères dont les bâtiments sont exposés. On utilise souvent pour la restauration des matériaux spécifiques ayants une bonne résistance et durabilité, un durcissement rapide et une bonne qualité d'adhésion avec les surfaces à réparer.

Cet article met le point sur l'influence des propriétés des matériaux et des surfaces de restauration sur la contraint d'adhésion. Cette dernière a été mesurée par l'essai d'arrachement appelé Pull Off Adhesion Testing – ASTM D4541 qui consiste à appliquer une contrainte de traction direct sur la surface à tester.

Les résultats obtenus montres bien l'importance des matériaux utilisés et la qualité des surfaces à réparer. Les valeurs mesures de la contrainte d'adhésion varient entre 0.2 et 3MPa. deux facteurs principaux contrôle ces valeurs, il s'agit de la résistance et de la consistance des matériaux de réparation, cette consistance qui doit être visqueuse avec une facilité d'application et d'infiltration dans les surfaces, ce qu'on peut atteindre par des additions spéciales comme les super plastifiants, et quelques polymères comme le styrene-butadiene rubber SBR.

Mots clés : Contraint d'adhésion, Pull Off Adhesion Testing, matériaux de réparation, mortier de réparations, styrène-butadiène rubber SBR.

[*] **Professor – Department Of Construction Engineering and Management – Tishreen University – Lattakia- Syria.**
[**] **Assistant Professor – Department Of Construction Engineering and Management – Tishreen University – Lattakia-**

مقدمة:

يترافق التطور العمراني غالباً مع تطور تقنيات التشييد و مواد البناء، و تتأثر المنشآت بشكل مباشر بهذه العوامل، فتكبر الديمومة و يزداد العمر التصميمي للمنشأة كلما تم التقيد بمعايير التنفيذ من حيث تقنياته و ضبط جودة المواد المستخدمة فيه، و على العكس، ينقص هذا العمر عندما لا تتم مراعاة اشتراطات التنفيذ و المواد.

ازداد في الآونة الأخيرة الاهتمام بترميم المنشآت الهندسية و تدعيمها، و استخدمت لذلك مواد و تقنيات بسيطة في البداية، لتتطور بعد ذلك أساليب التنفيذ، و تُستنبط مواد جديدة خاصة بعمليات الترميم من حيث امتلاكها لخصائص ميكانيكية عالية تتجلى في المقاومات المرتفعة و خصوصاً في العمر المبكر، و قابلية جيدة للتشوه تحت تأثير الأحمال و العوامل الخارجية، و مقاومة مميزة للتقلصات و التشققات، و قدرة عالية على الالتصاق في الحالتين الطرية و الصلبة.

صيانة و ترميم المنشآت: (Restauration et réparation des bâtiments)

تتمثل صيانة و ترميم المنشآت البيتونية بإجراء تحسينات و إصلاحات إنشائية على البناء بهدف :

- ❑ إعادة تأهيله
- ❑ تحسين ظروف استثماره
- ❑ إطالة عمره
- ❑ زيادة عوامل الأمان عند الاستثمار

و لنجاح الترميم، لا بد من توفر بعض العوامل للحصول على ترميم يدوم طويلاً و يسمح بإعادة استثمار المنشأة بعد ترميمها. يمكن تلخيص عوامل نجاح الترميم بما يلي:

- ❑ الاستقصاء الجيد لحالة المنشأة المراد ترميمها
- ❑ استخدام مواد ترميمية جيدة مناسبة تفي بالغرض المطلوب
- ❑ اتباع الطرق والاشتراطات السليمة في تطبيق هذه المواد
- ❑ التحضير الجيد للسطوح قبل الترميم
- ❑ المراقبة والتحقق من نجاح الترميم بعد إنجازه

تُستخدم في صيانة و ترميم المنشآت الهندسية مواد مختلفة تُطبق على السطوح المراد إصلاحها بعد معالجتها بشكل يتلاءم مع طبيعة المادة المستخدمة، و التقنية المستخدمة في الترميم. يجب أن تمتلك هذه المواد خصائص ميكانيكية مميزة، كما يجب أن تتلاءم مع طبيعة السطوح المراد ترميمها و خصائصها من حيث الاستوائية و الخشونة و الرطوبة و موقعها من المنشأة.

و عند ترميم السطوح البيتونية، لا بد من توافق مواصفات مواد الترميم مع مواصفات البيتون المرمم. و كمثال على هذا التوافق نُشير إلى ضرورة التحقق من:

a) **التوافق في معامل التمدد الحراري:** و الذي من شأنه ضمان عدم حدوث انتقالات متفاوتة بسبب الحرارة لكل من مادة الترميم و البيتون المرمم مما سيزيد من إجهاد القص على سطح الاتصال و يؤدي بالتالي إلى انهيار الترميم.

b) التوافق في معامل المرونة: و الذي سيتسبب في حال عدم تحققه تشوهات متباينة تحت تأثير الأحمال تعمل على إضعاف سطح الاتصال بين مادة الترميم و البيتون المرمم.

c) التوافق في تقلص التجفاف: و الذي سيتسبب في حال عدم التطابق بين تقلص مادة الترميم و تقلص البيتون المرمم إلى خلق إجهادات قص على السطح الفاصل ستعمل بعد زيادتها عن حد معين على فك الارتباط و حدوث الانهيار.

مواد صيانة و ترميم المنشآت:

نبين فيما يلي أهم المواد الممكن استخدامها في صيانة و ترميم المنشآت البيتونية، مع الإشارة إلى أن التطور التقني السريع يطرح بشكل مستمر في الأسواق مواد جديدة تتوافق مع المتطلبات الحديثة في الترميم كمقاومة الحرارة المرتفعة، و الرطوبة العالية، و المواد المخربة، و الالتصاق الشديد بين مادة الترميم و السطح المرمم.

- ❑ المونة الإسمنتية التقليدية
- ❑ المونة الإيبوكسية
- ❑ المونة و الملاط الانتفاخي
- ❑ البيتون التقليدي
- ❑ البيتون و المونة المعدلة باللاتكس
- ❑ البيتون و المونة المعدلة بالبوليميرات
- ❑ بيتون الألياف
- ❑ مواد أخرى

