

التحليل غير الخطي باستخدام طريقة العناصر المحددة للبلاتات والسقوف القشرية الفيروسمنتية

د. محمد نجم محمود

سرى عبد الرزاق مجيد

أستاذ مساعد

مدرس مساعد

جامعة الموصل - قسم الهندسة المدنية

الخلاصة

يتضمن البحث تطوير نموذج تحليلي لدراسة سلوك البلاتات والسقوف القشرية الفيروسمنتية والتحري عن النموذج الأدق في تمثيل العلاقات التكوينية للمواد في التحليل غير الخطي باستخدام طريقة العناصر المحددة وتوظيف أسلوب الطبقات لتمثيل المونة والمشبك السلبي. تم تمثيل سلوك المونة في حالة الإنضغاط بتصرف خطي مرن يتبعه تصرف لدن مع تصاد الانفعالات الى حد وصولها الى نقطة المقاومة القصوى. وبزيادة انفعال الضغط تدخل المونة منطقة الإنحدار في منحنى الاجهاد-الانفعال لحين الوصول الى انفعال السحق. أما سلوك المونة في الشد فتم تمثيله بتصرف مرن خطي الى مرحلة التشقق يتبعها استخدام نموذج جساءة الشد لحساب اجهادات الشد المتبقية بعد حدوث الشقوق في المونة. وكذلك تم الأخذ بنظر الاعتبار معامل القص في مرحلة ما بعد التشقق لتمثيل القص المنقل خلال الشقوق. أما سلوك حديد التسليح والمشبكات السلبيّة فقد تم تمثيله بوصفه مادة مرنة لدنة مع تصاد انفعال خطي. أظهرت النتائج العددية لبلاطة فيروسمنتية وسقف قشري اسطواني توافق جيد مع النتائج العملية.

الكلمات الدالة

فيروسمنت، مونة السمّنت، السقوف القشرية، المشبكات السلبيّة، العناصر المحددة، التحليل غير الخطي.

الرموز

معامل المرونة القاطع	E_o
معامل المرونة الابتدائي للخرسانة	E_c
معامل المرونة الابتدائي للمونة	E_m
معامل المرونة لحديد التسليح	E_s
معامل المرونة المماسي المحوري المكافئ	E_t
معامل المرونة للمشبك السلبي	E_w
معامل يونك (المرن-اللدن) للمشبك السلبي	E^{ep}
مقاومة الانضغاط للخرسانة	f'_c
مقاومة الانضغاط للمونة	f'_{cm}
مقاومة الشد للمونة	f'_{tm}
اجهاد الخضوع لحديد التسليح	f_y
اجهاد الخضوع للمشبك السلبي	f_{yw}
معامل القص للمونة المتشققة	G'
معامل القص للمونة غير المتشققة	G_o
طاقة الانكسار	G_f
انفعال شد الانكسار	ε_o
انفعال التشقق في المونة	ε_{cr}
الانفعال الأقصى عند السحق	ε_f
الانفعال المناظر للمقاومة الأنضغاط العظمى f'_{cm} لمونة السمنت	ε_m
الانفعال المناظر للمقاومة العظمى f'_{cm} لمونة السمنت في منحني	ε_*
الاجهاد-الانفعال أحادي المحور المكافئ	
مركبات الاجهاد الرئيسية	σ_2, σ_1
مركبات الاجهاد العمودية نسبة الى المحاور y, x على التوالي	σ_y, σ_x
الاجهاد الفعال الأحادي المكافئ	σ_o
معدل الاجهاد عند الفشل لمونة السمنت	σ_m
مركبات اجهادات القص	$\tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{xy}$
اجهاد القص ثماني السطح	τ_{oct}

المقدمة

يعد الفيروسمنت من أحد أساليب البناء البديلة للبناء التقليدي التي لها إمكانيات واسعة لتطبيقها في مجال البناء والإسكان فضلاً عن استخدامه في صيانة وتأهيل المنشآت الخرسانية المتضررة، لذا فإنه يعد مادة متعددة الإستعمالات. يتألف الفيروسمنت من مونة السمنت والرمل المسلحة بطبقات من مشبك سلكي أو أسلاك فولاذية ذات أقطار صغيرة موزعة بانتظام على كامل المقطع بمسافات متقاربة ومرتبطة مع بعضها مكونة هيكلًا قوياً. وبسبب التعقيدات التي ترافق عملية التحليل غير الخطي لمثل هذا النوع من المنشآت، فإن طريقة العناصر المحددة تعد وسيلة مثلى وذات كفاءة عالية في دراسة وتحليل منشآت الفيروسمنت مثل السقوف القشرية. وقد استخدمت هذه الطريقة في البحث الحالي وذلك لإمكانية إدخال تأثير التصرف غير الخطي للمواد فضلاً عن التصرف غير الخطي الهندسي. وفيما يلي ملخص لبعض الدراسات المتعلقة بموضوع البحث الحالي:

في عام (1989)، أجرى (Hasan)^[1] دراسة تحليلية لسقوف منشآت فيروسمنت على شكل ألواح مطوية باستخدام طريقة المقطع العقدي (Nodal Section method) لتحليل عشرة نماذج تحت تأثير نوعين من الأحمال وهي حمل مركز أحادي وحمل موزع في أربع نقاط تحميل متناظرة. وفي عام (1994)، قام (Al-Ihmedawi)^[2] بدراسة تصرف سقف قشري فيروسمنتي مقوس بشكل دائري تحت تأثير نقطة تحميل واحدة عند قمة السقف القشري، إذ تم إيجاد النتائج النظرية للتحليل المرن بطريقة العناصر المحددة باستخدام عناصر قشرية رباعية العقد وبست درجات حرية الحركة في كل عقدة باستخدام برنامج تحليل المنشآت (STAAD-III). في عام (1998)، قام (Khalaf)^[3] بدراسة السلوكية الإنشائية والتحمل الأقصى للسقوف القشرية الفيروسمنتية ذات الفضاءات الكبيرة، تحت تأثير حمل مركز عند القمة. وفي عام (1999)، قام (Ahmed)^[4] بفحص أربعة نماذج من السقوف القشرية الفيروسمنتية المقببة بفضاء (4m) لدراسة تأثير السمك والحديد الهيكلي على المتانة والسلوك لهذا النوع من السقوف تحت تأثير الأحمال الموزعة بصورة منتظمة. وفي عام (2002)، أجرى (Arif) وآخرون^[5] تحليل غير خطي للسلوك الميكانيكي للصفائح الفيروسمنتية باستخدام عناصر الصفحة المحددة ذات التسع عقد، كما استخدم أسلوب الطبقات لتمثيل المونة

والمشبكات السلوكية. إن هدف البحث هو تخمين تصرف وسلوك البلاطات والسقوف القشرية الفيروسمنتية تحت تأثير الأحمال المتزايدة الى مرحلة الفشل وذلك من خلال تطوير برنامج تحليلي باستخدام الحاسوب لغرض التحليل غير الخطي لهذا النوع من البلاطات و السقوف كذلك البحث عن أكثر النماذج الرياضية مُلاءمة للعلاقات التكوينية لتمثيل السلوك غير الخطي لمونة السمنت تحت تأثير اجهادات ثنائية المحور ولتمثيل سلوك المشبكات السلوكية للتنبؤ بالإستجابة الحقيقية للبلاطات والسقوف القشرية الفيروسمنتية.

صياغة العناصر المحددة

تعتبر طريقة العناصر المحددة من الطرق الكفوءة في التحليل غير الخطي للمنشآت، لذا تم استخدامها في البحث الحالي بتمثيل السقف القشري بعناصر قشرية محددة تحت تأثير الأحمال المتزايدة المستقرة الى مرحلة الفشل. استخدم العنصر القشري ذو الثمان عقد بخمس درجات لحرية الحركة في كل عقدة. كما تم استخدام أسلوب الطبقات وذلك للتمكن من تمثيل التغير في خواص المادة خلال سمك القشرة بسبب السلوك غير الخطي لمونة السمنت والناتج عن التشققات التي تحصل في طبقات الشد في المونة أو حالة الخضوع والانحطاط في الجساءة في حالة الضغط وكذلك خضوع المشبكات السلوكية عبر المقطع المتشقق للعنصر القشري. إذ تم تمثيل طبقات المشبك السلبي بطبقات منتشرة بسمك مكافئ مع فرض ترابط تام بين المشبك السلبي والمونة.

