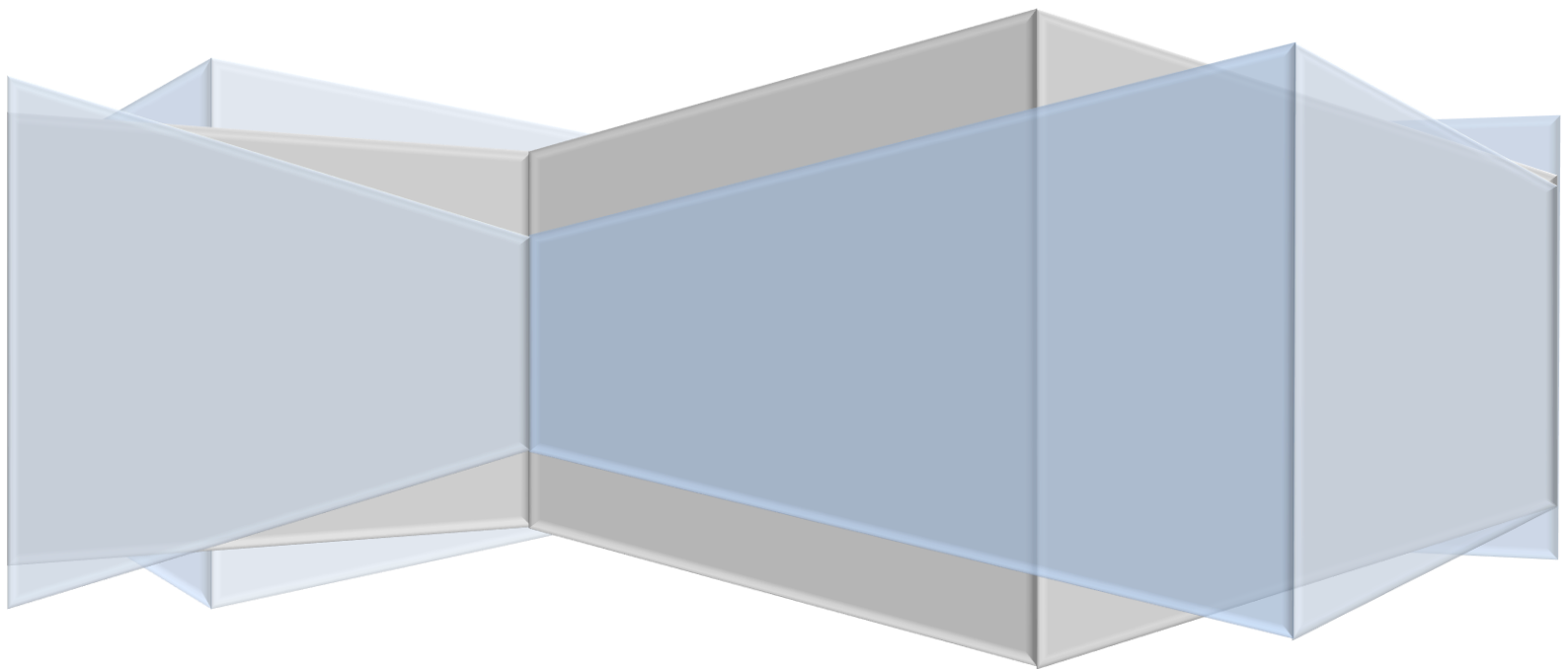


الفصل الخامس

النتائج والمناقشة



الفصل الخامس النتائج والمناقشة

General	١,٥ عام
---------	---------

الهدف الرئيس للدراسة الحالية هو البحث في السلوك الإنشائي للعتبات الخرسانية الليفيه بمقطع مستطيل ومقارنتها بالعتبات الخالية من الألياف . في هذا الفصل سيتم عرض النتائج المستحصلة من البرنامج العملي لهذه الدراسة بالإضافة إلى مقارنتها مع النتائج المستحصلة من البرنامج النظري المستخدم واستخراج نتائج إضافية من هذا البرنامج .

في هذه الدراسة تم أخذ (١٣) مجموعة من العتبات الخرسانية وفي كل مجموعة (٣) عتبات وفُحصت جميعها تحت نقطتي تحميل حتى الفشل . المجموعة الأولى (R) كانت للعتبات المرجعية الخالية من الألياف ، والمجاميع الثانية (P ١) والثالثة (P ٢) والرابعة (P ٣) كانت للعتبات الخرسانية الحاوية على ألياف البولي بروبيلين وبالنسب (٠,٢٥، ٠,٧٥، ١,٢٥) % على التوالي . أما المجاميع الخامسة (S ١) والسادسة (S ٢) والسابعة (S ٣) فكانت للعتبات الخرسانية الحاوية على ألياف الحديد وبالنسب أعلاه أيضاً . والمجاميع الثامنة (P+S ١) والتاسعة (P+S ٢) والعاشر (P+S ٣) كانت للعتبات الخرسانية الحاوية على ألياف مدمجة (الألياف الحديد وألياف البولي بروبيلين) وكلا النوعين يشغل (٥٠) % من النسبة الحجمية المذكورة آنفاً ، أما المجاميع المتبقية فكانت بعد فحص العتبات الخرسانية الليفيه واختيار ثلاث نسب مُثلَى من بين تلك النسب واحدة لكل نوع لألياف البولي بروبيلين وكذلك الحال بالنسبة لألياف الحديد والألياف المدمجة ليتم وضعها في منطقة الشد والخرسانة الخالية من الألياف في منطقة الإنضغاط .

كل العتبات في المجاميع أعلاه لها طول ومقطع عرضي موحد وتم تسليحها على نحوٍ متطابق . النتائج التي سيتم عرضها في هذا الفصل هي قيم الهطول بالنسبة للخرسانة الطرية وبالنسبة للخرسانة المتصلبة تتضمن عرض نتائج الفحوصات العملية ونتائج التحليل بالبرنامج الحاسوبي (ANSYS+CivilFEM) . نتائج الفحوصات العملية تشمل مقاومة الإنضغاط ومقاومة شد الإنشطار ومنحني الحمل-الأود ومنها الحمل عند الشق الأول والحمل الأقصى . أما نتائج التحليل بالبرنامج الحاسوبي فيتم عرضها بشكل منحنيات الحمل-الأود والإنفعال على عمق مقطع العتبة والإجهادات على طول العتبة كما سيأتي ذكرها .

Workability of Fresh Concrete

٢,٥ قابلية تشغيل الخرسانة الطرية

هناك العديد من التأثيرات التي تتم ملاحظتها على الخرسانة عند إضافة الألياف إليها ومن أكثر هذه التأثيرات وضوحاً هي التقليل من قابلية التشغيل مع زيادة النسبة الحجمية للألياف . إن قابلية تشغيل الخرسانة الليفية (FRC) هي المحور الرئيس في تحديد جودة هذه الخرسانة ، وهناك عدة عوامل ثانوية تُحدد مستوى قابلية التشغيل وهي النسبة الحجمية للألياف وحجم مكونات عجينة الإسمنت (الماء والإسمنت) والنسبة الباعية للألياف . إن تقليل الهطول من قبل الألياف لا يعني بالضرورة صعوبة رص الخرسانة بواسطة عملية الرج (Vibration) ، والألياف تجعل من الخلطة أكثر جفافاً إذا كانت المساحة السطحية كبيرة ^(١٦).

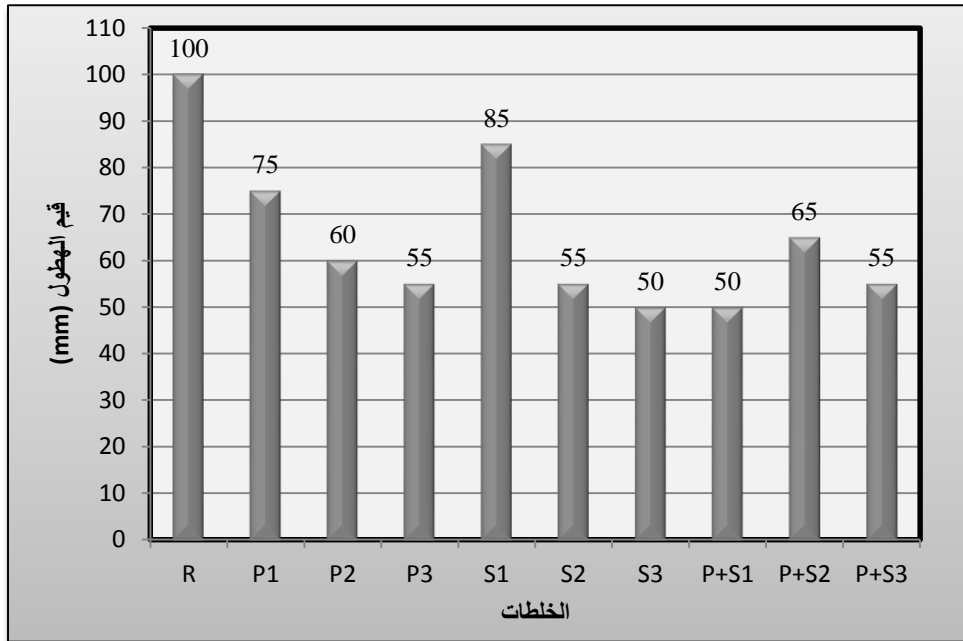
تم فحص قابلية التشغيل عن طريق فحص الهطول (Slump) (كما ذُكر في الفصل الثالث) والغرض من إجراء هذا الفحص هو لمعرفة قابلية التشغيل للخرسانة المرجعية والخرسانة الليفية الحاوية على ألياف البولي بروبيلين أو الحديد أو الإيثان معاً وبالنسب الحجمية (٠,٢٥ ، ٠,٧٥ ، ١,٢٥ %) والتأكد من كونها ضمن الحدود المسموحة للمواصفات .