تختلف هذه المواد فيما بينها بخصائص متعددة ينبغي على المهندس المنفذ الدراية الجيدة بها و ذلك لاختيار المناسب منها في عمليات الإصلاح المطلوبة. فالمونة الإسمنتية التقليدية و التي استخدمها الجميع في أعمال الإصلاح والترميم تصلح للعناصر التي لم ينكشف فيها فولاذ التسليح و لم تتأثر سلامتها الإنشائية. فيما تُستخدم المونة الإيبوكسية في إغلاق الشقوق الخطرة، و لصق العناصر التي حصل فيها بعض الانهيار، و زرع التشاريك لتثبيت شبكات التسليح الجديدة، و تقسية الأرضيات الصناعية من البيتون. و يُستخدم البيتون التقليدي لصب الأجزاء ذات المقاطع الكبيرة نسبياً و التي تتجاوز أبعادها الـ 10سم في العناصر التي حصل فيها تآكل أو تخرب كبيران. و تُستخدم المونة والبيتون المعدل باللاتكس و البوليميرات لترميم المنشآت التي يُخشى فيها من التسرب و عمليات التقلص و التمدد، و من عمليات انفصال مواد الترميم عن السطح المرمم. أما بيتون الألياف و الذي يتشكل بإضافة الألياف المعدنية أو ألياف البولي بروبيلين أو الألياف الزجاجية إلى البيتون أثناء صبه بهدف إكسابه مقاومة عالية ضد الكسر المفاجئ، و زيادة مقاومته على الشد و الأحمال الديناميكية، فُيستخدم في عمليات الترميم التي تُطبق باستخدام تقنية القذف على السطوح الأفقية و العمودية، و ترميم الأرضيات المسلحة التي سيتعذر فيها إضافة شبكات تسليح جديدة .

لا بد من الإشارة هنا إلى أن استخدام هذه المواد في عمليات الترميم سيأتي بالمردود المطلوب في حال تم تطبيقها بالتقنية المناسبة، و بعد تحضير السطح المعد للترميم بالشكل المناسب.

يبين الجدول 1 خصائص بعض المواد التي تُستخدم في ترميم المنشآت:

الجدول (1): خصائص بعض المواد التي تُستخدم في ترميم المنشآت

الخاصية	مونة الريزين	المونة الإسمنتية المعدلة بالبوليميرات	المونة الإسمنتية التقليدية
المقاومة على الضغط (Kg/cm^2)	500–1000	300–600	200–500
المقاومة على الشد (Kg/cm^2)	50–150	5–50	20–35
معامل المرونة E (GPa)	10–20	15–25	20–30
معامل التمدد الحراري (λ)	$5–10\times10^{-6}$	$3–5\times10^{-6}$	2.5×10^{-6}
التشرب الأعظمي للماء (%)	1–2	0.1–0.5	5–15
تحمل الحرارة (°C)	40–80	100–300	300

الاشتراطات الواجب توفرها في السطوح قبل الترميم:

لضمان نجاح عملية الترميم و التي ترتبط بشكل وثيق بالالتصاق الجيد بين مواد الترميم و السطوح المرممة، لا بد من تنفيذ بعض الإجراءات قبل تطبيق مواد الترميم [8]. نبين فيما يلي أهم هذه الإجراءات:

a) إزالة الكتل العالقة بشكل ضعيف عن السطوح و إزالة الغبار و الأوساخ و الزيوت و غيرها من المواد الدهنية؛

b) الاستمرار في عمليات الإزالة حتى الوصول إلى منطقة سليمة من البيتون؛

c) يمكن أن تُستخدم في عمليات الإزالة الميكانيكية الفراشي المعدنية أو معدات الضرب بالرمل؛

d) تنظيف السطوح بالماء المضغوط لإزالة أدق الشوائب التي قد تعيق الالتصاق؛

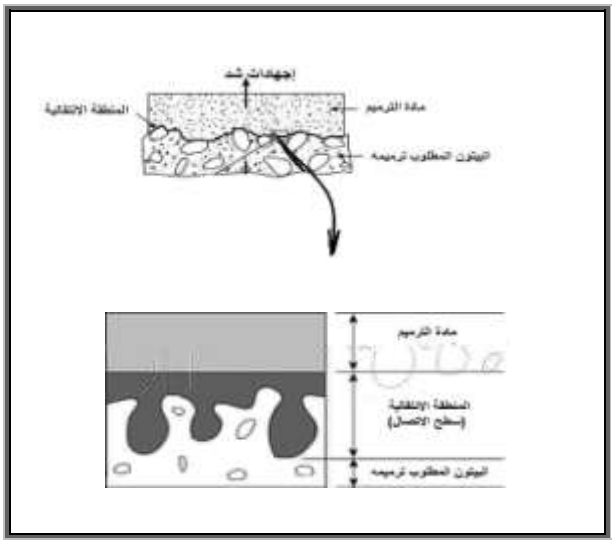
e) تجفيف السطوح، مع الإشارة إلى أن عملية التجفيف ترتبط بطبيعة مادة الترميم التي ستُستخدم. فعند استخدام الإيبوكسي في عمليات الترميم، لا بد من التحقق من عمليات تجفيف فعالة قد نستخدم فيها الهواء الساخن للوصول إلى رطوبة دنيا لا تتعدى قيمتها الـ 4%. أما استخدام البيتون التقليدي أو البيتون المعدل باللاتكس فيمكن معه قبول سطح رطب؛

f)طلاء السطح بطبقة من الأساس بسماكة قليلة من مادة تتوافق خواصها مع مادة الترميم التي ستستخدم فيما بعد لتشكيل طبقة وسيطة بين مادة الترميم و السطح المراد ترميمه تعمل على زيادة الالتصاق.

آلية التصاق مواد الترميم مع السطوح البيتونية:

عند إصلاح عنصر بيتوني، لا بد من التمييز بين مادتين مختلفتين. الأولى هي سطح الترميم من البيتون و الذي يعود إنشاؤه عادة لعمر بعيد، و الذي يمكن اعتباره مستقراً من الناحية الحجمية. و الثانية هي مادة الترميم و التي من المنتظر أن يطرأ عليها تغيرات حجمية هامة خلال المراحل الأولى من عمرها التي ستتعرض فيها للعوامل الجوية المختلفة. يمكن التمييز عادة بين نوعين من الترميم: إعادة بناء الأجزاء المتخربة من العناصر البيتونية بسماكات كبيرة نسبياً، أو الترميم بطبقات رقيقة. ففي الحالة الأولى ينبغي نزع كمية كبيرة من البيتون المتخرب و هو ما يستدعي عمليات التدعيم عند نزع البيتون المتخرب مع إضافة شبكة تسليح تعويضية في بعض الحالات. و في الحالة الثانية يقتصر العمل على نزع البيتون المتخرب بعمق عدة ميليمترات (بين 25 و 100mm)، و استبداله ببيتون آخر مع أو بدون شبكة تسليح تعويضية للوصول إلى المظهر الجمالي المناسب للعنصر [Saucier, 1990].