التمثيل المادي للمونة

في التحليل غير الخطي للمنشآت الخرسانية المسلحة يتم نمذجة العلاقات التكوينية للخرسانة إما بوصفها مادة مرنة-تامة اللدونة، أو بوصفها مادة مرنة-لدنة-متصلدة (اجهاد التصلد اللدن). والنموذج الأخير أعتمد في البحث الحالي لتمثيل تصرف المونة تحت تأثير اجهادات ثنائية المحور مع الأخذ بنظر الاعتبار حالة التطري بعد وصول المادة الى المقاومة القصوى.

دالة الاجهاد ومعيار الخضوع

في البحث الحالي، تم استخدام دالتين للخضوع النهائي (سطح الفشل) والتي تم تحديدهما من قبل الباحثين (Hu) و (Schnobrich)^[6] بعد تحويل الاجهادات بدلالة الاجهادات الرئيسة (σ_2, σ_1) ، الأولى في منطقة الاجهاد ثنائي المحور شد-ضغط، والثانية في منطقة الاجهاد ثنائي المحور ضغط-ضغط. وفيما يأتي شرح للدوال المستخدمة في حالات الاجهادات ثنائية المحور.

اجهادات شد ثنائية المحور

في حالة اجهادات الشد ثنائية المحور، فإن منحنى الاجهاد-الانفعال للمونة يمكن اعتباره خطياً الى حد الفشل، لذلك بالإمكان افتراض أن سطح الخضوع الابتدائي منطبق مع سطح الفشل. وبموجب هذه الفرضية يكون سلوك المونة مرناً تماماً الى حد الفشل ولا يحصل تشوه لدن. في هذه المنطقة من الاجهادات يكون نمط الفشل للمونة عند الوصول الى سطح الفشل عبارة عن تشقق، وإن التشققات الرئيسة تظهر في اتجاه عمودي على اجهاد الشد الرئيس. وبالإمكان حدوث تشقق في الاتجاه الرئيس الثاني إذا تجاوزت قيمة الإجهاد فيه مقاومة الشد للمونة.

اجهادات شد-ضغط

عند تعرض المونة الى حالة اجهادات شد-ضغط، فإن سلوك المونة يكون مرناً تماماً في المنطقة التي يكون فيها اجهاد الضغط واطناً واجهاد الشد عالياً، بينما يكون سلوك المونة غير مرن في المنطقة التي يكون فيها اجهاد الضغط عالياً واجهاد الشد واطناً، ويمكن التعبير عن دالة الخضوع في هذه المنطقة كما يأتي^[6]:

$$f = C_1 \left(\frac{3}{2\sqrt{2}} \frac{1+\alpha'}{\alpha'} \tau_{oct} + \frac{3}{2} \frac{1-\alpha'}{\alpha'} \sigma_m \right) - \sigma_o = 0 \quad \dots(1)$$

إذ إن:

$$\alpha' = f'_{tm} / f'_{cm}$$

f'_{tm} : مقاومة الشد للمونة و f'_{cm} : مقاومة الضغط للمونة.

τ_{oct} : إجهاد القص ثنائي السطح

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

σ_m : معدل الاجهاد عند الفشل لمونة السمنت

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y)$$

قسم الباحثان (Hu) و (Schnobrich)^[6] مجال الاجهادات في منطقة شد-ضغط (σ_1 شد موجب σ_2 ضغط سالب) الى قسمين وكما يأتي:

* $-\infty < \sigma_1 / \sigma_2 < -1/15$: في هذا المجال يكون الفشل بظهور التشقق في الاتجاه العمودي على σ_1 وتكون قيمة C_1 بدلالة الاجهادات وكما يأتي:

$$C_1 = 1 - 0.02886(\sigma_2 / \sigma_1) - 0.006657(\sigma_2 / \sigma_1)^2 - 0.0002443(\sigma_2 / \sigma_1)^3 \quad \dots(2)$$

* $-1/15 < \sigma_1 / \sigma_2 < 0$: في هذا المجال يكون الفشل بالسحق بعد وصول المادة الى الخضوع النهائي وتكون قيمة C_1 بدلالة الاجهادات كما يأتي:

$$C_1 = 1 + 6.339(\sigma_1 / \sigma_2) + 68.82(\sigma_1 / \sigma_2)^2 + 183.8(\sigma_1 / \sigma_2)^3 \quad \dots(3)$$

اجهادات ضغط ثنائية المحور

في حالة اجهادات الضغط ثنائية المحور، يبدأ التشوه غير الخطي بعد وصول المادة الى سطح الخضوع الابتدائي. يمكن التعبير عن دالة الخضوع في هذا المجال كما يأتي:

$$f = C_2 \left(\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{2\beta' - 1}{\beta'} \tau_{oct} + 3 \frac{\beta' - 1}{\beta'} \sigma_m \right) - \sigma_o = 0 \quad \dots(4)$$

إذ إن: $\beta' = 1.13$

ويمكن كتابة المتغير C_2 بدلالة الاجهادات الرئيسة (σ_1 و σ_2 سالبة) كما يأتي:

$$C_2 = 1 + 0.05848(\sigma_2 / \sigma_1) - 0.05848(\sigma_2 / \sigma_1)^2 \quad \dots(5)$$

علاقة الاجهاد-الانفعال المحوري المكافئ

في البحث الحالي استخدم نموذج المونة المرنة اللدن مع تصلد الانفعال وعند وصول المادة الى مقاومتها القصوى افترضت حالة التطري اللدن لحين وصول الانفعال المكافئ الى انفعال السحق، وكما موضح في الشكل (1). إن النتائج العملية التي حصل عليها Kupfer وآخرون^[7] أظهرت حالة من توحيد الخواص في قيمة معامل المرونة المماسي في فضاء الاجهادات ثنائية المحور عند أي مستوى من سطوح التحميل (الشكل (2)). هذا النوع من التوحيد في الخواص يسمح بافتراض خواص الجساءة لجميع النقاط على سطح التحميل (i) مساوية الى خواص الجساءة عند النقطة (σ'_i, ϵ'_i) على منحنى الاجهاد-الانفعال أحادي المحور المكافئ، والموضح في الشكل (1). ونظراً لكون شكل منحنى الاجهاد-الانفعال الأحادي المحور المكافئ لمونة السمنت مشابه لمنحنى الاجهاد-الانفعال الأحادي المحور المكافئ للخرسانة فقد تم استخدام العلاقة المقترحة من قبل Saenz عام (1964)^[8]، ولغرض جعل منحنى الاجهاد-الانفعال الأحادي المحور المكافئ أكثر شمولية استخدم المتغير R^[9]، الذي يعتمد على نسبة الاجهاد الرئيسة، وتعديل معادلة (Saenz) لتصبح علاقة الاجهاد-الانفعال أحادي المحور المكافئ بالشكل الآتي:

$$\sigma' = \frac{E_m \epsilon'}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon_*} \right) - (2R - 1) \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon_*} \right)^2 + R \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon_*} \right)^3} \quad ..(6)$$

إذ إن:

$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_E - 1)^2} - \frac{1}{R_E} \quad R_E = \frac{E_m}{E_o} \quad R_\sigma = \frac{f'_{cm}}{\sigma_f} \quad ..(7)$$

$$E_o = \frac{f'_{cm}}{\epsilon_*} \quad \epsilon_* = q \epsilon_m \quad R_\epsilon = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_*}$$

ϵ_* : الانفعال المناظر للمقاومة العظمى (Peak Stress) على منحنى الاجهاد-الانفعال أحادي المحور المكافئ.

E_m : معامل المرونة الابتدائي (Initial Modulus of Elasticity).

E_0 : معامل المرونة القاطع (Secant Modulus of Elasticity) عند المقاومة العظمى.

ϵ_m, f'_{cm} : المقاومة العظمى والانفعال المناظر لها في فحص الضغط الأحادي المحور.