نظراً لإعتماد قيمة نسبة الماء/السمنت (w/c) ثابتة لجميع الخلطات فيتم الحفاظ على قيم الهطول تتراوح بين (٥٠-١٠٠ mm) من خلال زيادة كمية المادة الملدنة في الخلطة بعد التأكد من عدم مطابقة قيمة الهطول للقيم المحددة . نلاحظ من خلال الشكل (٥-١) أنه بزيادة النسبة الحجمية للألياف من (٠,٢٥ %) الى (١,٢٥ %) تقل قيم الهطول وهذا التأثير يبدو أكثر وضوحاً في الخلطات الحاوية على ألياف الحديد أكثر من تلك التي تحتوي على ألياف البولي بروبيلين لوحدها . فعلى الرغم من نقصان الهطول بزيادة نسبة الياف البولي بروبيلين إلا أن هذا النقصان كان بدون إضافة المادة الملدنة عند النسبتين (٠,٢٥ و ٠,٧٥ %) بينما في حالة ألياف الحديد يقل الهطول حتى بعد إضافة المادة الملدنة للخلطات بالنسب الحجمية (٠,٢٥ ، ٠,٧٥ ، ١,٢٥ %) إذ أن ألياف البولي بروبيلين صغيرة الحجم وتنتشر بسهولة وخاصة عند النسب القليلة بينما ألياف الحديد تكون طويلة مقارنة بألياف البولي بروبيلين وغير قابلة لتغيير شكلها في الخلطة ومساحتها السطحية أكبر، كل هذا يؤثر على النقصان في قابلية التشغيل، أما بالنسبة للخلطات الحاوية على ألياف مدمجة فالحاجة إلى وجود المادة الملدنة أقل من تلك التي في حالة إضافة الياف الحديد وأكثر من الخلطات الحاوية على ألياف البولي بروبيلين لوحدها .

مقدار النقصان في قيم الهطول (Slump) كانت (٢٥ ، ٤٠ ، ٤٥ و ٥٥ %) للمجاميع (P١ ، P٢ و P٣) على التوالي وبمقدار (١٥ ، ٤٥ و ٥٥ %) للمجاميع (S١ ، S٢ و S٣) على التوالي وبمقدار (٥٠ ، ٣٥ و ٤٥ %) للمجاميع (P+S١ ، P+S٢ و P+S٣) على التوالي .

جدول (5 - 1) قيم w/c و الهطول ونسب المادة الملدنة وغبار السيليكا في الخلطات الخرسانية

الخلطة رقم	الرمز	نسبة الألياف %	الياف البولي بروبيلين %	ألياف الفولاذ %	w/c	غبار السيليكا %	الملدن الفائق %	الهطول (mm)
١	R	٠	٠	٠	٠,٣٨	١٠	٣	١٠٠
٢	P١	٠,٢٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	١٠	٣	٧٥
٣	P٢	٠,٧٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	١٠	٣	٦٠
٤	P٣	١,٢٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	١٠	٣,٣٠٨	٥٥
٥	S١	٠,٢٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	١٠	٣,٠٧٧	٨٥
٦	S٢	٠,٧٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	١٠	٣,٢٣١	٥٥
٧	S٣	١,٢٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	١٠	٣,٣٠٨	٥٠
٨	P+S ١	٠,٢٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	١٠	٣	٥٠
٩	P+S ٢	٠,٧٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	١٠	٣,١٥٤	٦٥
١٠	P+S ٣	١,٢٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	١٠	٣,٢٣١	٥٥



الشكل (5 - 1) : مخطط لقيم الهطول للخلطات الخرسانية مقارنة بالخلطة المرجعية

Compressive Strength**٣,٥ مقاومة الإنضغاط**

تعتبر مقاومة إنضغاط الخرسانة من أهم الخصائص الميكانيكية للخرسانة المتصلبة والتي يُمكن من خلالها حساب الكثير من الخصائص الميكانيكية الأخرى . تم فحص مقاومة الانضغاط للمكعبات حسب المواصفة البريطانية (BS. ١٨٨١: part ١١٦: ١٩٨٩)^(٨٩) والنتائج المبينة في الشكل (٥-٣) هي نتائج فحص مقاومة الإنضغاط للمكعبات المُعالجة بالماء لمدة (٢٨ يوماً) ومأخوذة كمعدل لثلاث نماذج مع حذف القيمة التي تقل عن المعدل بمقدار يزيد عن (١٠%)^(٩٣) .

من خلال عرض النتائج في الشكل (٥ - ٣) تبين أن إضافة ألياف البولي بروبيلين ليس لها تأثير على التحسين في قيم مقاومة الإنضغاط بل على العكس إذ إنها تُسبب نقصان طفيف في قيم مقاومة الإنضغاط عند النسب (٠,٢٥ و ٠,٧٥%) وزيادة قليلة جداً عند النسبة (١,٢٥%) وقد يرجع سبب هذا النقصان قد يكون ان عملية الرص تكون غير كافية لطرد الفجوات الهوائية تحت الألياف أو إلى كون هذه الألياف ذات معامل مرونة قليل مقارنةً بمعامل مرونة الخرسانة في عمر ٢٨ يوم لذا فإن وجودها في الخرسانة يُضعف من بنيتها حيث يدخل ضمن مكونات الخرسانة ذات معامل المرونة الأعلى ومن المحتمل أن يكون تأثير هذه الألياف أكثر إيجابية في الأعمار المبكرة حيث تكون الخرسانة فيها أضعف فتكون الألياف هي الأقوى تحت تأثير الأحمال . إن نسب نقصان المقاومة في حالة إضافة ألياف البولي بروبيلين إلى الخرسانة هي (٤,٥ و ٣,٦%) للنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥%) على التوالي إذ تبدأ بنقصان كبير نوعاً ما ثم يقل هذا النقصان تدريجياً بزيادة النسبة الحجمية إذ تقوم هذه الكمية الكبيرة من الألياف بربط الخرسانة وجعلها أكثر تماسكاً لتصل زيادة المقاومة إلى (١,٣%) عند النسبة (١,٢٥%) .

أما وجود ألياف الحديد في الخرسانة فإنه يُزيد بصورة كبيرة من مقاومة الإنضغاط للمكعبات وتبدأ هذه الزيادة من النسب القليلة وتستمر بالزيادة ومقدار الزيادة هذه هي (١٠,٧ و ٢٦,٥ و ٣٤%) للنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥ و ١,٢٥%) على التوالي . وترجع أسباب ما تُضفه هذه الألياف من زيادة في مقاومة الإنضغاط إلى زيادتها لتماسك الخرسانة وجعلها كتلة أثر صلادة وتقاوم إلى حد كبير التشققات الحاصلة في منطقة الشد.

بصورة عامة تزداد مقاومة الإنضغاط بوجود الياف الحديد والألياف المدمجة بصورة ملحوظة إذ أن وجود هذه الألياف يقاوم نشوء التشققات وكذلك إتساعها لذلك يزيد من مقدار الحمل الذي تتحمله الخرسانة حتى تفشل . ووجود هذه الألياف يُغير شكل فشل المكعبات المفحوصة من شكل مخروطي ويتجهش فيه المكعب في حالة الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على ألياف البولي بروبيلين كما في النموذجين الأول والثاني الشكل (٥ - ٢) إلى بقاء المكعب محافظاً على شكله تقريباً في حالة الخلطة الحاوية على الياف الحديد كما في النموذجين الثالث والرابع الشكل (٥ - ٢) .

وبالنسبة للخرسانة الحاوية على الألياف المدمجة فأنها تُبدي مقاومة إنضغاط عالية حتى عند النسبة القليلة مقارنة بالخرسانة المرجعية وتستمر المقاومة بالزيادة مع زيادة النسبة الحجمية للألياف ومقدار الزيادة نتيجة إضافة هذه الألياف كان (٤,٤ ١٥,٣٠ و ٢٢,٧%) للنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥ و ١,٢٥%) على التوالي .

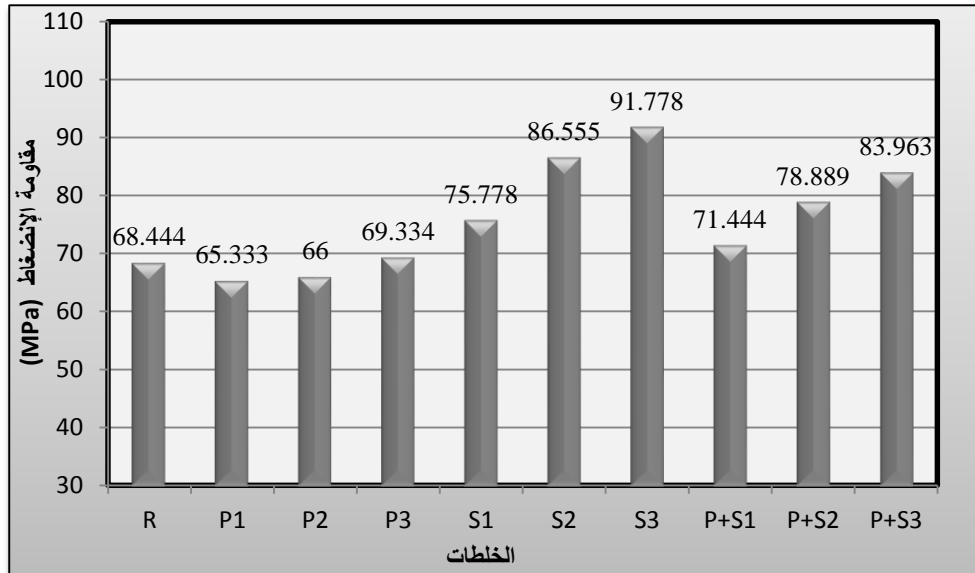
أما نوع الفشل فيتنغير من فشل قصف (*Brittle*) ومفاجئ في حالة الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على ألياف البولي بروبيلين إلى فشل أكثر مطيلية وتدرجي إذ تبدأ التشققات بالظهور ويستمر في تحمل المزيد من القوة المسلطة في حالة وجود ألياف الحديد في المكعبات الخرسانية .