يمكن أن تختلف الخصائص الميكانيكية لمادة الترميم و البيتون المرمم، لذلك اعتبر العديد من الباحثين أن منظومة الترميم مركبة تتعلق مقاومة سطح الاتصال فيها بخصائص سطح البيتون و كيفية تحضيره للترميم من جهة، و بخصائص مواد الترميم من جهة أخرى. كما تلعب العوامل الخارجية كالحرارة دوراً هاماً في مقاومة سطح الاتصال. يدل هذا على أن سطح الاتصال على المستوى الميكروسكوبي يمثل منطقة انتقالية بين المكونين الأساسيين لمنظومة الترميم. تتميز هذه المنطقة بمسامية أكبر من مسامية العجينة الإسمنتية الرابطة. يعتبر باحثون Emmons et coll. [1994] آخرون أن منظومة الترميم يمكن أن تُقسم إلى ثلاثة أطوار (الشكل 1): مادة الترميم، و البيتون المرمم، و المنطقة الانتقالية [9]. مع ارتباط جودة الترميم و كفاءته بخصائص كل من هذه الأطوار الثلاثة.



الشكل 1 : مكونات منظومة ترميم البيتون

و لفهم آلية التصاق مواد الترميم على السطوح المرممة، يمكن التمييز بين صنفين من الالتصاق: الالتصاق الميكانيكي (l'adhésion mécanique)، و الالتصاق النوعي (l'adhésion spécifique) [4] (Courard, 1990).

1. الالتصاق الميكانيكي (l'adhésion mécanique):

يحصل هذا الالتصاق بفعل تغلغل مادة الترميم في حالتها الطرية في فراغات و مسامات السطح المطلوب ترميمه و العمل بالتالي كلاصق من خلال تعشقها في هذه الفراغات بعد التصلب. على المستوى الماكروسكوبي، تتيح خشونة السطح المعد للترميم لسطح الاتصال بمقاومة قوى الشد و القص [6] (Emmons et coll. 1994). اقترح بعض الباحثين (Emmons et coll.) تسمية آلية إعاقة الحركة هذه بالتداخل الميكانيكي (l'interpénétration mécanique)، وتزداد قوى المقاومة هذه كلما زادت خشونة سطح الترميم.

لا يسمح ميكانيزم الالتصاق الميكانيكي بتفسير قوى الالتصاق الكبيرة على بعض السطوح غير الخشنة كالسطوح الزجاجية الصقيلة [5] (Courard, 1999). لذلك فكر الباحثون بميكانيزم آخر للالتصاق هو الالتصاق النوعي.

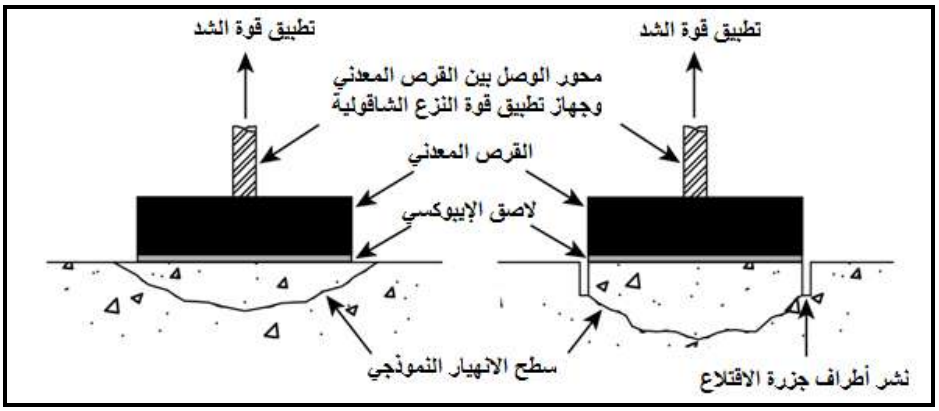
2. الالتصاق النوعي (l'adhésion spécifique):

يجمع ميكانيزم الالتصاق النوعي بين الميكانيزمات التي تتعلق بالسطح النوعي المتمثل بمجموع مساحات السطوح الملامسة لمادة الترميم. يدخل في هذا السياق أيضاً التأثير الجزيئي المتبادل بين الطورين المختلفين المتلامسين (مادة الترميم و السطح المرمم). يتمثل هذا التأثير بقوى تجاذب كهربائي. تشكل قوى فاندرفالس Van der Waals و الاتصال عبر جسور هيدروجينية أساس هذا التأثير الجزيئي المتبادل. يُضاف إلى هذه القوى الجانب الترموديناميكي في الالتصاق و الذي يرتكز على طاقة الأطوار المتلامسة عند إصلاح عنصر بيتوني. تُمثل قوى التوتر السطحي، و البلل و الادمصاص على السطح المعد للترميم و زوايا الاحتكاك بين الأطوار الثلاثة المتواجدة أثناء الترميم (الطور الصلب و السائل و الغازي) المظاهر الثلاثة للفعل الترموديناميكي. يُضاف إلى هذه المظاهر قوى الارتباط الكيميائي التي تؤمن طاقة ارتباط أكبر بعشرة إلى مائة مرة من قوى فاندرفالس، مع الإشارة هنا إلى أنه في حالة ترميم السطوح البيتونية لن تحضر هذه القوى لعدم حضور التفاعلات مع البيتون القديم.

اختبار النزع (Pull Off Adhesion Testing) لقياس مقاومة الالتصاق:

يعتمد قياس إجهاد الالتصاق بهذه الطريقة على لصق قرص معدني بقطر محدد و باستخدام لاصق فعال و سريع كالإيبوكسي على السطح المراد قياس إجهاد التصاقه مع سطح آخر، ثم نزع هذا القرص بتطبيق إجهاد شد مباشر عليه و قياس قيمة الإجهاد اللازم الذي تم تطبيقه لقياس مقاومة الالتصاق [2]. من الممكن استخدام هذه التقنية لقياس مقاومة البيتون أو المادة الحجرية موضوع الاختبار على الشد المباشر [3].

يبين الشكل 2 آلية عمل هذه الاختبار مع تفصيل تطبيق القوة، و تموضع القرص المعدني، و المادة اللاصقة و هي الإيبوكسي، و ميكانيزم الانهيار [7].



الشكل 2 : آلية عمل اختبار النزع (Pull Off Adhesion Testing)

أهمية البحث و أهدافه:

يهدف البحث لدراسة تأثير مواصفات مادة الترميم و السطح المرمم على الارتباط الجيد بين المادتين و الذي يُعتبر إجهاد الالتصاق من أهم مؤشراته. حيث تم تغيير تركيب و مواصفات مادة الترميم، و تغيير طبيعة السطوح المرممة من حيث الخشونة و النظافة و الرطوبة بشكل مستقل و قياس إجهاد الالتصاق في كل مرة نغير فيها إما تركيب مادة الترميم، أو طبيعة السطح المرمم.

تم تحديد قيمة إجهاد الالتصاق في كل مرة اعتماداً على تقنية نزع مادة الترميم عن سطح محدد بتطبيق إجهاد شد مباشر عليه لاقتلاعه عن السطح (Pull Off Adhesion Testing – ASTM D4541).