σ_f, ϵ_f : الانفعال الأقصى والإجهاد المناظر له عند السحق.

المتغير (q) يحدد قيمة الانفعال عند المقاومة العظمى لمنحني الإجهاد-الانفعال الأحادي المحور المكافئ و يعتمد على نسبة الإجهاد في المحاور الرئيسة ويمكن حسابه من العلاقات الآتية^[9]:

• في منطقة شد-ضغط: عندما تكون $-\infty < \sigma_1 / \sigma_2 < -0.103$

$$q = \frac{f'_{cm}}{E_m \epsilon_m} + (1 - \frac{f'_{cm}}{E_m \epsilon_m}) [0.001231(\sigma_2 / \sigma_1) + 0.001469(\sigma_2 / \sigma_1)^2 + 0.0000134(\sigma_2 / \sigma_1)^3] \quad ..(8)$$

وعندما $-0.103 \leq \sigma_1 / \sigma_2 < 0$

$$q = \frac{f'_{cm}}{E_m \epsilon_m} + (1 - \frac{f'_{cm}}{E_m \epsilon_m}) [1 + 13.96(\sigma_1 / \sigma_2) + 59.21(\sigma_1 / \sigma_2)^2 + 69.24(\sigma_1 / \sigma_2)^3] \quad ..(9)$$

• في منطقة ضغط-ضغط:

$$q = \frac{f'_{cm}}{E_m \epsilon_m} + (1 - \frac{f'_{cm}}{E_m \epsilon_m}) [1 + 1.782(\sigma_1 / \sigma_2) + 0.5936(\sigma_1 / \sigma_2)^2] \quad ..(10)$$

ونظراً لعدم إمكانية تقدير قيمة ϵ_f, σ_f على أساس عملي دقيق فقد تم في البحث الحالي افتراض قيمة $R_\sigma = 4$ و $R_\epsilon = 4$ وهي القيمة التي اقترحها الباحثان Elwi و Murray^[10].

باشتقاق المعادلة (6) نسبة الى الانفعال المحوري المكافئ (ϵ') يمكن حساب معامل المرونة المماسي المحوري المكافئ E_t وكما يأتي:

$$E_t = \frac{d\sigma'}{d\varepsilon'} = \frac{E_c \left[1 + (2R-1) \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_*} \right)^2 - 2R \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_*} \right)^3 \right]}{\left[1 + (R+R_E-2) \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_*} \right) - (2R-1) \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_*} \right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_*} \right)^3 \right]^2} \quad ..(11)$$

التمثيل المادي للمونة المتشققة

عند تسليط الأحمال على المنشأ تتولد اجهادات منها إجهاد الشد الذي يبدأ بالتزايد في المقطع الحرج وصولاً الى مقاومة الشد القصوى (f'_{tm}). عند هذه المرحلة فإن الشقوق الشعرية تكون قد توسعت واتصلت مع بعضها لتشكل منطقة الانكسار. هذه العملية موضحة في سلوك جساءة الشد للمقطع الذي ينتهي عندما تندمج الشقوق الشعرية لتشكل شقوق مستمرة، إذ تصبح عندها قيمة الاجهادات العمودية على الشق مساوية للصفر. ولغرض الأخذ بنظر الاعتبار تأثير حقيقة تركز الشقوق الشعرية في منطقة الإنكسار التي ربما تكون صغيرة مقارنة مع حجم شبكة العناصر المحددة، فقد تم في هذا البحث الاعتماد على الدالة الموضحة في الشكل (3) لتوزيع الشقوق عبر مقطع العنصر عند نقطة تكامل معينة، التي يمكن صياغتها كدالة أسية كما يأتي [12,11]:

$$f(x) = e^{(-2/b)(\ln b/3)x} \quad ..(12)$$

الشكل (4) يبين أحد أشكال المنحني الهابط بعد وصول المادة الى مستوى اجهاد التشقق (f'_{tm}). ويمكن حساب المساحة g_f تحت المنحني من العلاقة الآتية:

$$g_f = \int \sigma_n d\varepsilon_n^{cr} \quad ..(13)$$

إذ إن ε_n^{cr} : الانفعال العمودي على مستوى الشق.

يمكن تعريف طاقة الانكسار (G_f) (Fracture Energy) بأنها كمية الطاقة اللازمة لإحداث شق ذي وحدة مساحة واحدة من الشق المستمر وهي تعد كذلك من خواص المادة. ويمكن حسابها من العلاقة الآتية:

$$G_f = \int \sigma_n dw \quad ..(14)$$

إذ إن w يمثل مجموع الإزاحات العمودية على التشققات المنتشرة ضمن مجال المنطقة المتشققة. في نموذج الشق المنتشر يمكن تمثيل w بدلالة الانفعال العمودي على التشقق الذي يؤثر في عرض محدد ضمن شبكة العنصر المحدد الذي يمكن تسميته بعرض حزمة الشق (b). وبما أن w تمثل انفعال الشق المتراكم، لذا يمكن حسابه من العلاقة الآتية:

$$w = \int \varepsilon_n^{cr} dn \quad ..(15)$$

وعلى افتراض أن الشقوق الشعرية منتشرة وموزعة بشكل منتظم عبر عرض حزمة الشق وباتجاه ثابت يمكن إعادة كتابة المعادلة (15) كما يأتي:

$$w = b \varepsilon_n^{cr} \quad ..(16)$$

وعند ربط العلاقات (13)-(16) يمكن الحصول على العلاقة الآتية:

$$G_f = b g_f \quad ..(17)$$

إن طاقة الانكسار (G_f) التي يمكن تعريفها^[12,11] بأنها حاصل ضرب المساحة تحت منحنى الاجهاد-الانفعال (g_f) في المساحة تحت مجال الانكسار، ويمكن التعبير عنها كما يأتي:

$$G_f = \frac{1}{2} \varepsilon_o f'_{tm} \int_0^{b/2} f(x) dx \quad ..(18)$$

إذ إن (ε_o) تمثل انفعال شد الانكسار (Fracture Tensile Strain) الذي يمثل نهاية مرحلة جساءة الشد عندما تندمج الشقوق في شق مستمر. إن قيمة G_f لخرسانة ذات مقاومة عادية هي بحدود (200-50 N/m). لذلك عندما تكون قيمة G_f معلومة فإن قيمة ε_o يمكن حسابها من المعادلة (18) كما يأتي:

$$\varepsilon_o = \frac{G_f}{f'_{tm} \int_0^{b/2} f(x) dx} \quad ..(19)$$

بعد تعويض الدالة $f(x)$ من المعادلة (12) وإجراء التكامل يمكن الحصول على العلاقة الآتية:

$$\varepsilon_o = \frac{2G_f \ln(3/b)}{f'_{tm}(3-b)} \quad ..(20)$$

جساءة الشد

تعتبر هذه الخاصية عن مقدار تحمل الفيروسمنت لاجهادات الشد في المنطقة المحصورة ما بين شقين متجاورين، فعند نشوء أي شق لا تفقد المونة كل مقاومتها للشد وتبقى تتحمل بين الشقوق بعض الاجهادات في الاتجاه العمودي على الشق. في البحث الحالي استخدمت ثلاثة نماذج لجساءة الشد وهي:

- النموذج الخطي المبين في الشكل (5) وذلك يفرض أن عملية رفع الحمل وإعادة التحميل للمونة المتشقة تتبع سلوكاً خطياً مرناً. ويمكن حساب الاجهاد العمودي باستخدام العلاقة الآتية^[13]:

$$\sigma = \alpha f'_{tm}(1 - \varepsilon / \varepsilon_o) \quad \text{For} \quad \varepsilon_{cr} < \varepsilon_i < \varepsilon_o \quad ..(21)$$

or

$$\sigma = \sigma_i \quad \text{For} \quad \varepsilon_{cr} < \varepsilon_i \quad ..(22)$$

إذ إن

f'_{tm} : مقاومة الشد (Tensile Strength) للمونة.

ε_{cr} : انفعال التشقق (Cracking Strain).

ε : انفعال الشد (Tensile Strain) العمودي على مستوى الشق.

α : معامل جساءة الشد وتتراوح قيمتها ما بين $0.6 \leq \alpha \leq 0.7$.