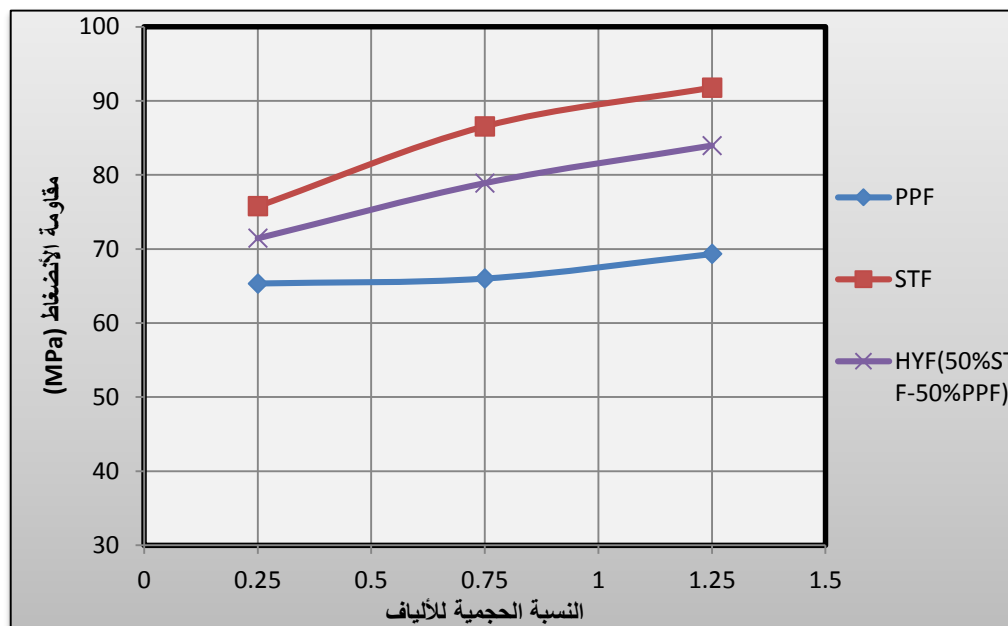
الشكل (5 - 2): نماذج المكعبات المفحوصة

جدول (5 - 2) نتائج مقاومة الإنضغاط للمكعبات المفحوصة

رقم الخلطة	الرمز	نسبة الألياف %	نسبة الياف البولي بروبيلين %	نسبة ألياف القولاذ %	w/c	مقاومة الإنضغاط للمكعبات بعمر ٢٨ يوم (MPa)
١	R	٠	٠	٠	٠,٣٨	٦٨,٤٤٤
٢	P١	٠,٢٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	٦٥,٣٣٣
٣	P٢	٠,٧٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	٦٦
٤	P٣	١,٢٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	٦٩,٣٣٤
٥	S١	٠,٢٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	٧٥,٧٧٨
٦	S٢	٠,٧٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	٨٦,٥٥٥
٧	S٣	١,٢٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	٩١,٧٧٨
٨	P+S ١	٠,٢٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	٧١,٤٤٤
٩	P+S ٢	٠,٧٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	٧٨,٨٨٩
١٠	P+S ٣	١,٢٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	٨٣,٩٦٣



الشكل (5 - 3): مخطط قيم مقاومة الإنضغاط للمكعبات المفحوصة



الشكل (5 - 4) : منحنى قيم مقاومة الإنضغاط للمكعبات المفحوصة لكل النسب المستخدمة

٤,٥ مقاومة شد الإنشطار Splitting Tensile Strength

معدل قيم مقاومة الشد المستحصلة من فحص شد الإنشطار لثلاث نماذج اسطوانية بأبعاد (١٥٠×٣٠٠mm) والمفحوصة حسب المواصفة الأمريكية (ASTM C ٩٦-٩٦) ^(٩٤) مبينة في الجدول (٥ - ٣) وفي المخطط (٥ - ٣) .

من المتوقع عند إضافة ألياف البولي بروبيلين تزداد مقاومة الخرسانة للشد ولكن النتائج تُبين أن الزيادة في مقاومة الشد طفيفة في حالة النماذج الحاوية على ألياف البولي بروبيلين لأن معامل المرونة لهذه الألياف أقل من الخرسانة وأن نسب الزيادة في مقاومة الشد عن الخرسانة المرجعية هي (١,٢، ٥,١، و ١٦,٢ %) للنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥ و ١,٢٥ %) على التوالي . بينما تصل أعلى قيمة شد في حالة النماذج الحاوية على ألياف الحديد بنسبة (١,٢٥ %) إذ أن وجود ألياف الحديد ذات خصائص مقاومة الشد ومعامل المرونة العالية يُكسب الخرسانة مقاومة شد عالية ومما يُزيد من إكساب الخرسانة مقاومة الشد العالية هو الترابط بينها وبين الياف الحديد نتيجة استخدام الياف معقوفة النهايات وأن نسب الزيادة عن الخرسانة المرجعية كانت (٨,٥، ٢٢، و ٥١,٥ %) للنسب (٠,٢٥، ٠,٧٥، و ١,٢٥ %) على التوالي .

وبالنسبة للزيادة في مقاومة الشد في النماذج الحاوية على الألياف المدمجة فإنه يُمثل حالة وسط بين الزيادة الطفيفة في حالة وجود ألياف البولي بروبيلين في الخرسانة والزيادة العالية في حالة وجود ألياف الحديد ، وسبب النقصان عن النماذج الحاوية على الياف الحديد يكمن في احتوائها على هذه الألياف

بنسبة أقل ، ونسب الزيادة في مقاومة الشد عن الخرسانة المرجعية كانت (١٤,٢ ، ٢٢,٠ و ٣٠,٧ %) للنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥ و ١,٢٥ %) على التوالي .

إن الزيادة في مقاومة الشد بوجود الألياف بصورة عامة يكمن في قابلية الألياف على مقاومة نشوء التشققات وكذلك إتساعها من خلال ربط تلك الشقوق بفعالية من خلال توفير وسط لنقل الإجهادات وهذا يؤخر من إتساعها وتطورها وتساعد الألياف على حمل وإعادة توزيع الإجهادات المسلطة .

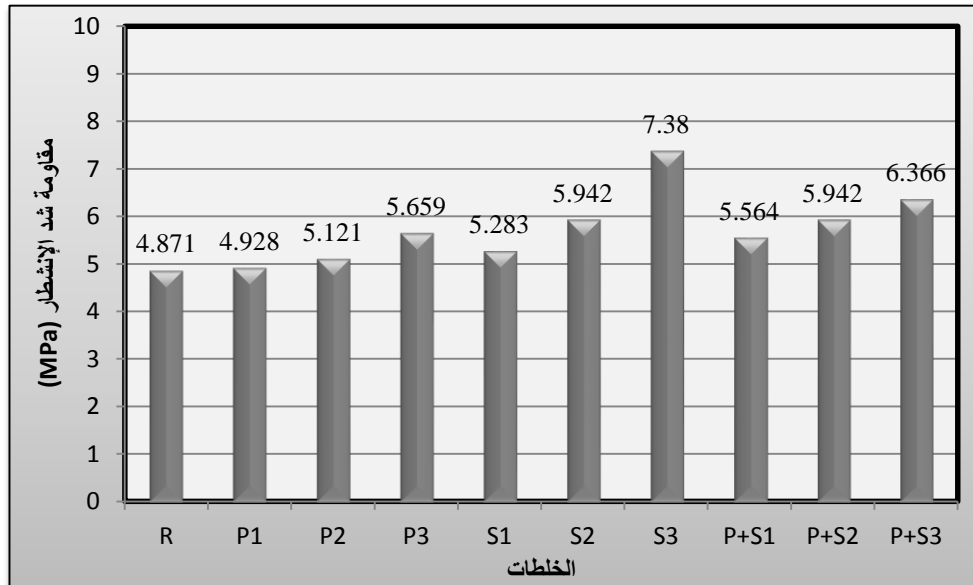
أما بالنسبة لنوع وشكل الفشل فيتغير من فشل قصف وإنشطار النموذج إلى جزعين في حالة الخرسانة المرجعية والخرسانة الحاوية على ألياف البولي بروبيلين كما في النموذجين الأول والثاني في الشكل (٥ - ٥) إلى فشل مطيلي مع بقاء النموذج محافظاً على شكله تقريباً في حالة الخرسانة الحاوية على ألياف الحديد والحاوية على الألياف المدمجة كما في النموذجين الثالث والرابع للشكل (٥ - ٥) ومما تجدر الإشارة إليه أيضاً أن إنشطار النموذج المفحوص إلى جزعين كان بإنكسار حبيبات الركام وليس انفصالها على الخرسانة وهذا يعكس مدى قوة الترابط بين الركام والخرسانة.