يعطي هذا الاختبار فكرة جيدة عن سلوك مواد الترميم في المنشآت المرممة، و ديمومة الترميم من خلال مقاومته للإجهادات الناجمة عن التحميل الجديد، و الظروف التي ستتعرض لها المنشأة لاحقاً من إجهاد و حرارة و رطوبة قد تؤدي في بعض الأحيان إلى قصور الترميم و فشله إذا لم تتم مراعاة اشتراطات الترميم الناجح من حيث خصائص مادة الترميم و السطح المرمم [10].

يبين البحث بشكل رقمي آلية و حجم تأثير هذين البارامترين (مواصفات مادة الترميم و السطح المرمم) على قدرة المنظومة الجديدة المشكلة منهما على الترابط، و مقاومتها للانفصال.

طرائق البحث و مواده:

تم اعتماد المنهجية التجريبية في إجراء هذا البحث من خلال تحضير مونة ترميم مختلفة التراكيب، و سطوح ترميم مختلفة بطبيعتها من حيث الخشونة و النظافة و الرطوبة و التركيب. إذ استخدمت لهذا الغرض سطوح ترميم مخبرية من البيتون بعد قص اسطوانات بيتونية بشكل عمودي على محورها، و سطوح حجرية أخرى غير بيتونية كالرخام و الحجر و طبقتي الوجه و الظهر من بلاط الموزاييك (الشكل 3a و 3b).

أجريت التجارب و التحاليل الخاصة بهذا البحث في مخبر تجريب المواد بجامعة تشرين و ذلك خلال الفترة الواقعة بين كانون الثاني و أيلول للعام 2015.

الشكل 3a: سطوح ترميم مخبرية من البيتون

الشكل 3b: سطوح ترميم مخبرية من البلاط و الحجر و الرخام

تم استخدام لاصق بوليميري قوي من مركب واحد (Super Glue) في اختبار النزع و ذلك لتأمين سطح التصاق ذي مقاومة أكبر من مقاومة التصاق مادة الترميم مع السطح المرمم.

أما المواد التي استخدمت في تحضير مونة الترميم و سطوح الاختبار فكانت:

1. **إسمنت بورتلاندي عادي أسود تصنيف I** صنع معمل إسمنت طرطوس مُصنَّع وفق المواصفة السورية رقم 1997/1887 بصنف 32.5 و ذلك لاستخدامه في تحضير مونة الترميم.
2. **رمل ناعم من مقالع منطقة القريتين** (رمل قيرواني) ناعم نسبياً بمعامل نعومة قدره ***Mf*=1.72** و قيمة متوسطة للمكافئ الرملي تعادل **ES=74%** .
3. **إيبوكسي:** ثنائي التركيب يتشكل من مركبين A و B. ريزين و مصلب ذو مقاومة مبكرة على الضغط البسيط لا تقل عن Rc_1=50MPa بعمر يوم واحد، و مقاومة التصاق بحدود الـ 7MPa.
4. **لاصق بوليميري سريع** قوي من مركب واحد (Super Glue) لإجراء اختبار النزع و ذلك لتأمين سطح التصاق ذي مقاومة أكبر من مقاومة التصاق مادة الترميم مع السطح المرمم
5. **إضافة بوليميرية لمونة الترميم من الـ SBR** مطاط الستيرين بوتادين (*styrene–butadiene rubber* SBR).
6. **ماء للجبل** قابل للشرب.

و لقياس مقاومة الالتصاق ميزنا بين حالتين تمت دراستهما:

a) **الحالة الأولى:** استخدام العينات البيتونية لدراسة تأثير تركيب مونة الترميم على إجهاد الالتصاق مع السطوح البيتونية. تم ذلك بتطبيق مونة إسمنتية بسماكة 5mm معدة للترميم على سطوح الاسطوانات البيتونية التي تم تحضيرها لهذا الغرض، و حفظ المنظومة في ظروف حرارة و رطوبة مناسبة لمدة 28 يوماً، ليتم بعدها قياس إجهاد الالتصاق باستخدام تقنية نزع مادة الترميم عن سطح محدد بتطبيق إجهاد شد مباشر عليه لاقتلاعه عن السطح (Pull Off Adhesion Testing – ASTM D4541) كما هو موضح على الشكل 4a.

b) **الحالة الثانية:** استخدام عينات الرخام و الحجر و بلاط الموزاييك المختلفة بطبيعة سطوحها لدراسة تأثير طبيعة و نظافة السطح المرمم على إجهاد الالتصاق مع السطوح. تم ذلك بتطبيق عجينة إيبوكسية على عدد من سطوح الترميم و تركها حتى التصلب الكامل بعد انقضاء مدة لا تقل عن سبعة أيام. ثم قياس إجهاد الالتصاق باستخدام تقنية نزع مادة الترميم (و هي العجينة الإيبوكسية في هذه الحالة) عن السطح المرمم بتطبيق إجهاد شد

مباشر عليه لاقتلاعه عن السطح (Pull Off Adhesion Testing – ASTM D4541) كما هو موضح على الشكل 4b.

الشكل 4a: نزع مونة الترميم عن السطح البيتوني

الشكل 4b: نزع عجينة الإيبوكسي عن سطح الحجر

النتائج و المناقشة:

سيتم عرض النتائج لحالتين من الدراسة تم التنويه عنهما في الفقرة السابقة و هما: **الحالة الأولى** المتعلقة بالتصاق المونة الإسمنتية على السطوح البيتونية. و **الحالة الثانية** المتعلقة بالتصاق العجينة الإيبوكسية على السطوح الأخرى كالحجر و البلاط و الرخام.

1. تأثير مواصفات مونة الترميم الإسمنتية على إجهاد الالتصاق مع السطوح البيتونية:

تم إجراء اختبار الالتصاق بين مونة الترميم الإسمنتية و السطوح البيتونية و ذلك لدراسة تأثير خصائص المونة في حالتها الطرية و الصلبة على إجهاد الالتصاق.

شمل تغيير الخصائص في الحالة الطرية تغيير القوام و المعبر عنه بزمن الجريان في جهاز قياس قابلية تشغيل المونة الإسمنتية و الذي يزداد كلما قلت قابلية تشغيل المونة، و ينقص كلما زادت قابلية تشغيل المونة. أما في الحالة المتصلبة فقد تم إجراء الدراسة و الربط بين إجهاد الالتصاق و الخصائص الميكانيكية للمونة المتصلبة كمقاومتها على الضغط البسيط و الشد بالانعطاف.

يبين الجدول 2 مواصفات التراكيب المختلفة لمونة الترميم الإسمنتية و التي تتغير فيها قيم نسبة الماء إلى الإسمنت W/C ، و نسبة الملدن إلى الإسمنت SP/C ، و ذلك فيما يخص قابلية التشغيل المعبر عنها بزمن الجريان في جهاز قياس قابلية تشغيل المونة الإسمنتية (المانيابيليمتر)، و المقاومة على الضغط البسيط بعمر 28 يوماً، و المقاومة على الشد بالانعطاف بعمر 28 يوماً أيضاً.