- النموذج غير الخطي الموضح في الشكل (6) باستخدام العلاقة الآتية^[14]:

$$\sigma = f'_{tm} \left\{ e^{-(\varepsilon - \varepsilon_{cr}) / \mu} \right\} \quad ..(23)$$

إذ إن:

μ : مَعْلَم اللينة (Softening Parameter) ويتم حساب قيمته من المعادلة الآتية:

$$\mu = (G_f - 0.5 f'_{tm} \varepsilon_{cr} l_c) / f'_{tm} l_c \quad ..(24)$$

إذ إن l_c تمثل الطول النوعي للشق (Characteristic Length) ويتم حسابه لكل نقطة تكامل كما يأتي:

$$l_c = (dA)^{0.5} \quad ..(25)$$

إذ إن dA تمثل المساحة المساهمة (Contributed Area) من قبل نقطة التكامل للطبقة المتشققة ضمن العنصر القشري.

• كذلك استخدمت في البحث الحالي العلاقة الآتية^[15]:

$$\sigma = f'_{tm} \left\{ e^{\{1 - (\varepsilon / \varepsilon_{cr})\}} \right\} \quad ..(26)$$

معامل القص للمونة المتشققة

تشير النتائج العملية الى قابلية انتقال اجهاد القص عبر السطوح الخشنة لمقطع المونة المتشققة، وسبب الخشونة هو جزيئات الركام التي تبقى ملاصقة أو مطمورة في سطحي الشق. ومن أجل إدخال تأثير استبقاء القص للمونة المتشققة في تحليل العناصر المحددة للسقوف القشرية الفيروسمنتية، تم الاعتماد في البحث الحالي على قيمة G' التي تتناقص خطياً مع زيادة الانفعال العمودي على سطح الشق، إذ لوحظ أن هذه الطريقة أعطت نتائج جيدة مقارنة الى النتائج العملية. وبموجب هذه الطريقة تكون قيمة G' للمونة المتشققة بالاتجاه الأول^[13]:

$$G'_{12} = 0.25G_o(1 - \varepsilon_1 / 0.0045) \quad \text{For } \varepsilon_1 < 0.0045 \quad ..(a.27)$$

$$= 0 \quad \text{For } \varepsilon_1 \geq 0.0045$$

وللمادة المتشققة باتجاهين:

$$G'_{13} = 0.25G_o(1 - \varepsilon_1 / 0.0045) \quad \text{For } \varepsilon_1 < 0.0045 \quad ..(b.27)$$

$$= 0 \quad \text{For } \varepsilon_1 \geq 0.0045$$

$$G'_{23} = 0.25G_o(1 - \varepsilon_2 / 0.0045) \quad \text{For } \varepsilon_2 < 0.0045 \quad ..(c.27)$$

$$= 0 \quad \text{For } \varepsilon_2 \geq 0.0045$$

إذ إن 1، 2، 3 : تمثل المستويات الرئيسية.

G', G_0 : تمثل معامل القص للمونة قبل وبعد التشقق على التوالي.

المعادلة (27) تمثل معامل القص (G') للعنصر المتشقق، إذ تعطي إنحداراً خطياً في قيمة G' مع قيمة الانفعال العمودي على الشق، الذي يعد دالة لعرض الشق الذي لوحظ أنه العامل الرئيس المؤثر على قيمة G' ، وعند وصول أو تجاوز الانفعال العمودي قيمة الانفعال الأقصى (0.0045) تصبح قيمة G' مساوية للصفر.

في البحث الحالي، لوحظ أن النتائج تكون أكثر تطابقاً مع النتائج العملية للمنشآت القشرية الفيروسمنتية عند تحويل العلاقات (27) الى الصيغة الآتية^[16]:
بالاتجاه الأول:

$$\begin{aligned} G'_{12} &= 0.72G_0(1 - \varepsilon_1 / 0.0022) & \text{For } \varepsilon_1 < 0.0022 \\ &= 0 & \text{For } \varepsilon_1 \geq 0.0022 \end{aligned} \quad \text{..(a.28)}$$

وللمادة المتشقة بالاتجاهين:

$$\begin{aligned} G'_{13} &= 0.72G_0(1 - \varepsilon_1 / 0.0022) & \text{For } \varepsilon_1 < 0.0022 \\ &= 0 & \text{For } \varepsilon_1 \geq 0.0022 \end{aligned} \quad \text{..(b.28)}$$

$$\begin{aligned} G'_{23} &= 0.72G_0(1 - \varepsilon_2 / 0.0022) & \text{For } \varepsilon_2 < 0.0022 \\ &= 0 & \text{For } \varepsilon_2 \geq 0.0022 \end{aligned} \quad \text{..(c.28)}$$

التمثيل التكويني للمشبك السلبي

إن سلوك وخواص المشبك السلبي يمكن تحديده بسهولة من نتائج فحص الشد لسلك أحادي من المشبك وهو يعد مادة متجانسة. في البحث الحالي، تم استخدام النموذج الموضح في الشكل (7) لتمثيل خواص المشبك السلبي الذي يظهر السلوك نفسه عند تعرضه لاجهادات شد أو لاجهادات انضغاط. وبعد مرحلة الخضوع للمشبك السلبي فإن علاقة الاجهاد-الانفعال تتبع مساراً موازياً للمسار المرن الابتدائي في حالة رفع الحمل أو إعادة التحميل.

في البحث الحالي تم تمثيل المشبك السلبي بوصفه طبقة ذات سمك مكافئ، وتكون هذه الطبقة ذات سلوك محوري، أي أنها تقاوم القوى المحورية الموازية لاتجاه أسلاك المشبك فقط. ففي المرحلة البدائية من التحليل يفترض مشبك التسليح بوصفه مادة مرنة خطية، وذات معامل مرونة ابتدائي (E_w) حتى وصول الاجهادات قيمة اجهاد الخضوع (f_{yw})، ومع زيادة التحميل فان المادة تتخذ سلوكاً خطياً لدناً تاماً أو مع حدوث تصد الانفعال (Strain Hardening)، ويمكن تعريفه من خلال معامل يونك المرن-اللدن (E^{ep}). وكما يأتي^[11]:

$$E^{ep} = \frac{H_w E_w}{E_w + H_w} \quad ..(29)$$

فعندما تكون قيمة معامل الصلادة $H_w = 0.0$ فإن سلوك المشبك السلبي سيكون لدناً تاماً في مرحلة ما بعد اجهاد الخضوع.

التطبيقات

المثال الأول بلاطة فيروسمنتية بسيطة الإسناد

تم اختيار البلاطة (EWM1) من بين مجموعة من البلاطات الفيروسمنتية التي فحصها (Karasudhi) وآخرون^[17]، تحت تأثير أحمال مركزة ومتزايدة الى مرحلة الفشل. أبعاد البلاطة الفيروسمنتية موضحة في الشكل (8). الخواص المادية للبلاطة الفيروسمنتية والمستخدم في التحليل موضحة في الجدول (1). تم تحليل ربع البلاطة بالاستفادة من خاصية التناظر من خلال تقسيمها الى (20) عنصر قشري محدد وكل عنصر مقسم الى (8) طبقات متساوية السمك لتمثيل المونة و (14) طبقة منتشرة لتمثيل مشبك التسليح والحديد الهيكلي، وتحت تأثير ربع قيمة الحمل الكلي المسلط على البلاطة الفيروسمنتية ومع مراعاة الشروط الحدودية لمقطع ربع البلاطة. ولغرض دراسة تأثير جساءة الشد على سلوك البلاطة الفيروسمنتية، تم رسم المنحنيات الموضحة في الشكل (9) الذي يمثل العلاقة بين الأود في منتصف

البلاطة مع الأحمال المتزايدة باستخدام ثلاثة نماذج لتمثيل جساءة الشد للمونة المتشقة والموضحة في المعادلات (21) و (23) و (26) ومقارنتها مع النتائج العملية، يلاحظ من الشكل أن النتائج العددية للبلاطة باستخدام النموذج في المعادلة رقم (23) كان أكثر توافقاً مع النتائج العملية من النموذجين الآخرين في المعادلتين (21) و (26). ولغرض دراسة تأثير نموذجي معامل استبقاء القص الموضحين في المعادلتين (27) و (28) على النتائج التحليلية للبلاطة الفيروسمنتية تم رسم العلاقة بين الأود والأحمال المتزايدة، بعد أن تم الاعتماد على نموذج جساءة الشد في المعادلة (23)، كما موضح في الشكل (10). ويمكن ملاحظة أن النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام نموذج استبقاء القص في المعادلة (28) كان أكثر توافقاً مع النتائج العملية من نموذج معامل استبقاء القص في المعادلة (27).