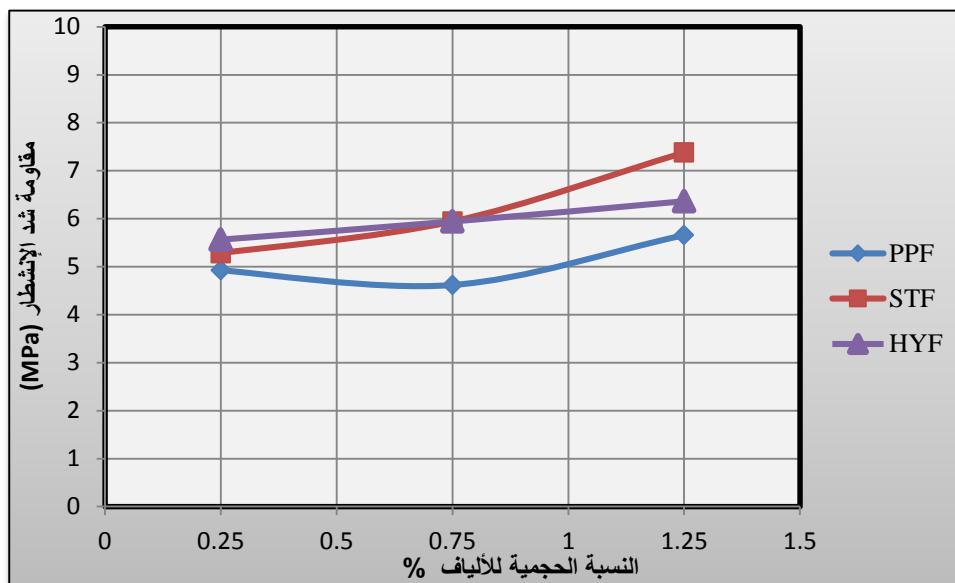
الشكل (5 - 5): نماذج الأسطوانات لمقاومة شد الإنشطار بعد الفحص

جدول (5 - 3) نتائج مقاومة شد الإنشطار للأسطوانات المفحوصة

الخطة رقم	الرمز	نسبة الألياف %	نسبة الألياف البروبيلين %	نسبة ألياف الفولاذ %	w/c	مقاومة شد الإنشطار (MPa)
١	R	٠	٠	٠	٠,٣٨	٤,٨٧١
٢	P١	٠,٢٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	٤,٩٢٨
٣	P٢	٠,٧٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	٥,١٢١
٤	P٣	١,٢٥	١٠٠	٠	٠,٣٨	٥,٦٥٩
٥	S١	٠,٢٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	٥,٢٨٣
٦	S٢	٠,٧٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	٥,٩٤٢
٧	S٣	١,٢٥	٠	١٠٠	٠,٣٨	٧,٣٨٠
٨	P+S ١	٠,٢٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	٥,٥٦٤
٩	P+S ٢	٠,٧٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	٥,٩٤٢
١٠	P+S ٣	١,٢٥	٥٠	٥٠	٠,٣٨	٦,٣٦٦



الشكل (5 - 6) : مخطط قيم شد الإنشطار لنماذج الخرسانة حسب نسب الألياف المستخدمة



الشكل (5 - 7) : مخطط قيم مقاومة شد الإنشطار لكل النسب المعتمدة

٥,٥ مقاومة الإنثناء Flexural Strength

تعرف مقاومة الإنثناء بأنها القدرة على مقاومة الفشل تحت حمل الإنثناء (*Bending*). مقاومة الإنثناء المستحصلة من هذه الدراسة يتم عرضها على شكل منحنيات الحمل-الأود كمعدل لثلاثة نماذج للعتبات الخرسانية بأبعاد (mm 1000 × 200 × 150) والمعالجة بالماء لمدة (٢٨ يوم) والمفحوصة تحت نقطتي تحميل. المنحنيات التي سيتم عرضها تمثل قيم الحمل-الأود لـ (١٣) مجموعة من العتبات والمقارنة بها مع النتائج المستحصلة من البرنامج الحاسوبي (*ANSYS+Civil FEM*) مع عرض لقيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة وللأحمال (الحمل عند الشق الأول، حمل مقارنة مقداره ٥٠ kN و الحمل الأقصى) المحددة بالاعتماد على منحنيات الحمل-الأود المستخرجة من البرنامج. بصورة عامة ولجميع العتبات في مجاميع الدراسة الحالية يُلاحظ إنه في المراحل المبكرة من التحميل تبدأ التشققات الأولية بالظهور في منطقة الشد في منطقة العزم الثابت الواقعة بين نقطتي التحميل ومع الوقت وزيادة التحميل تبدأ التشققات بالإتجاه إلى أعلى المقطع وتُصبح أكثر إتساعاً إذ يتحول موقع محور الحيود إلى منطقة إنضغاط الخرسانة.

♦ نلاحظ من خلال نتائج الدراسة أن تأثير وجود ألياف البولي بروبيلين على مقاومة الإنثناء يكون طفيفاً ويكاد يكون معدماً حيث أن زيادة مقدار الحمل عند الشق الأول طفيفة وينسب (٠,٨، ١٠، و ٦٠%) عن الخرسانة المرجعية وللنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥ و ١,٢٥%) على التوالي. وعلى الرغم من زيادة قيمة الأود الذي تفشل عنده العتبة إلا أن الحمل الأقصى يبقى

ثابتاً تقريباً، ولا تؤثر إضافة ألياف البولي بروبيلين إلى الخرسانة عالية المقاومة على نشوء التشققات و إنتشارها وهذا يُعزى إلى معامل المرونة القليل لهذا النوع من الألياف ، ونظراً لأن تأثير هذا النوع من الألياف قليل في الزيادة من مقاومة شد الإنشطار للأسطوانات كما تم ذكره سابقاً فهي لا تؤثر إيجاباً على مقاومة الإنشاء .

♦ ويتضح من خلال النتائج المستحصلة للدراسة الحالية أن إضافة ألياف الحديد لها تأثير كبير على زيادة مقدار الحمل عند الشق الأول وكذلك الحمل الأقصى للعتبات وهذه التحسينات تكون أكثر وضوحاً بزيادة النسبة الحجمية لهذه الألياف وهذه نتيجة متوقعة لألياف الحديد نظراً لتأثيرها الواضح على مقاومة شد الإنشطار للأسطوانات وسبب هذه الآثار الإيجابية هي معامل المرونة العالي لهذا النوع من الألياف المعقوفة وهي تربط بشكل جيد مكونات الخرسانة وتجعلها أكثر تماسكاً بالإضافة إلى جعل العتبات أكثر مطيلية ، أما نسب الزيادة في الحمل عند الشق الأول على الخرسانة المرجعية فهي (٢٢ ، ٢٩ ، ٥٦,٥ %) للنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥ و ١,٢٥ %) على التوالي وكانت الزيادة في الحمل الأقصى هي (١٨ ، ٢٦,٢ و ٣٧,٣ %) لنفس النسب أعلاه . أما ظهور التشققات في العتبات الحاوية على ألياف الحديد فهي أقل مقارنة بالعتبات المرجعية وبزيادة النسبة الحجمية لهذه الألياف يقل عدد الشقوق المتكونة لقلة وجود مناطق ضعف في الخرسانة وينحصر ظهورها في منطقة العزم الثابت للعتبات وعلى الرغم من ظهور عدد من الشقوق الدقيقة إلا أن شق واحد أو اثنين منها تبدأ بالإتساع وزيادة محددة في العرض ، وهذا بسبب خاصية الربط للألياف ومنعها للشقوق من النمو والتطور (*Crack width reduction*) وتستمر العتبات بتحمل المزيد من الأحمال قبل الفشل حتى بعد ظهور التشققات وإتساعها.

أما نزول المنحني بعد الحمل الأقصى الواضح في الشكلين (٥-١٨) و (٥-٢٠) فسيبه هو تعرض الألياف الموجودة في الخرسانة إلى قوة سحب كبيرة أقصاها هي عند الحمل الأقصى للعتبة وبعد إنفصالها وفشلها في تحمل المزيد من الأحمال تبقى الخرسانة (ذات المقاومة الضعيفة للشد مقارنةً بالألياف) وحديد التسليح يشكلان المقاومة ضد الأحمال المسلطة وبذلك يقل مقدار الحمل الذي تتحمله العتبة . التأثير السلبي الوحيد لإضافة الياف الحديد عند النسب العالية هو نقصان قيمة الأود التي تفشل عندها العتبات مقارنة بالعتبات المرجعية ولكن بفارق تحمل كبير .

♦ أما إضافة الألياف المدمجة فلها أيضاً تحسينات في خصائص الخرسانة فهي تُرِيد بصورة واضحة من قيمة الحمل عند الشق الأول مقارنة بالعتبات المرجعية وتزداد قيمة الفرق بزيادة النسبة الحجمية ونسب الزيادة في الحمل عند الشق الأول هي (٢٢,٨ ، ٢٨,٧ و ٤٦ %)

لنسب الحجمية (٠,٢٥ و ٠,٧٥ و ١,٢٥%) على التوالي ، ونسب الزيادة في الحمل الأقصى هي (١٤,٢ ، ١٧ و ٢٧%) للنسب أعلاه . أما بالنسبة للتشققات في العتبات فهي أقل من تلك التي في العتبات المرجعية وكذلك ينحصر ظهورها وإتساعها في منطقة العزم الثابت من العتبات وتستمر العتبة في تحمل المزيد من الأحمال قبل الفشل على الرغم من وجود التشققات الكبيرة فيها إذ أنّ وجود النظام الذي يجمع النوعين من الألياف يجعل من الياف البولي بروبيلين تُحيط بألياف الحديد وبذلك تقلل من تعرضها لقوة السحب.

♦ نتائج منحني الحمل-الأود للعتبات الخرسانية بطبقتين تظهر أن المجموعة $HY1$ (الحاوية على ألياف البولي بروبيلين بنسبة ١,٢٥% في منطقة الشد فقط) تتراجع في أدائها عن العتبات المرجعية والمجموعة $P3$ (الحاوية على الياف البولي بروبيلين بنسبة ١,٢٥% لكامل عمق المقطع) في الحمل عند الشق الأول والحمل الأقصى .