تم إعطاء تراكيب مونة الترميم الإسمنتية الرموز من M1 حتى M6.

الجدول (2) تسمية و مواصفات تراكيب مونة الترميم الإسمنتية

رمز التركيب	النسبة W/C	النسبة SP/C	زمن الجريان (sec)	المقاومة على الضغط البسيط (Kg/cm^2)	المقاومة على الشد بالانعطاف (Kg/cm^2)	إجهاد الالتصاق (MPa)
M1	0.5	0	75	430	69	1.95
M2	0.55	0	65	350	65	1.62
M3	0.6	0	45	320	71	2.75
M4	0.5	0.005	40	330	62	1.42
M5	0.5	0.01	35	390	65	1.6
M6	0.5	0.015	20	520	70	2.6

1-1. تأثير قوام مونة الترميم الإسمنتية على إجهاد الالتصاق:

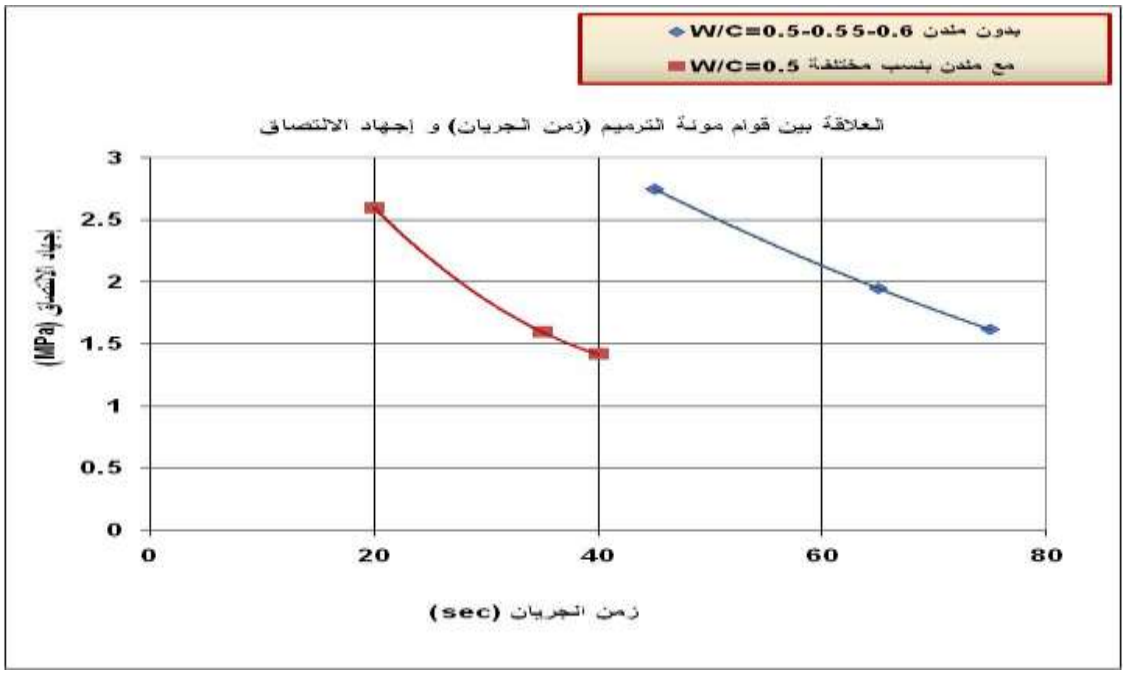
يبين الشكل 5 العلاقة بين إجهاد الالتصاق للمونة الإسمنتية متغيرة القوام و زمن جريان المونة الإسمنتية الطرية في جهاز قياس قابلية التشغيل (Maniabilimètre).

تم تغيير قوام المونة الإسمنتية بتغيير النسبة W/C بين 0.5 و 0.6، و إضافة الملدنات على النسبة W/C=0.5 بنسب تتراوح بين 0.5% إلى 1.5%. و ذلك مع مراعاة عدم تأثر المكونات الأخرى كعيار الإسمنت و الرمل و طريقة التحضير و شروط الحفظ و الاختبار.

يبدو من المخطط على الشكل 5 أن إجهاد الالتصاق يتأثر بشكل كبير بقوام المونة الإسمنتية المعبر عنه بزمن الجريان في جهاز قياس قابلية تشغيل المونة الإسمنتية (Maniabilimètre). و يبدو هذا التأثر لشرائح مونة الترميم الجامدة نسبياً و التي يتجاوز فيها زمن الجريان الـ 40 ثانية، و لشرائح المونة مقبولة التشغيل (مع ملدن) إذا ما علمنا أن الحد الطبيعي لزمن الجريان لمونة جيدة التشغيل هو بجوار الـ 10 ثانية.

يُعزى التأثير الإيجابي للقوام الجيد على إجهاد الالتصاق مع السطوح البيتونية إلى التغطية الجيدة شبه الكلية لسطح الترميم بالمونة الإسمنتية و التي سيتيح قوامها الجيد بتغلغل الرابط الإسمنتي ضمن مسامات سطح الترميم، و هو ما سيزيد من مساحة سطح الارتباط بينهما و يرفع بالتالي من قيمة إجهاد الالتصاق.

يتوافق ذلك بشكل واضح مع شرح آلية الالتصاق التي سبق أن تم تفصيلها في الفقرة 5 من هذا البحث و التي تشرح آلية التصاق السطوح البيتونية مع مادة الترميم.