المثال الثاني سقف قشري اسطواني ذو قطع مكافئ

فحص (Hedgren) و (Billington)^[18] سقفاً قشرياً اسطوانياً ذا قطع مكافئ معرض لحمل موزع بانتظام على كامل مساحته. السقف القشري، وكما يلاحظ في الشكل (11)، بأبعاد $m1.242 \times 2.159$ وبسمك متغير. تم تحليل ربع السقف القشري بالاستفادة من خاصية التناظر، إذ تم تقسيمه إلى (36) عنصراً قشرياً محدداً، كما موضح في الشكل (12) الذي يوضح كذلك أنماط الطبقات المستخدمة. تم استخدام ثماني طبقات لتمثيل مونة السمنت فضلاً عن عدد طبقات المشبك السلبي وحديد التسليح الموضحة تفصيلها في الجدول (2). أما الخواص المادية للسقف القشري الفيروسمنتي الاسطواني فموضحة في الجدول (3). الشكلان (13) و (14) يوضحان العلاقة بين الأود والحمل المتزايد عند قمة السقف في المنتصف ومنتصف الحافة الحرة على التوالي، باستخدام المعادلة (23) لتمثيل جساءة الشد والمعادلة (28) لتمثيل معامل استبقاء القص ومقارنة النتائج العددية مع النتائج العملية، من هذين الشكلين يظهر التوافق الجيد للنتائج العددية مع النتائج العملية. والشكلان (15) و (16) يوضحان التشققات الحاصلة في الوجه العلوي والسفلي على التوالي لربع السقف القشري عند حمل الفشل.

الاستنتاجات

- من البحث الحالي يمكن استخلاص الاستنتاجات الآتية:
1. أظهر برنامج التحليل باستخدام العناصر القشرية المحددة ذو الثمانية عقد والنماذج المستخدمة في تمثيل العلاقات التكوينية للمواد دقة جيدة في التحليل غير الخطي وقابلية على التنبؤ بأحمال التشقق الابتدائية وأحمال الفشل، وذلك بتوافق النتائج العددية للبلاطات والسقوف القشرية الفيروسمنتية مع النتائج العملية المتوفرة.
 2. يمكن ملاحظة أن ε من المعادلة (20) تعتمد على حجم شبكة الأجزاء المحددة. هذه الطريقة لتعريف ε تجعل النتائج العددية لا تتأثر بحجم الشبكة لتضمن موضوعية النتائج وفي الوقت نفسه تسمح بالتمثيل الحقيقي لتركز الشقوق الشعرية بالقرب من قمة الشق في حالة استخدام شبكة عناصر كبيرة نسبياً.
 3. أظهرت النتائج العددية في البحث الحالي باستخدام ثلاث نماذج لجساءة الشد أن النموذج في المعادلة رقم (23) كان أكثر توافقاً مع النتائج العملية من النموذجين في المعادلتين (21) و (26).
 4. أظهرت النتائج العددية باستخدام نموذجين لمعامل استبقاء القص أن النموذج في المعادلة (28) كان أكثر توافقاً مع النتائج العملية من النموذج في المعادلة (27).

المصادر

1. Hassan, A.H., "Structural Behavior of Thin Ferrocement Folded Plate Roof Structures", M.Sc. Thesis, University of Technology, Building and Construction Department, Baghdad-Iraq, October 1989.
2. Al-Ihmedawi, A.N., "Thin Ferrocement Shell Structures", M.Sc. Thesis, University of Technology, Building and

- Construction Department, Baghdad – Iraq, September 1994.
3. Khalaf, S.H., “Structural Behavior of Long – Span Ferrocement Roofs”, M. Sc. Thesis, University of Technology, Building and Construction Department, Baghdad-Iraq, February 1998.
 4. Ahmed, A.M., “Thin Ferrocement Dome Structures”, M. Sc. Thesis, University of Technology, Building and Construction Department, Baghdad-Iraq, March 1999.
 5. Arif, M., Pankaj and Kaushik, S.K, “Mechanical Behavior of Ferrocement Composites: Numerical Simulation”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, NO. 2, April 1, 2002, pp. 156-163.
 6. Hu, H.T. and Schnobrich, W.C., “Nonlinear Analysis of Plane Stress State Reinforced Concrete under Short Term Monotonic Loading”, Research Report, University of Illinois, April 1988.
 7. Kupfer, H., Hilsdorf, H.K. and Rusch, H., “Behavior of Concrete under Biaxial Stresses”, ACI Journal, No. 66 – 52, August 1969, pp. 656 – 665.
 8. Saenz, L.P., Discussion of “Equation for the Stress Strain Curve of Concrete”, By Desayi, P. and Krishnan, S., ACI Journal, Proceedings, Vol. 61, No. 9, September 1964, pp. 1229 – 1235.
 9. Mikkola, M.J. and Schnobrich, W.C., “Material Behavior

Characteristics for Reinforced Concrete Shells Stressed Beyond the Elastic Range”, Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 367, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois, August 1970.

10. Elwi, A.A. and Murray D.W., “A 3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, No. EM4, August 1979, pp. 623-641.
11. Kwak, H.G. and Filippou, F.C., “Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures under Monotonic Loads”, Structural Engineering, Mechanics and Materials, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, Report No. UCB/SEMM – 90/14, November 1990.
12. Alniaeeme, S.A., “Nonlinear Finite Elements Analysis of Ferrocement Shell Roofs”, M.Sc. Thesis, University of Mosul, Civil Engineering Department, Mosul, Iraq, 2006.
13. Hinton, E. and Owen, D. R. J., “ Finite Element Software for Plates and Shells” First Edition 1984, Pineridge Press Limited, U.K.
14. Cervera, M. and Hinton, E., “Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Plates and Shell Using Three Dimensional Model”, Computational Modeling of Reinforced Concrete Structures, (Edited by Hinton, E., and

- Owen, D.R.J.), Pineridge Press Limited Swansea, 1986, pp. 327 - 350.
15. Taylor, H.P.J. "The Fundamental Behavior of Reinforced Concrete Beams in Bending and Shear ", Shear in Reinforced Concrete, Publication SP 42-1, ACI 1974, pp. 43-77.
 16. Mahmmod, M.N., "Non-Linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Beam", M.Sc. Thesis, University of Mosul, Iraq, January 1986.
 17. Karasudhi, P., Mathew, A.G. and Nimityongskul, P., "Fatigue of Ferrocement in Flexure", Journal of Ferrocement, Vol. 7, No. 2, October 1977, pp. 80-95.
 18. Hedgren, A.W. and Billington, D.P., "Mortar Model Test on A Cylindrical Shell of Varying Curvature and Thickness", ACI Journal, No. 46-7, February 1967, pp. 73-83.