أما المجموعة $HY2$ (الحاوية على ألياف الحديد بنسبة ١,٢٥% في منطقة الشد فقط) فهي ذات أداء جيد مقارنة بالخرسانة المرجعية وبنسبة زيادة في حمل الشق الأول مقدارها (٤٩,٤%) والحمل الأقصى بنسبة (١٥,٣%) ، أما عند مقارنة أدائها بأداء المجموعة $S3$ (الحاوية على الياف الحديد بنسبة ١,٢٥% لكامل عمق المقطع) فنلاحظ تراجع في أداءها بنسبة (٤,٥%) في الحمل عند الشق الأول و بنسبة (١٦%) في التحمل الأقصى .

والمجموعة الأخيرة $HY3$ (الحاوية على ألياف الحديد-بولي بروبيلين بنسبة حجمية ١,٢٥% في منطقة الشد فقط) وبمقارنة أدائها بأداء العتبات المرجعية يظهر أنّ أدائها كان جيداً وبنسبة زيادة مقدارها (٣٣,٨%) عن حمل الشق الأول وبمقدار حمل أقصى متقارب ، أما عند مقارنتها بما يقابلها من العتبات الحاوية على الألياف بنفس النسبة لكامل مقطع العتبات يظهر أدائها المتناقص وبنقصان مقداره (٨,٣%) عن الحمل في الشق الأول و (٢٢,٦%) عن الحمل الأقصى .

ويُلاحظ من خلال النتائج أيضاً بالنسبة للخرسانة الحاوية على الألياف الحديدية أو الألياف المدمجة ، فإنّ وضع الألياف في منطقة الشد فقط لا يُقلل بصورة كبيرة من مقاومة الخرسانة للإنثناء مقارنةً بما يُقابلها من عتبات حاوية على الألياف ذاتها لكامل عمق المقطع . لذلك يُمكن التوصية باستخدام الألياف في منطقة الشد فقط للعتبات إذ سيتم استخدام ما يُقارب نصف كمية الألياف ولهذا (من الناحية الاقتصادية) له تأثير على كلفة إنتاج العتبات إذ تُعد الألياف من المواد ذات الكلفة الأعلى نسبة الى باقي مكونات الخرسانة الليفية .

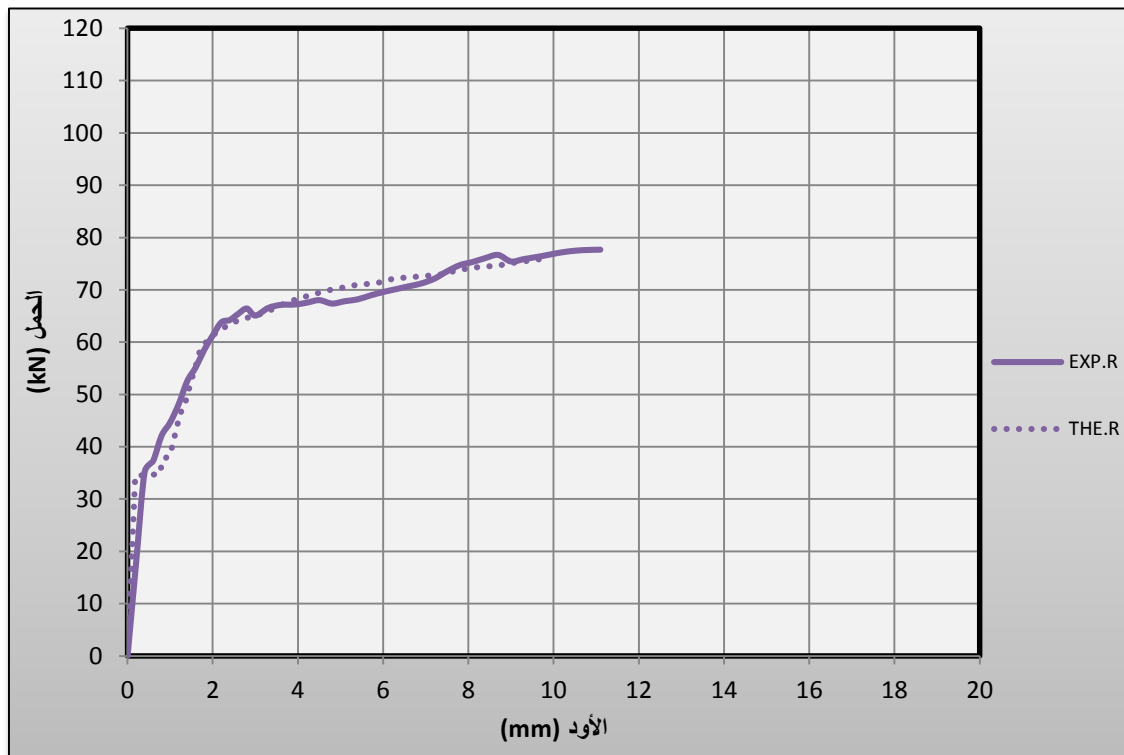
ومن الملاحظ أن الترابط كان تاماً بين الطبقتين العليا والسفلى إذ إنّ الفرق في الوقت بين صب الطبقتين كان أقل بكثير من زمن التجمد الابتدائي للسمنت في الطبقة الأولى ، وهذا الترابط

يتضح من خلال التشققات إذ تبدو العتبة وكأنها بطبقة واحدة ومن الجدير بالذكر أن حديد التسليح من خلال كميته وخصائص المقاومة التي يمتلكها وكيفية التسليح به يؤثر على عرض التشققات أكثر من الخرسانة .

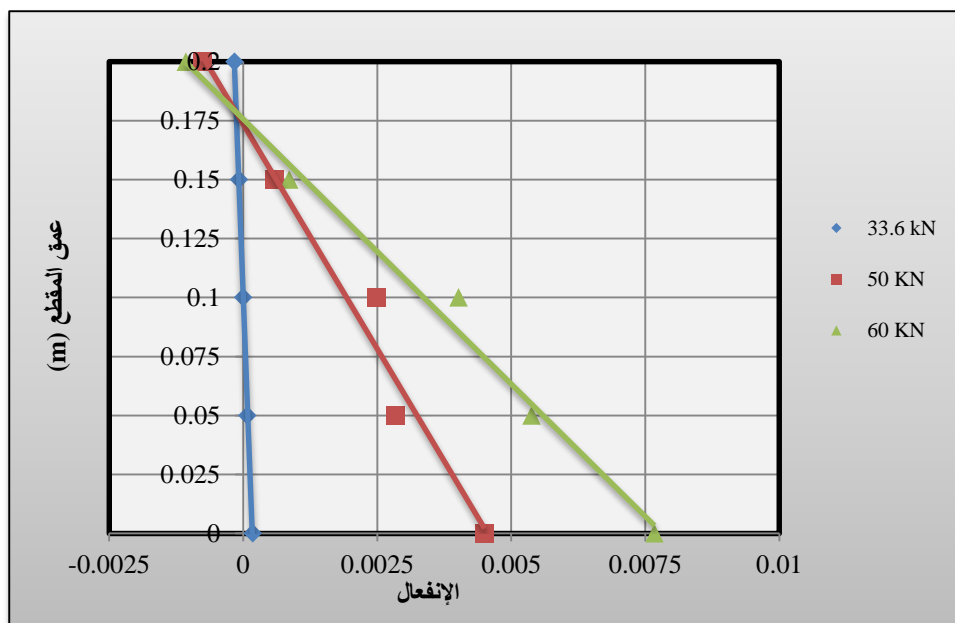
ويرجع الاختلاف في الأداء بين العتبات الحاوية على الألياف في منطقة الشد فقط وتلك الحاوية على الألياف لكامل عمق العتبة إلى إختلاف مقاومة الخرسانة للإنضغاط والشد في منطقة الأنضغاط بين العتبات بطبقة واحدة والعتبات بطبقتين إذ تم ذكره سابقا بزيادة التحميل يبدأ محور الحيود بالصعود إلى منطقة الإنضغاط (ذات مقاومة الشد القليلة) وبذلك يتراجع أداء العتبات بطبقتين ، و السبب الآخر هو أن الفشل بعد خضوع حديد التسليح هو فشل إنضغاط في الخرسانة في الجزء العلوي من العتبة ونظراً لأن مقاومة الإنضغاط هذه أقل من العتبات الحاوية على الألياف لكامل المقطع يتناقص أداء العتبات . ومما تجدر الإشارة إليه أن هذا الفشل يحدث قبل الإجهاد الأقصى للحديد.

مقارنة منحنيات الحمل-الأود للعتبات الخرسانية المسلحة والمعززة بالألياف لمختلف النسب الحجمية ولجميع أنواع الألياف المستخدمة (الناجمة من التجارب العملية مع تلك الناتجة من التحليل النظري) موضحة في الأشكال التالية . إذ يُلاحظ تقارب مقبول بين النتائج المذكورة.