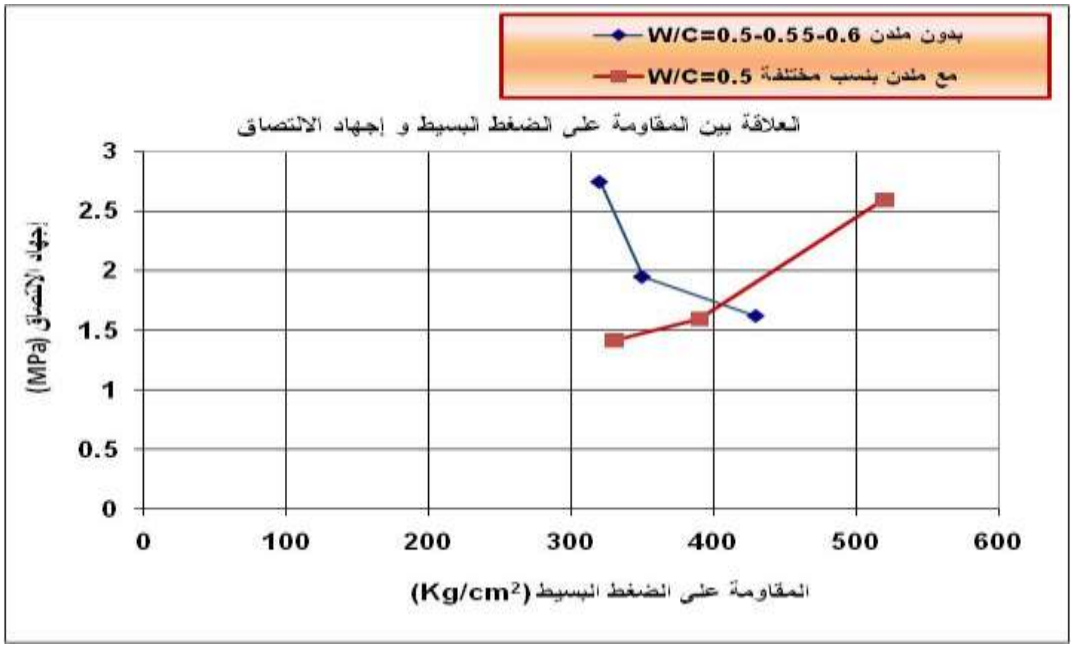


الشكل 5: تأثير قوام مونة الترميم على إجهاد الالتصاق مع السطوح البيتونية

1-2. تأثير المقاومة على الضغط البسيط لمونة الترميم على إجهاد الالتصاق:

يبين الشكل 6 العلاقة بين إجهاد الالتصاق للمونة الإسمنتية و مقاومتها على الضغط البسيط بعمر الـ 28 يوماً.

نميز على المخطط أدناه منحنيين:



الشكل 6: العلاقة بين المقاومة على الضغط البسيط لمونة الترميم و إجهاد الالتصاق مع السطوح البيتونية

يمثل **المنحني الأول** منهما العلاقة بين المقاومة على الضغط البسيط إجهاد الالتصاق لمونة ترميم إسمنتية لا تحتوي على الملدنات، و يظهر عليه بوضوح كيف تقل قيمة إجهاد الالتصاق مع السطح البيتوني إذا ما عمدنا إلى رفع مقاومة مونة الترميم على الضغط البسيط عن طريق إنقاص النسبة W/C دون إضافة ملدن لتحسين القوام الذي سيتأثر عند إنقاص محتوى الماء فيها.

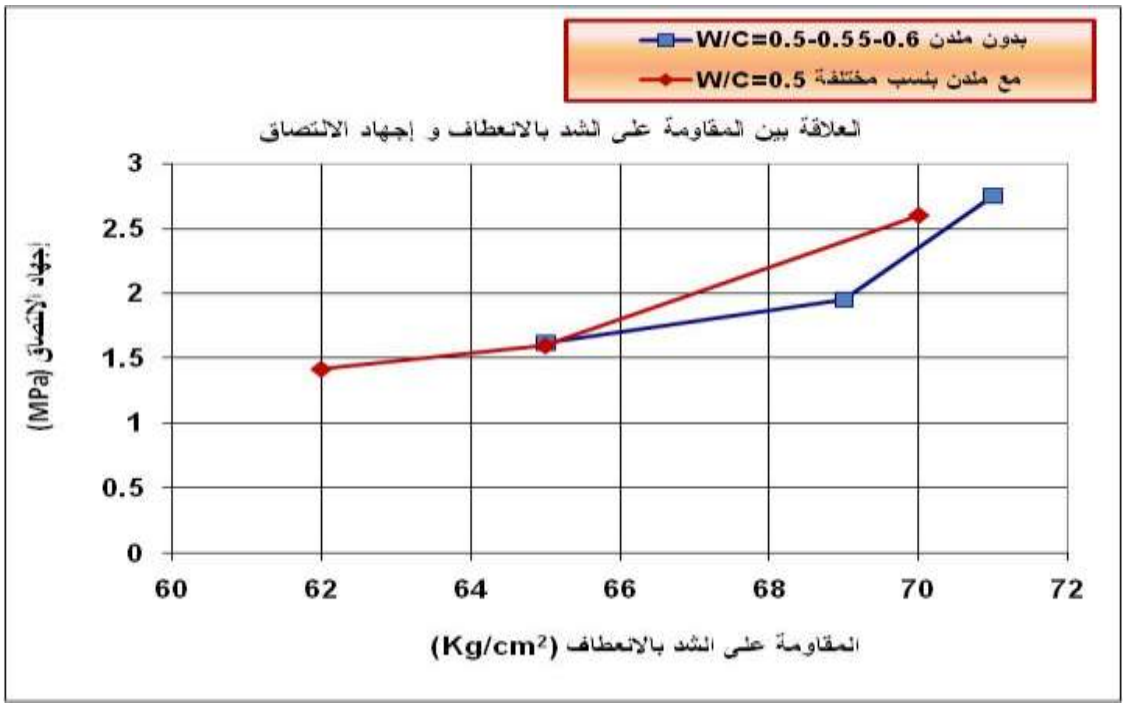
فيما يظهر على **المنحني الثاني** الأثر الإيجابي للملدنات على إجهاد الالتصاق و المقاومة على الضغط البسيط على السواء، إذ تزداد بشكل صريح قيم إجهاد الالتصاق بين 1.4 و 2.6MPa لنفس المحتوى من الماء و هو W/C=0.5 عندما يتحسن القوام بفعل الملدن المضاف بنسب تتراوح بين SP/C=0.5% و SP/C=1.5%. يمكن تفسير هذه الزيادة في قيمة إجهاد الالتصاق بنفس الآلية التي تم ذكرها في الفقرة السابقة، و قد يُضاف إلى ذلك الأثر الإيجابي للملدن على التصاق مونة الترميم مع السطح البيتوني بشكل فعال في الحالة الطرية مما سينعكس إيجاباً على قيمة إجهاد الالتصاق بعد التصلب.

1-3. تأثير المقاومة على الشد بالانعطاف لمونة الترميم على إجهاد الالتصاق:

يبين الشكل 7 العلاقة بين إجهاد الالتصاق للمونة الإسمنتية و مقاومتها على الشد بالانعطاف بعمر الـ 28 يوماً.

يبدو المنحني أدناه أكثر وضوحاً و دلالة من المنحنيات السابقة، و يبدو فيه العلاقة المتبادلة بين إجهاد الشد بالانعطاف و إجهاد الالتصاق مع السطوح البيتونية.

سيسهم تجانس المونة عندما يتحسن قوامها بإضافة الملدنات في زيادة مقاومتها على الشد بالانعطاف، مثلما يسهم في زيادة التماسك مع السطح البيتوني لتركيب بنفس المحتوى من الماء (W/C=0.5)، و بنسب متغيرة من الملدن تتراوح بين 0.5% و 1.5%.