الجدول (1): الخواص المادية للبلاطة الفيروسمنتية (EWM1) للمثال الأول

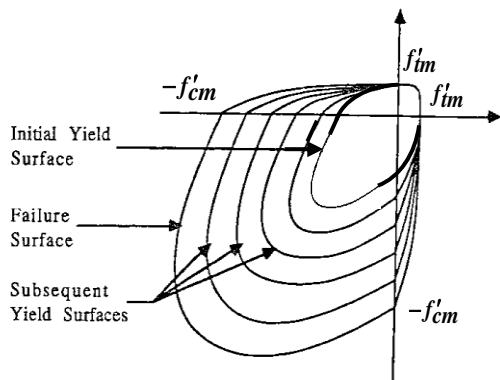
Cement Mortar		
E_m	Elastic Modulus (MPa)	25000.0
f'_{cm}	Compressive Strength (MPa)	50.0
f'_{tm}	Tensile Strength (MPa)	4.2
Gf	Fracture Energy (N/mm)	0.15
ν	Poisson's Ratio	0.167
ϵ_u	Ultimate Compressive Strain	0.016
α	Tension Stiffening Coefficient	0.7
Mild Steel		
E_s	Elastic Modulus (MPa)	172400.0
E'_s	Elasto-Plastic Modulus (MPa)	14109.0
f_y	Yield Stress (MPa)	198.2
f_u	Ultimate Stress (MPa)	360.4
D_s	Diameter of Bar (mm)	6.0
V_f	Volume Fraction of Skeletal Steel	0.0122541
Wire Mesh		
E_w	Elastic Modulus (MPa)	62500.0
E'_w	Elasto-Plastic Modulus (MPa)	4436.3
f_{yw}	Yield Stress (MPa)	255.0
f_{uw}	Ultimate Stress (MPa)	436.0
D_w	Diameter of Wire (mm)	0.8
V_{fw}	Volume Fraction of Wire	0.0081073

الجدول (2): تفاصيل حديد التسليح لكل طبقة من السقف القشري الفيروسمنتي للمثال الثاني

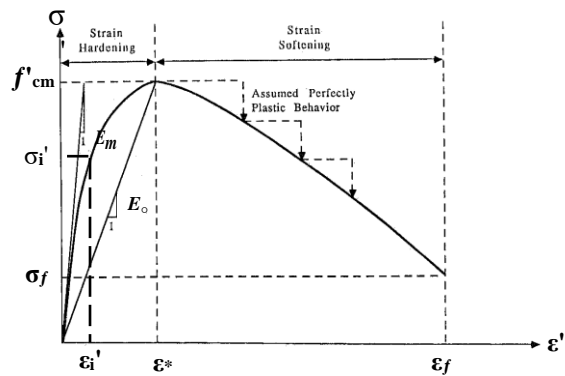
Layer Pattern	Layer 1				Layer 2			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
1	4	0.602	-0.795	0.0	3	0.574	-0.640	90.0
2	4	0.602	-0.795	0.0	3	0.574	-0.640	90.0
3	4	0.602	-0.795	0.0	3	0.502	-0.640	90.0
4	4	0.602	-0.795	0.0	3	0.302	-0.640	90.0
5	3	0.691	-0.642	0.0	3	0.574	-0.640	90.0
6	3	0.691	-0.642	0.0	3	0.574	-0.640	90.0
7	3	0.691	-0.642	0.0	3	0.502	-0.640	90.0
8	3	0.691	-0.642	0.0	3	0.302	-0.640	90.0
9	3	0.483	-0.50	0.0	3	1.102	-0.308	90.0
10	3	0.483	-0.50	0.0	3	1.102	-0.308	90.0
11	3	0.483	-0.50	0.0	3	0.964	-0.308	90.0
12	3	0.483	-0.50	0.0	3	0.579	-0.308	90.0
13	3	0.483	-0.50	0.0	3	0.552	-0.308	790.0
14	3	0.483	-0.50	0.0	3	0.482	-0.308	90.0
15	3	0.483	-0.50	0.0	3	0.552	-0.308	90.0
16	3	0.483	-0.50	0.0	3	0.482	-0.308	90.0
17	3	0.483	-0.50	0.0	3	0.579	-0.308	90.0
Layer Pattern	Layer 3				Layer 4			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
1	9	2.996	-0.478	0.0	4	0.419	0.0	45.0
2	9	2.853	-0.478	0.0	4	0.419	0.0	45.0
3	9	2.853	-0.478	0.0	4	0.419	0.0	45.0
4	9	1.902	-0.478	0.0	4	0.629	0.0	45.0
5	3	0.251	0.625	0.0	4	0.479	0.740	90.0
6	4	0.419	0.0	45.0	3	0.251	0.625	0.0
7	4	0.419	0.0	45.0	3	0.251	0.625	0.0
8	4	0.629	0.0	45.0	3	0.251	0.625	0.0
9	3	0.482	0.280	0.0	4	0.920	0.500	90.0
10	4	0.511	0.0	45.0	3	0.482	0.280	90.0
11	4	0.511	0.0	45.0	3	0.482	0.280	90.0
12	4	1.208	0.0	45.0	3	0.482	0.280	90.0
13	3	0.482	0.280	0.0	4	0.920	0.500	90.0
14	3	0.482	0.280	0.0	4	0.805	0.500	90.0
15	3	0.482	0.280	0.0	4	1.841	0.500	90.0
16	3	0.482	0.280	0.0	4	1.611	0.500	90.0
17	3	0.482	0.280	0.0	4	0.614	0.500	90.0
Layer Pattern	Layer 5				Layer 6			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
1	9	2.996	0.478	0.0	3	0.250	0.625	0.0
2	9	2.853	0.478	0.0	3	0.250	0.625	0.0
3	9	2.853	0.478	0.0	3	0.250	0.625	0.0
4	9	1.902	0.478	0.0	3	0.250	0.625	0.0
5								
6	4	0.479	0.740	90.0	(1) : Reinforcing Bar Designation (#3, #4, #9) (2) : Layer Thickness in Normalized t -Coordinate(x100) 3) : Layer Position in Normalized(t -Coordinate (Top: $t = +1$, Bottom: $t = -1$) (4) : Angle Between The Reinforcement And The Local X-Axis (Degree)			
7	4	0.419	0.740	90.0				
8	4	0.503	0.740	90.0				
9								
10	4	0.920	0.500	90.0				
11	4	0.805	0.500	90.0				
Layer Pattern	Layer 7				(4) : Angle Between The Reinforcement And The Local X-Axis (Degree)			
	(1)	(2)	(3)	(4)				
1	4	0.479	0.740	90.0				
2	4	0.479	0.740	90.0				
3	4	0.419	0.740	90.0				
4	4	0.503	0.740	90.0				

الجدول (3) الخواص المادية للسقف القشري للمثال الثاني

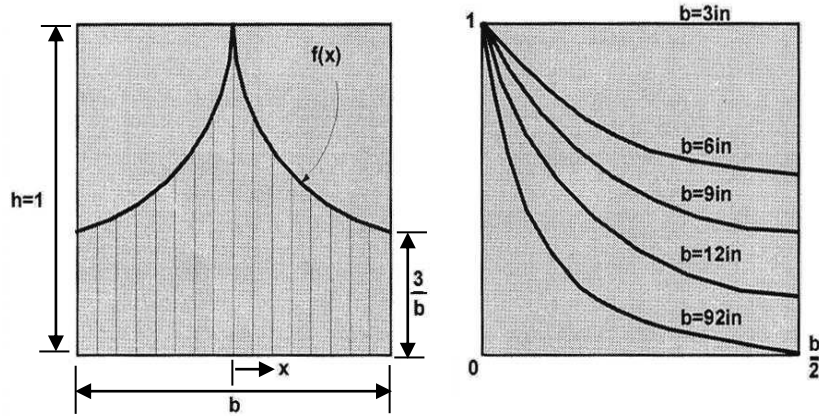
Cement Mortar				
E_m	Elastic Modulus (MPa)	20690.0		
f'_{cm}	Compressive Strength (MPa)	30.2		
f'_{tm}	Tensile Strength (MPa)	4.8		
Gf	Fracture Energy (N/mm)	0.1		
ν	Poisson's Ratio	0.145		
ε_u	Ultimate Compressive Strain	0.012		
Wire Mesh				
Steel Bar Designation		#3	#4	#9
E_w	Elastic Modulus (MPa)	200000.0		
E'_w	Elasto- Plastic Modulus (MPa)	40000		
f_{yw}	Yield Stress (MPa)	252.9	219.1	306.6
f_{uw}	Ultimate Stress (MPa)	364.2	344.9	420.0
D_w	Diameter of Bar (mm)	1.22	1.57	3.43