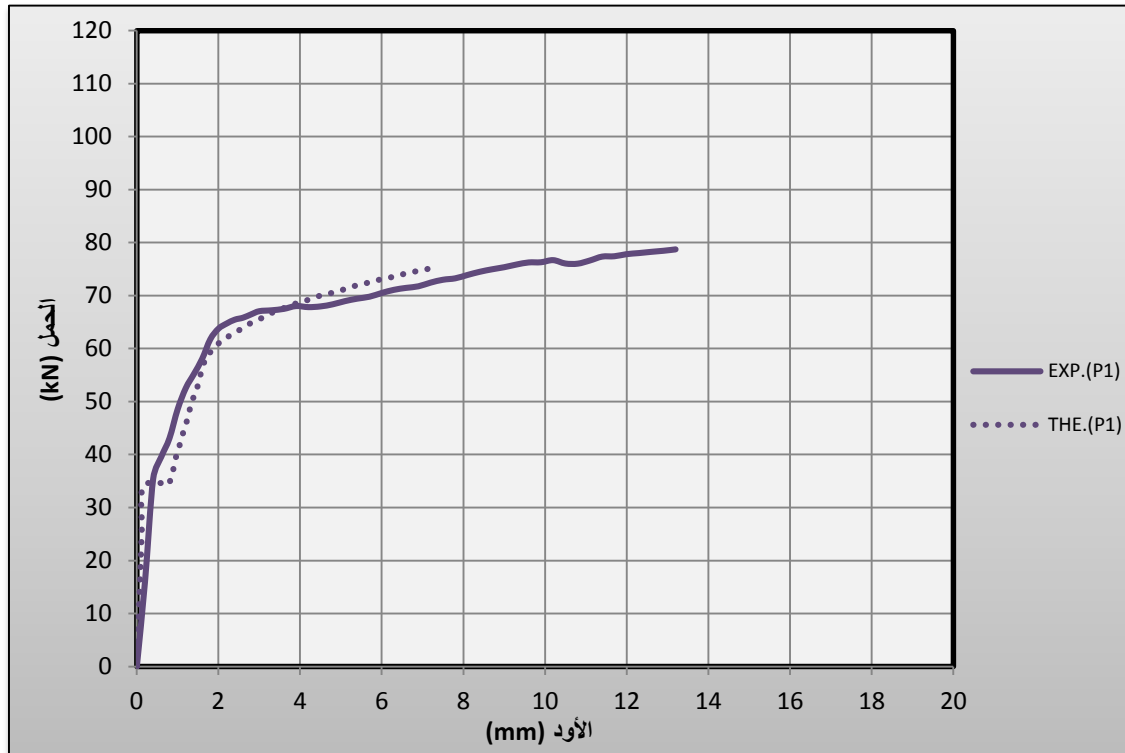
توزيع الإنفعال على عمق العتبة الخرسانية في المقطع العرضي في منتصف فضاء العتبة الخرسانية بالإعتماد على نتائج التحليل النظري لهذه العتبات الخرسانية تم إستخراجها ورسمها لكفة الخلطات الخرسانية المفحوصة (وهي موضحة في المخططات التالية) وذلك عند ثلاثة مستويات من التحميل ؛ قبل حدوث الشق الأول بقليل ، في مرحلة التشققات اللاحقة وعند مرحلة خضوع حديد التسليح الرئيسي . إذ يتضح من خلال هذه المخططات أن إنفعال الخرسانة يقل بوجود الألياف وخاصة في حالة وجود الألياف الحديدية في الخرسانة ، وكذلك بزيادة التحميل يبدأ محور الحيود بالصعود إلى الأعلى (منطقة الإنضغاط) .



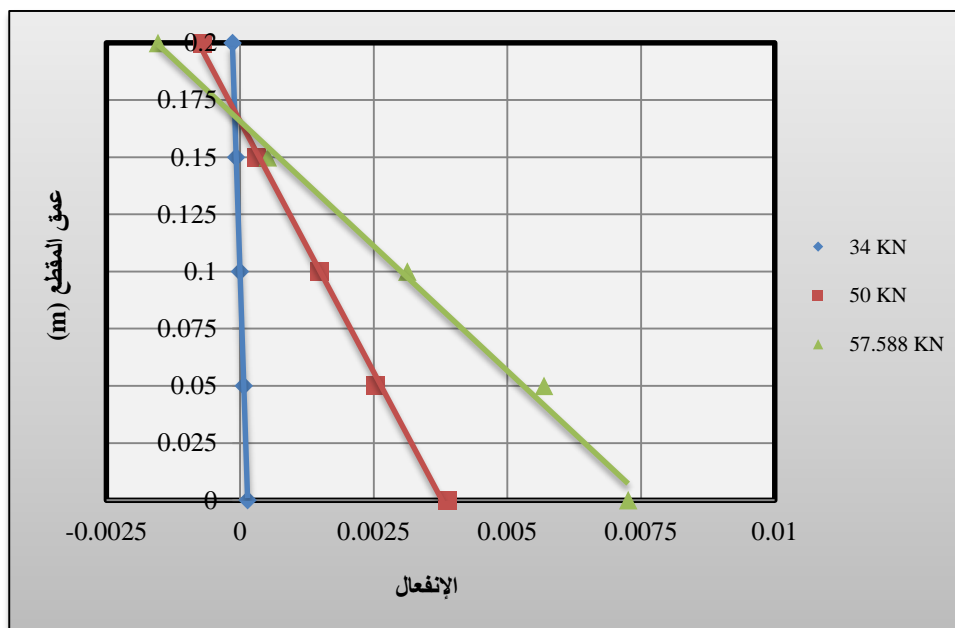
الشكل (5 - 8): منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة R



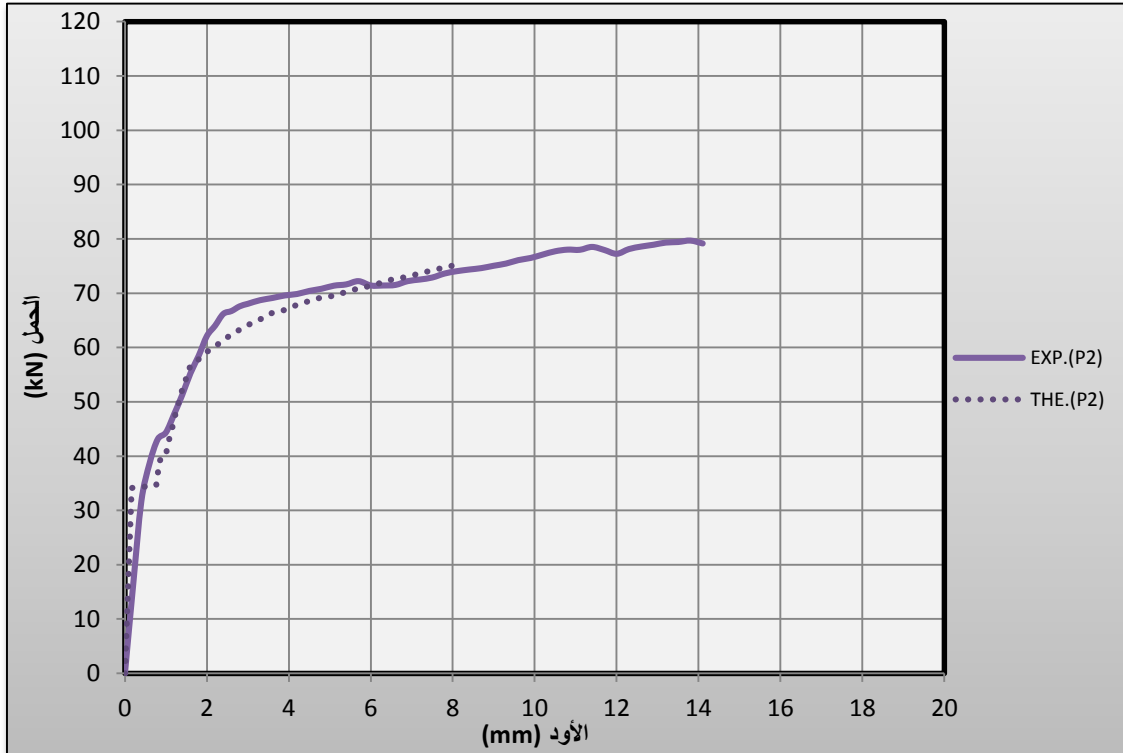
الشكل (5 - 9): قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة R



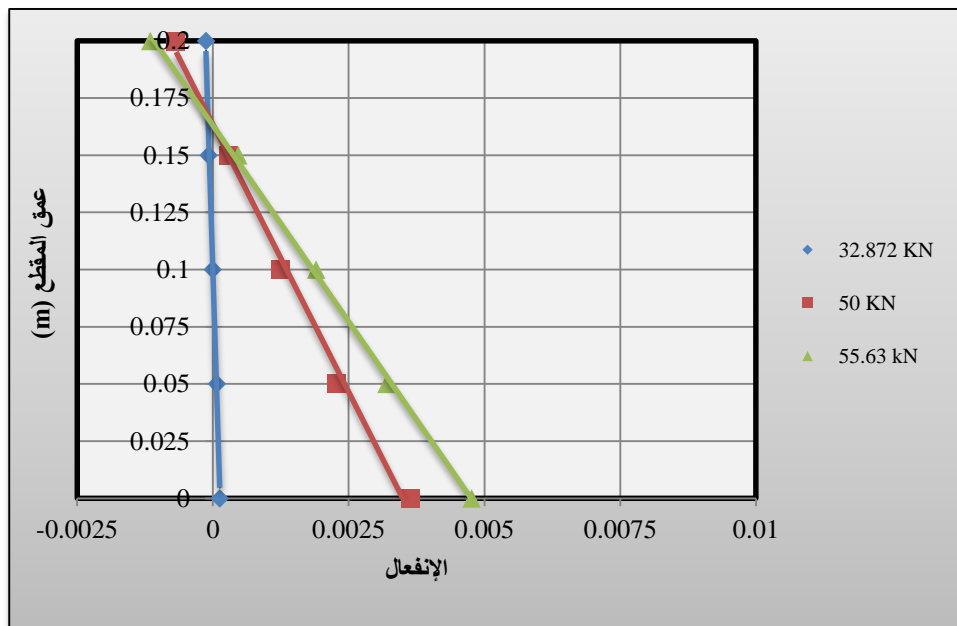
الشكل (5 - 10) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة P 1