الشكل 7: العلاقة بين المقاومة على الشد بالانعطاف لمونة الترميم و إجهاد الالتصاق مع السطوح البيتونية

2. تأثير مواصفات السطوح المرممة على إجهاد الالتصاق مع مادة الترميم:

تم إجراء اختبار الالتصاق بين عجينة إيبوكسية متماثلة الخواص تُستخدم في الترميم، و السطوح المرممة مختلفة الخواص و ذلك لدراسة تأثير مواصفات سطح الترميم على إجهاد الالتصاق.

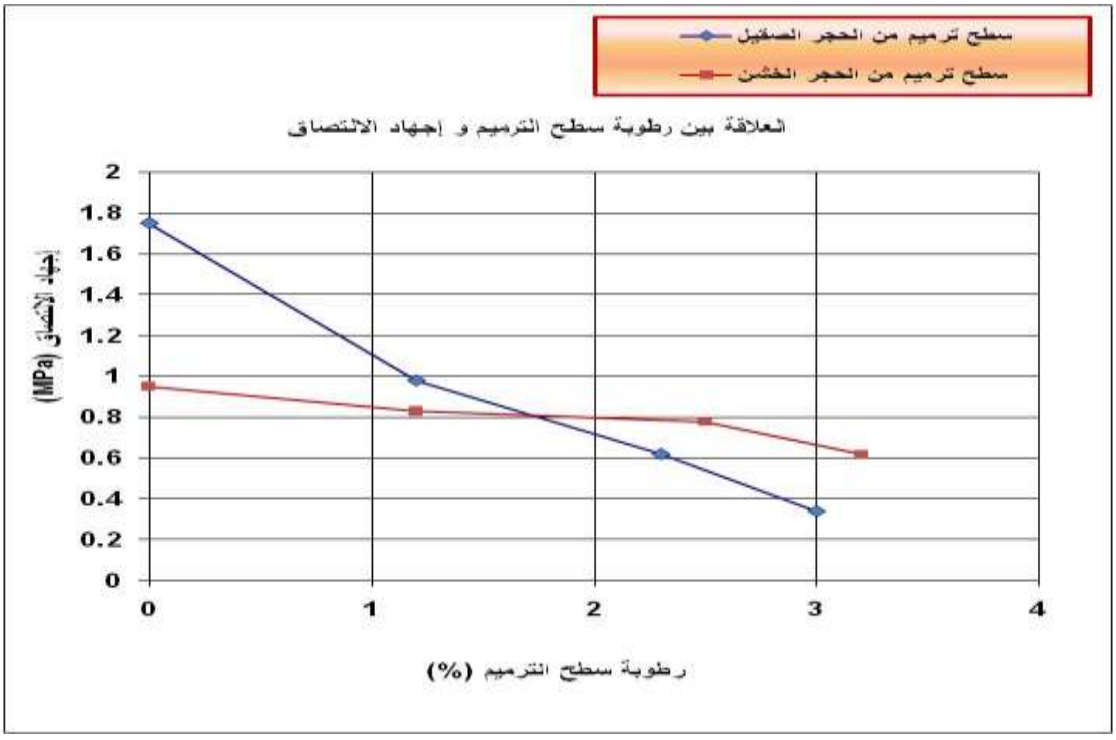
شمل تغيير خصائص سطح الالتصاق الرطوبة و النظافة و نعومة السطح.

2-1. تأثير رطوبة و خشونة السطح المرمم على إجهاد الالتصاق:

يبين الشكل 8 العلاقة بين إجهاد الالتصاق للعجينة الإيبوكسية و رطوبة السطح المرمم من الحجر الصقيل و الخشن.

تم تغيير رطوبة السطوح بإجراء تشرب مخبري للسطح بكمية مختلفة من الماء للحصول على قيم رطوبة مختلفة تتراوح بين 0 و 3%.

تتناقص قيم إجهاد الالتصاق لكلا السطحين الصقيل و الخشن بشكل واضح مع ازدياد الرطوبة، و يعطي السطح الجاف الصقيل قيمة لإجهاد الالتصاق تعادل مثلي قيمة الإجهاد للسطح الخشن، إذ تحتاج عجينة الإيبوكسي لظروف جفاف و ملاسة للسطوح لتعطي أفضل التصاق، فيما يبدو الأمر معكوساً عند قيم الرطوبة المرتفعة إذ تعمل الرطوبة على الحد بشكل ملحوظ من قيمة إجهاد الالتصاق على كلا السطحين، و يعطي السطح الخشن في هذه الحالة قيمة أكبر نسبياً لإجهاد الالتصاق بفعل تغلغل عجينة الإيبوكسي ضمن مسامات سطح الحجر الخشن [11].



الشكل 8: تأثير رطوبة سطح الترميم من الحجر الصقيل و الخشن على إجهاد الالتصاق

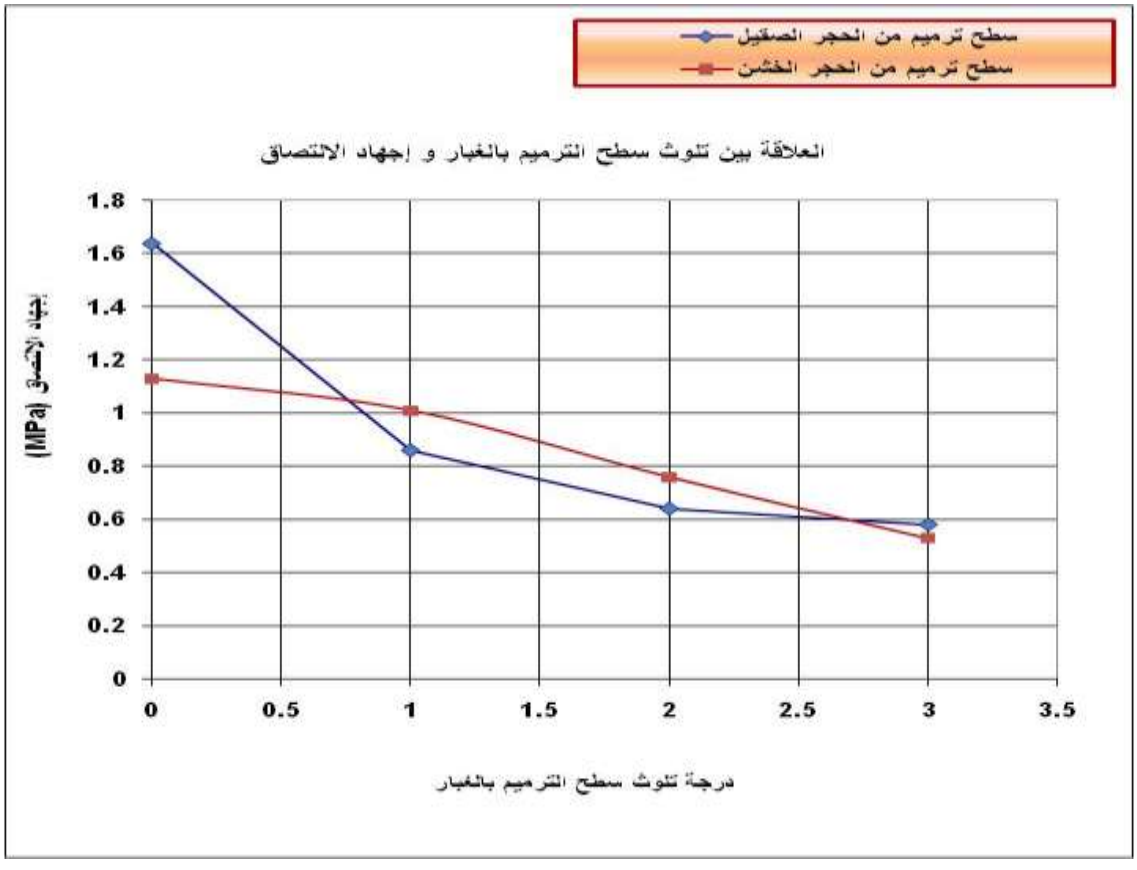
2-2. تأثير تلوث و خشونة السطح المرمم على إجهاد الالتصاق:

يبين الشكل 9 العلاقة بين إجهاد الالتصاق للعجينة الإيبوكسية و درجة تلوث السطح المرمم من الحجر الصقيل و الخشن.

تم تغيير درجة تلوث السطوح مخبرياً بفرش كميات متفاوتة من الرمل الناعم منخفض المكافئ الرملي و المحتوي على كمية عالية من الغبار و الشوائب العضوية على السطحين الناعم و الخشن من الحجر موضوع الدراسة. لتتم بعدها إزالة حبيبات الرمل، و الإبقاء على الغبار بأربع سويات مختلفة: 0 بدون تلوث، و 1 و 2 و 3 ترتبط بكمية الرمل التي تم فرشها بشكل متزايد على كل سطح.

يعمل التلوث بالغبار على الحد من قيمة إجهاد الالتصاق بنفس الآلية التي تعمل بها رطوبة الحجر لكلا نوعي السطوح الصقيل و الخشن، و للحالتين الحديتين و هما في هذه الحالة: حالة النظافة المطلقة 0، و التلوث الأكبر 3.

كما يمكن تفسير انعكاس التأثير للسطحين الصقيل و الخشن بين حالة النظافة المطلقة (0) و حالة درجة التلوث الأكبر (3) إذ يعمل التلوث بالغبار على الحد بشكل ملحوظ من قيمة إجهاد الالتصاق على كلا السطحين، و يعطي السطح الخشن في هذه الحالة قيمة أكبر نسبياً لإجهاد الالتصاق [1] بفعل تغلغل عجينة الإيبوكسي ضمن مسامات سطح الحجر الخشن.



الشكل 9: تأثير درجة تلوث سطح الترميم من الحجر الصقيل و الخشن على إجهاد الالتصاق

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

نبين فيما يلي أهم الاستنتاجات التي تم استخلاصها من هذا البحث و ذلك بعد تحليل طريقة الاختبار المتبعة لقياس إجهاد الالتصاق، و تأثر هذه القيمة بالبارامترات التي تمت دراستها كمواصفات مونة الترميم الإسمنتية، طبيعة و خواص سطوح الالتصاق:

- اعتماد آلية خاصة لقياس التصاق مونة الترميم الاسمنتية و العجينة الإيبوكسية على السطوح البيتونية و الحجرية. أعطت هذه التقنية نتائج معبرة بمحاكاتها لآلية التصاق مادة الترميم على السطوح و التي تم التعبير عنها مخبرياً بسطوح عينات من الاسطوانات البيتونية المنشورة بشكل عمودي على محورها، و ألواح الحجر و الرخام المصقولة و الخشنة.
- تراوحت قيم اجهاد الالتصاق بين مادة الترميم والسطوح المرممة بين 0.3 و 2.7MPa وهي قيم مقبولة تعبر بشكل حقيقي عن جودة التصاق مونة الترميم الإسمنتية أو الإيبوكسية مع سطوح الترميم المختلفة.
- تتعلق قيمة إجهاد الالتصاق بشكل واضح بجودة وقوام المونة و طبيعة السطوح و التي حاولنا التعبير عنها بخلطات مختلفة بتركيبها ومقاوماتها وقوامها، و سطوح تختلف فيما بينها بخشونة سطحها و رطوبتها و نظافتها.
- ترتبط جودة التصاق مادة الترميم مع السطح المرمم بملاءمة مادة الترميم من حيث مقاومتها الميكانيكية و قوامها اللدن مع التنويه إلى أن تحسين القوام لن يؤثر إيجابياً على الالتصاق إذا لم يترافق ذلك بتحسن المقاومة الميكانيكية لمادة الترميم.
- فيما يخص الترميم باستخدام المونة الإسمنتية المحسنة، فقد بينت النتائج أن المونة المثالية التي تؤمن أفضل التصاق على السطوح البيتونية هي تلك التي تعطي مقاومة ميكانيكية جيدة باستخدام ملدنات عالية الأداء تحسن القوام و تجعله لزجاً مما يحسن من خصائص الالتصاق في الحالة الطرية، و من ثم الصلبة.

المراجع:

1. ABU-TAIR, A.I. et coll. (2000) *A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening* , Construction and building materials, vol. 14, no 3, pp. 171-176.
2. ASTM C1583 (2004) Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-out Method) , Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02.
3. AUSTIN, S. et coll. (1995) Tensile bond testing of concrete repairs , Materials and Structures, vol. 28, no 179, pp. 249-259.
4. COURARD, L. (1999) *Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation* , Thèse de Doctorat, Université de Liège, Liège, 198 pages.
5. COURARD, L. et B. Bissonnette. (2004) *Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation : analyse des paramètres d'essai,* Materials and Structures/Matériaux et Construction, vol. 37, no 269, pp. 342-350.

6. EMMONS, P.H. et coll. (1994) *Concrete repair in the future turn of the century – Any problems?* , vol. 6, no. 3, pp. 42-49.

7. HINDO, K.R. (1990) *In-Place Bond Testing and Surface Preparation of Concrete* , Concrete international, vol. 12, no 4, pp. 46-48.

8. KAMADA, T. et Victor C. Li (2000) *The effects of surface preparation on the fracture behaviour of ECC/concrete repair system* , Cement and Concrete Composites, vol. 22, no 6, pp. 423-431.

9. LI, G et coll. (2001) *Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders* , Cement & Concrete Composites, vol. 23, pp. 381-387.

10. SAUCIER, F. (1990) *La durabilité de l'adhérence des réparations en béton,* Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 145 pages.

11. SAUCIER, F. et M. Pigeon. (1996) *Testing of Superficial Repairs for Sidewalks in Canada,* Concrete International, vol. 18, no 5, 84 pages (39-43).