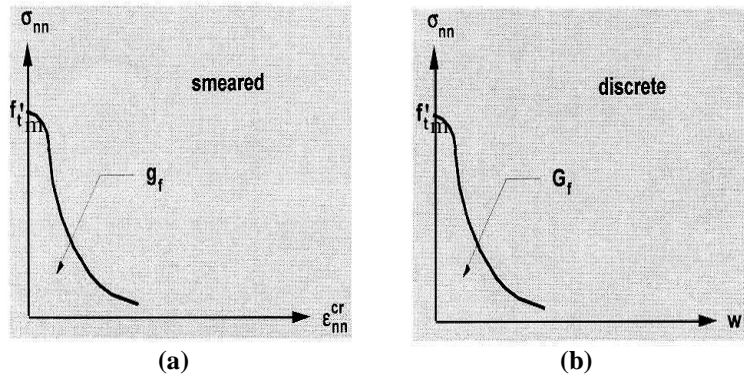
الشكل (2): سطوح التحميل للمونة لمستوي اجهاد رئيس ثنائي الأبعاد [8]



الشكل (1): نموذج علاقة الاجهاد-الانفعال المحوري المكافئ [8]

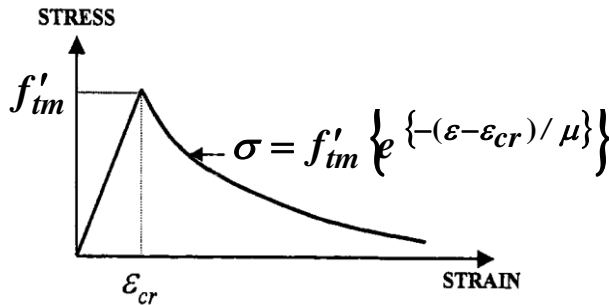


الشكل (3): التوزيع المقترح للشقوق الشعرية في العنصر [11]

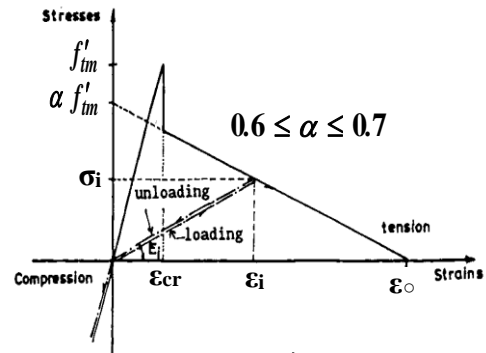


الشكل (4): نموذج سلوك تطري الانفعال للمونة [11]

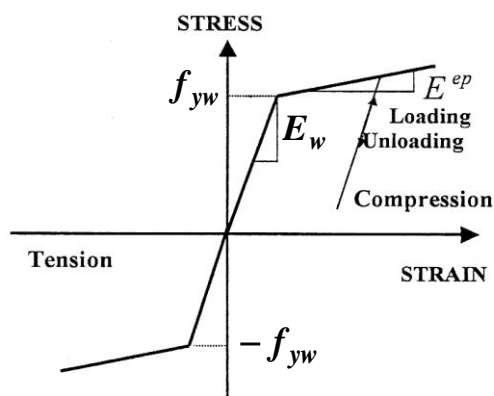
a. علاقة إجهاد الشد-إنفعال التشقق
b. علاقة إجهاد الشد-إزاحة الشق



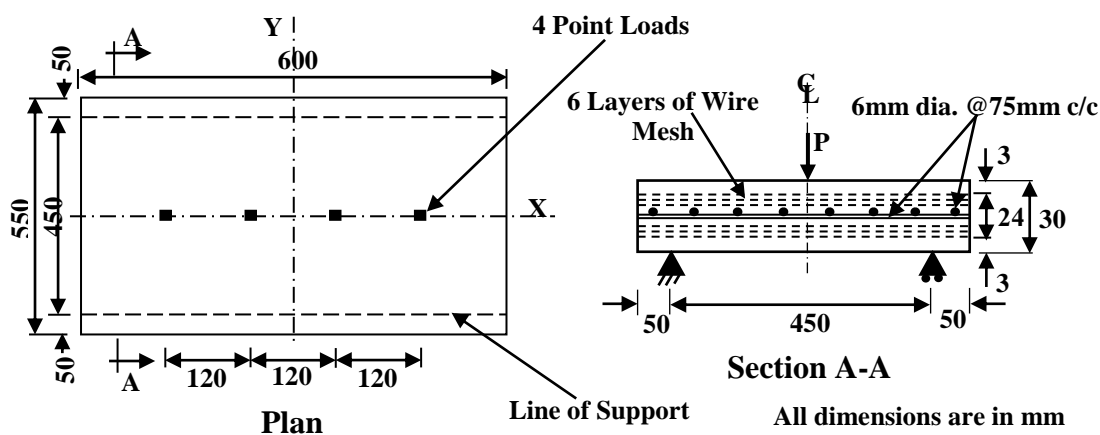
الشكل (6): نموذج جساءة الشد غير الخطي [14]



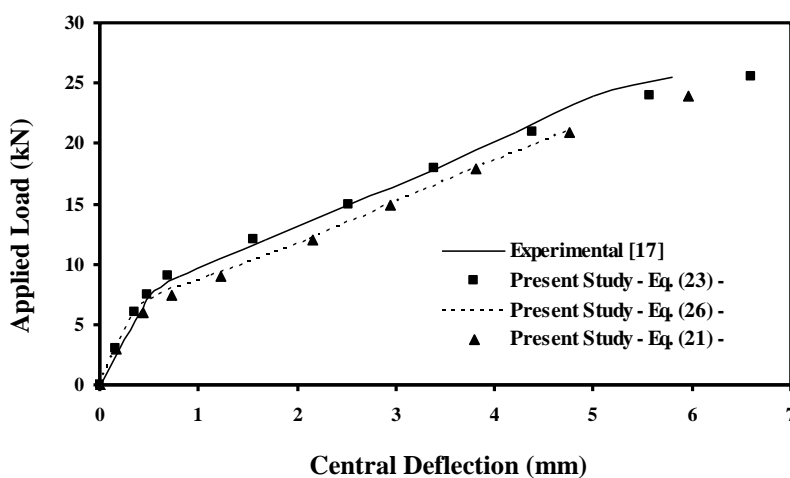
الشكل (5): نموذج جساءة الشد الخطي [13]



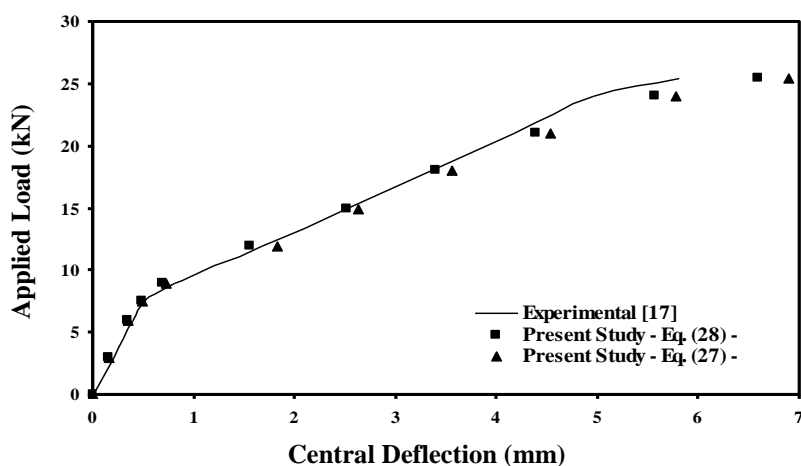
الشكل (7): نموذج سلوك حديد التسليح (المشبك السلبي) [11]