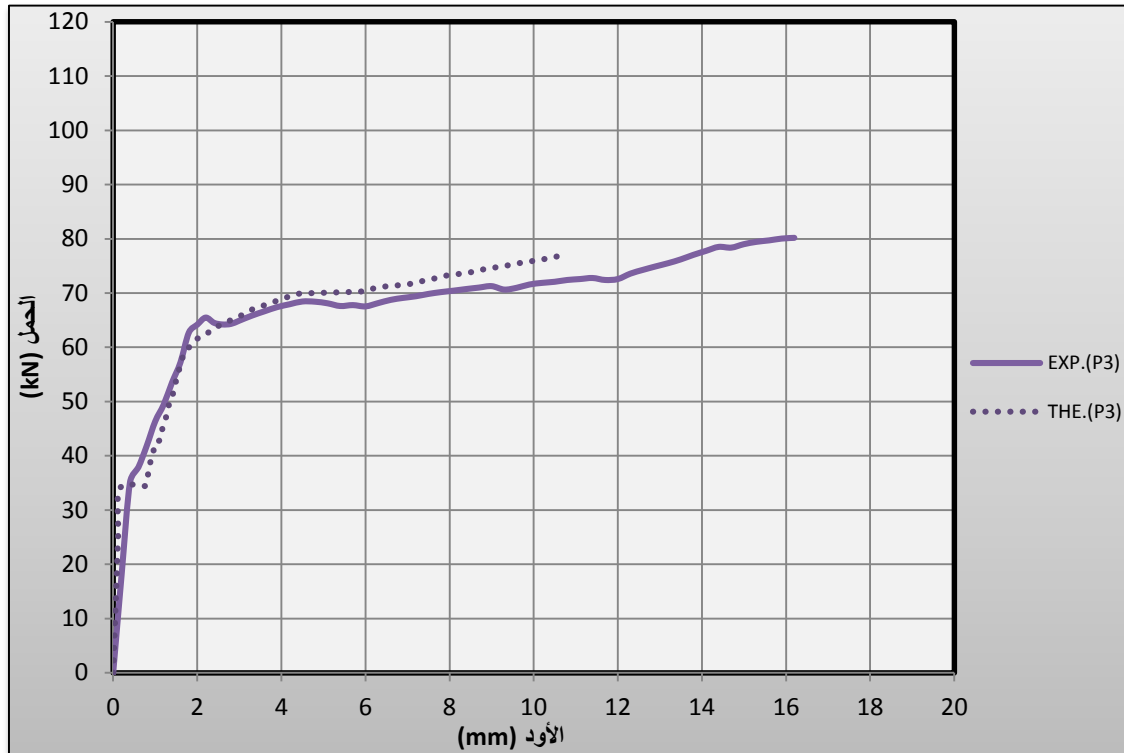
الشكل (5 - 11) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة P 1



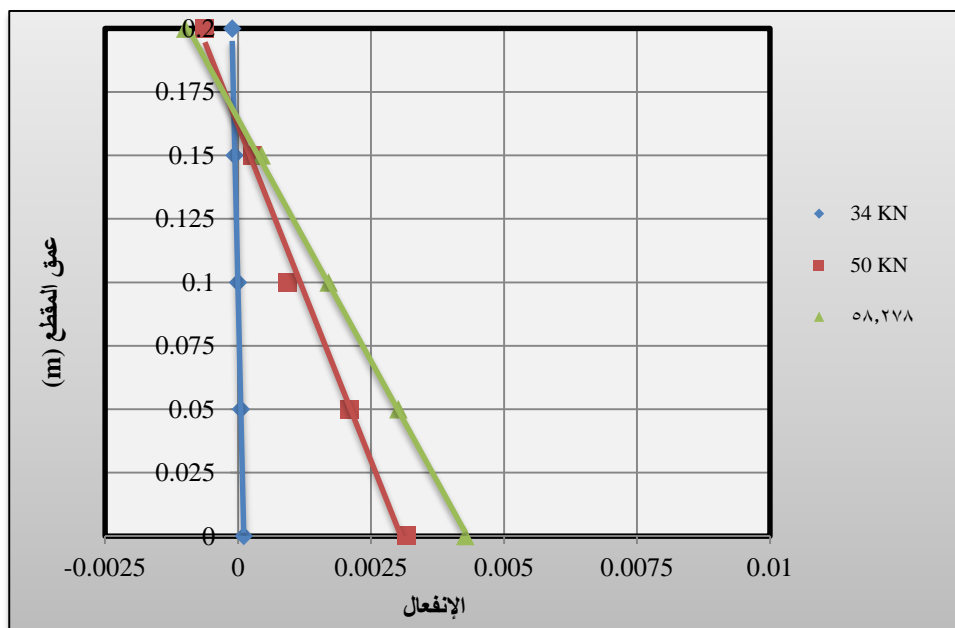
الشكل (5 - 12) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة P ٢



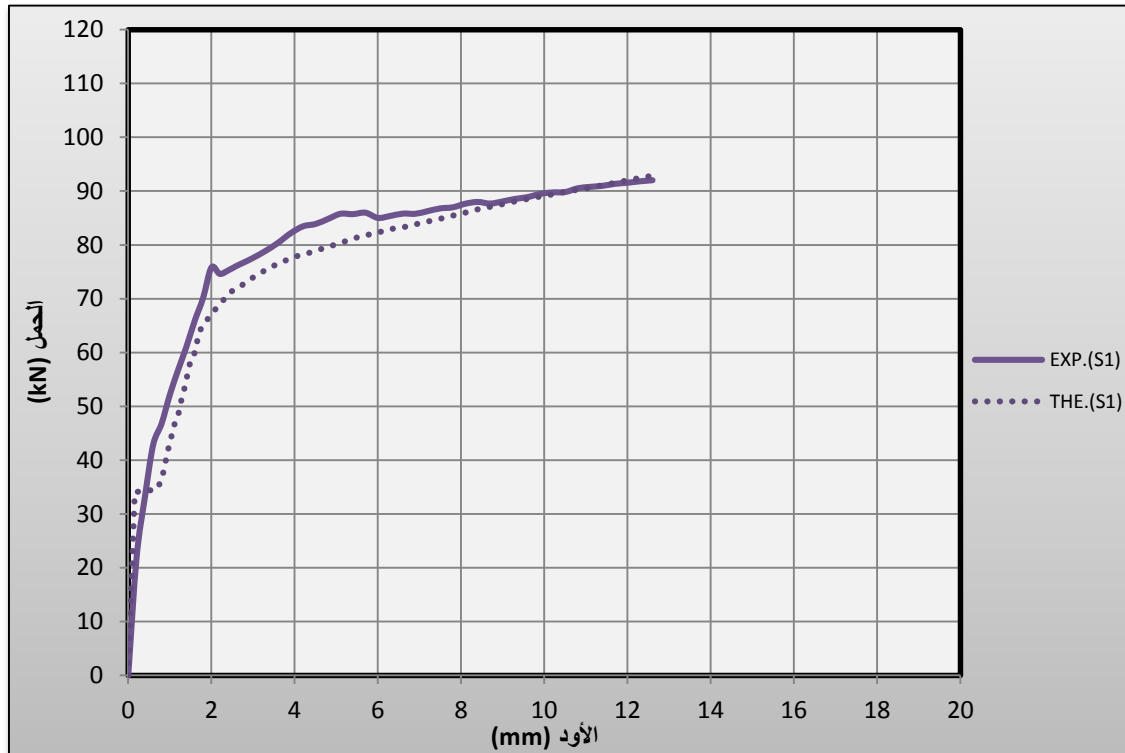
الشكل (5 - 13) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة P ٢



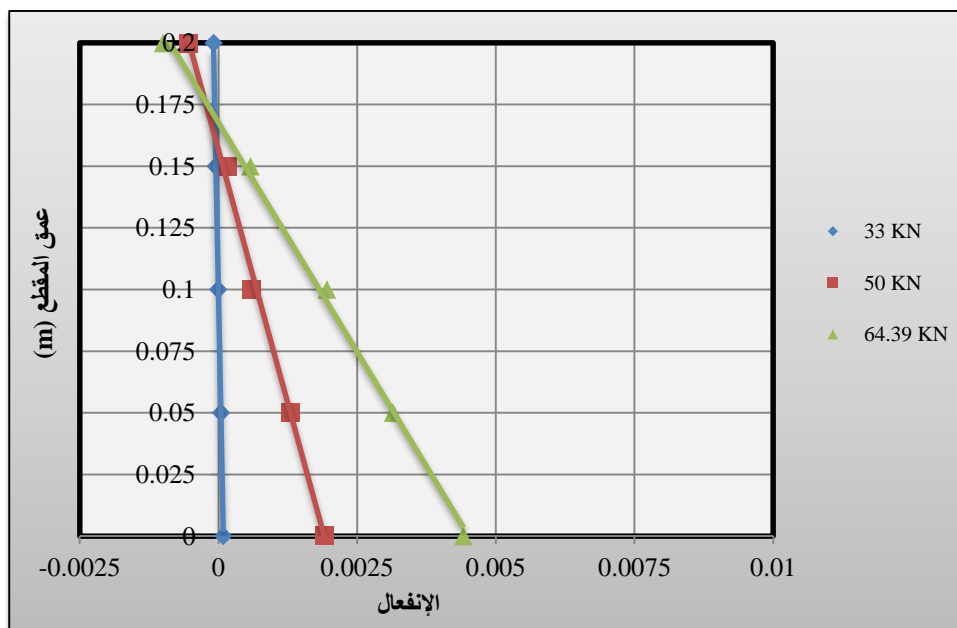
الشكل (5 - 14) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة P ٣