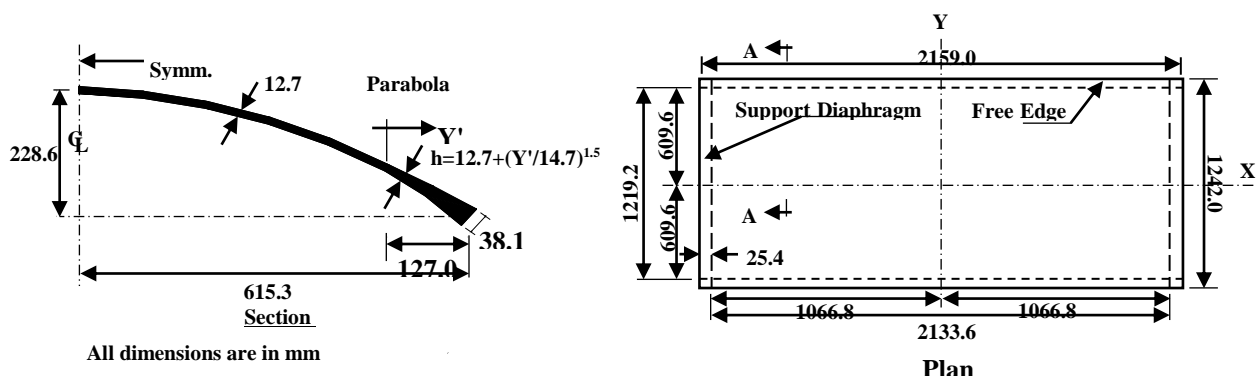
الشكل (8): تفاصيل البلاطة الفيروسمنتية (EWM1) للمثال الأول



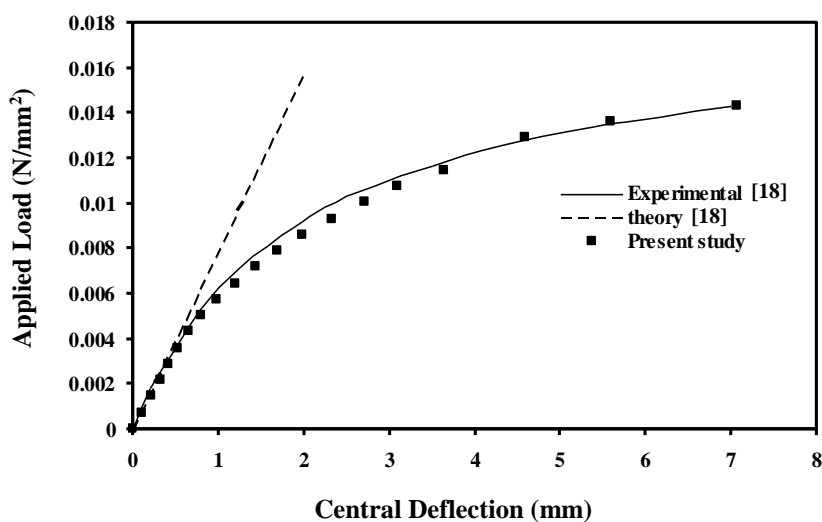
الشكل (9): تأثير نماذج جساءة الشد على استجابة (الأود-الحمل) للبلاطة الفيروسمنتية (EWM1) للمثال الأول [17]



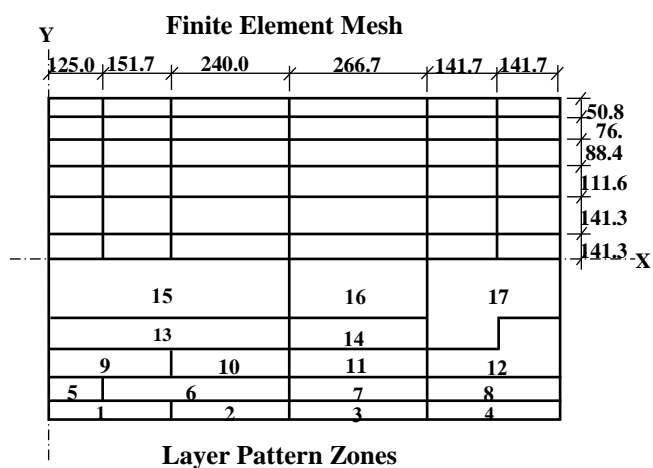
الشكل (10): تأثير نموذجي معامل استبقاء القص على استجابة (الأود-الحمل) للبلابة الفيروسمنتية (EWM1) للمثال الأول [17]



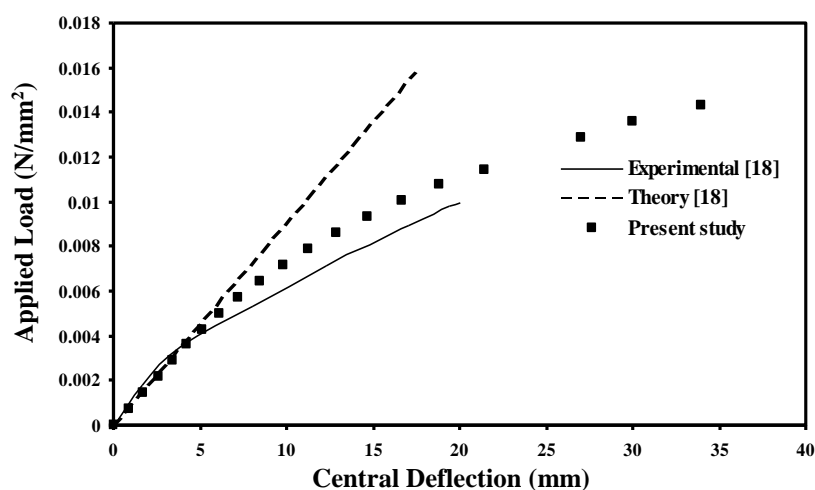
الشكل (11): تفاصيل النموذج القشري الفيروسمنتي للمثال الثاني



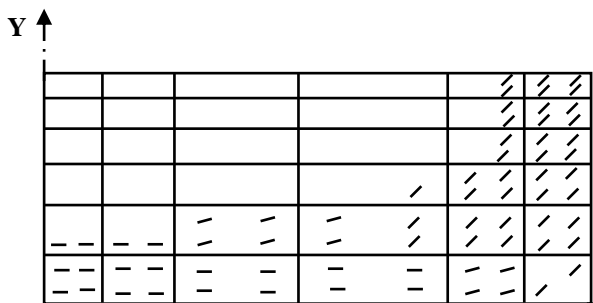
الشكل (13): منحنى (الأود-الحمل) لقمة السقف القشري الاسطواني في المنتصف [18]



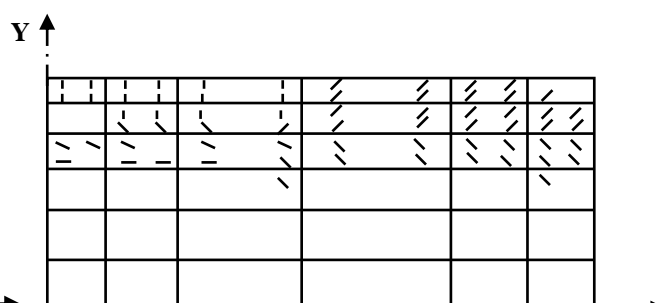
الشكل (12): تمثيل العناصر المحددة وأنماط الطبقات للسقف القشري الفيروسمتي للمثال الثاني



الشكل (14): منحنى (الأود-الحمل) للسقف القشري الاسطواني عند منتصف الحافة الحرة [18]



الشكل (16): التشققات في الوجه العلوي لربع السقف القشري عند حمل الفشل



الشكل (15): التشققات في الوجه السفلي لربع السقف القشري عند حمل الفشل

NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FERROCEMENT SLABS AND SHELL ROOFS

Dr. Mohamad N. Mahmood
Assistant Professor

Sura A. Majeed
Assistant Lecturer

Civil Eng.Dept.- Mosul University

ABSTRACT

The present work involves developing an analytical model to study the behavior of ferrocement slabs and shell roofs, and to adopt the most realable constitutive relationships for the mortar material to predict the nonlinear response of ferrocement roofs by using the finite element method. To represent the mortar and wire mesh, a layered approach is used. Mortar is considered as a strain-hardening material and exhibiting strain-hardening behavior till it reaches the peak stress, beyond which, mortar enters the descending portion (strain softening) until it reaches the crushing strain. Tension stiffening is used to model the post-cracking tensile strength of the mortar. Under further loading in post-cracking stage shear retention is used to model the shear transfer throughout the cracks. The behavior of steel reinforcement and wire mesh is considered as elastic perfectly plastic with linear strain hardening. The predicted results of ferrocement slab and cylindrical shell roofs had shown a good agreement with the published experimental results.

KEYWORDS

Ferrocement, Mortar, Shell Roofs, Wire Mesh, Finite Element, Non-linear Analysis.