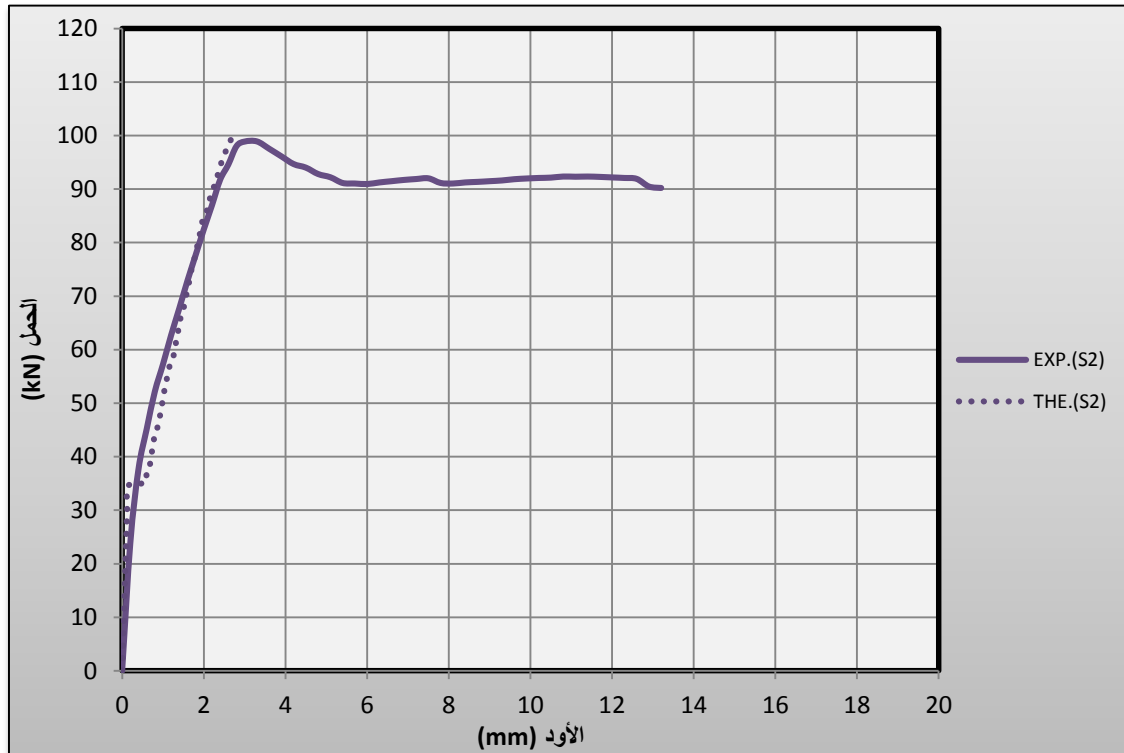
الشكل (5 - 15) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة P ٣



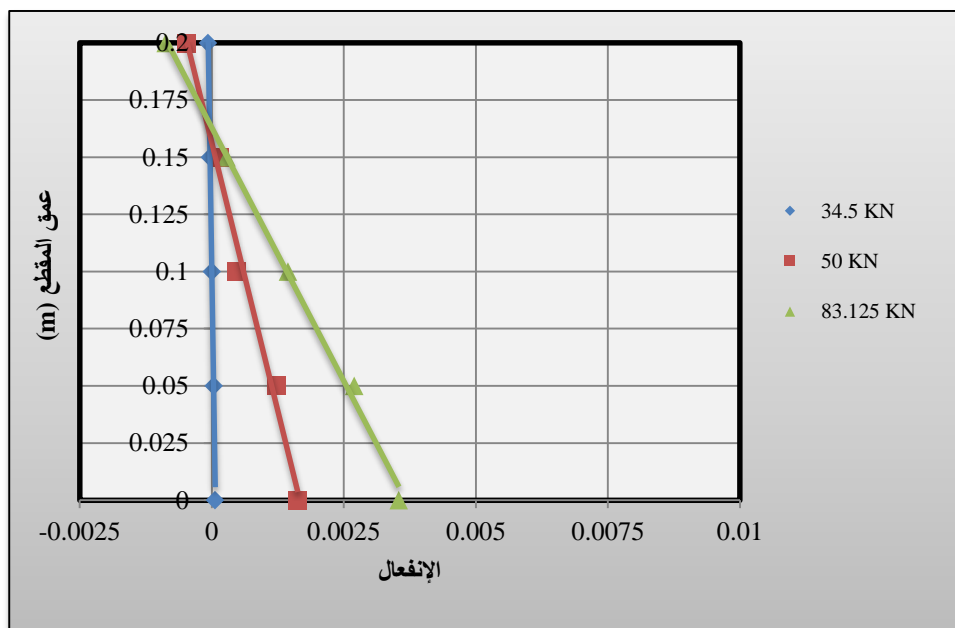
الشكل (5 - 16) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة S 1



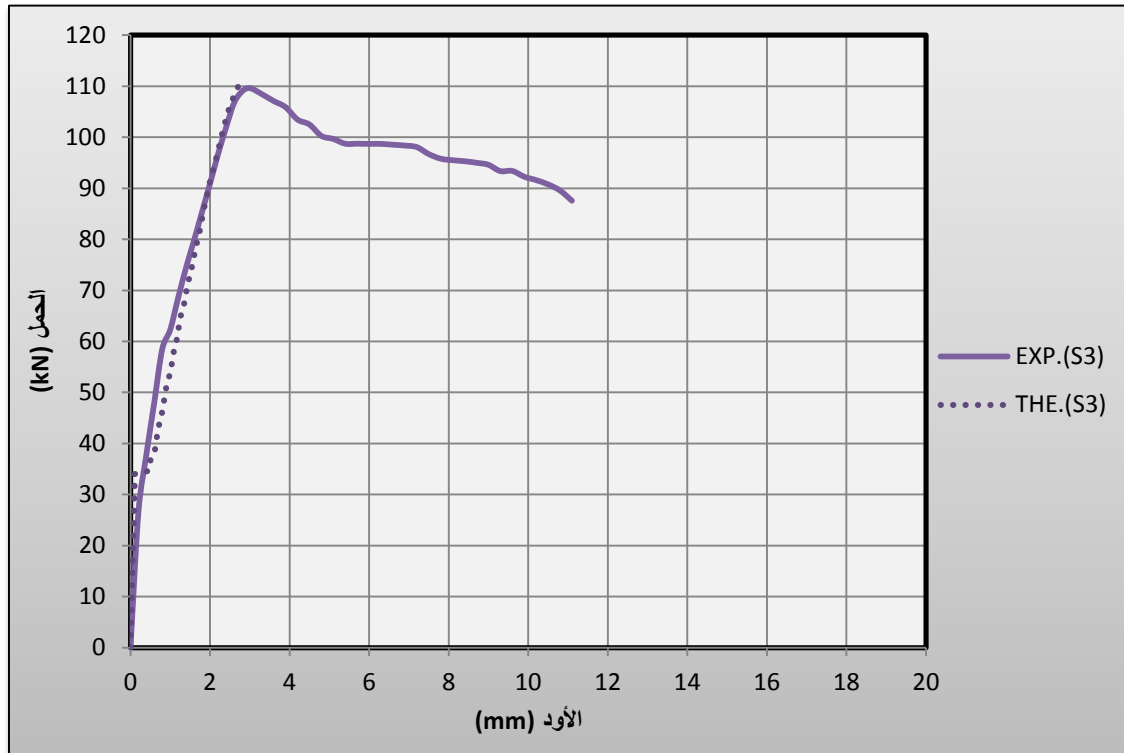
الشكل (5 - 17) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة S 1



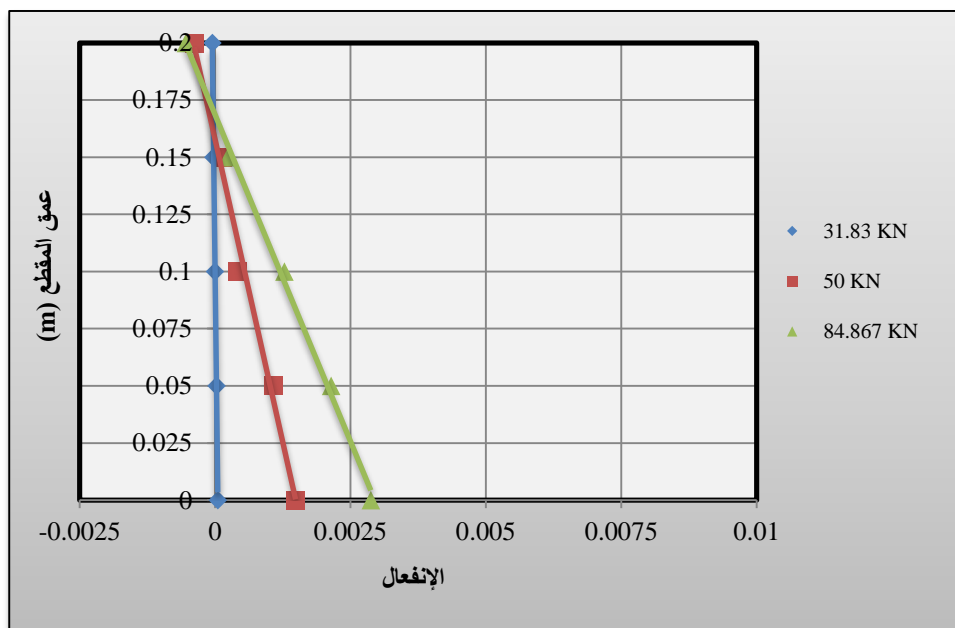
الشكل (5 - 18) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة S ٢



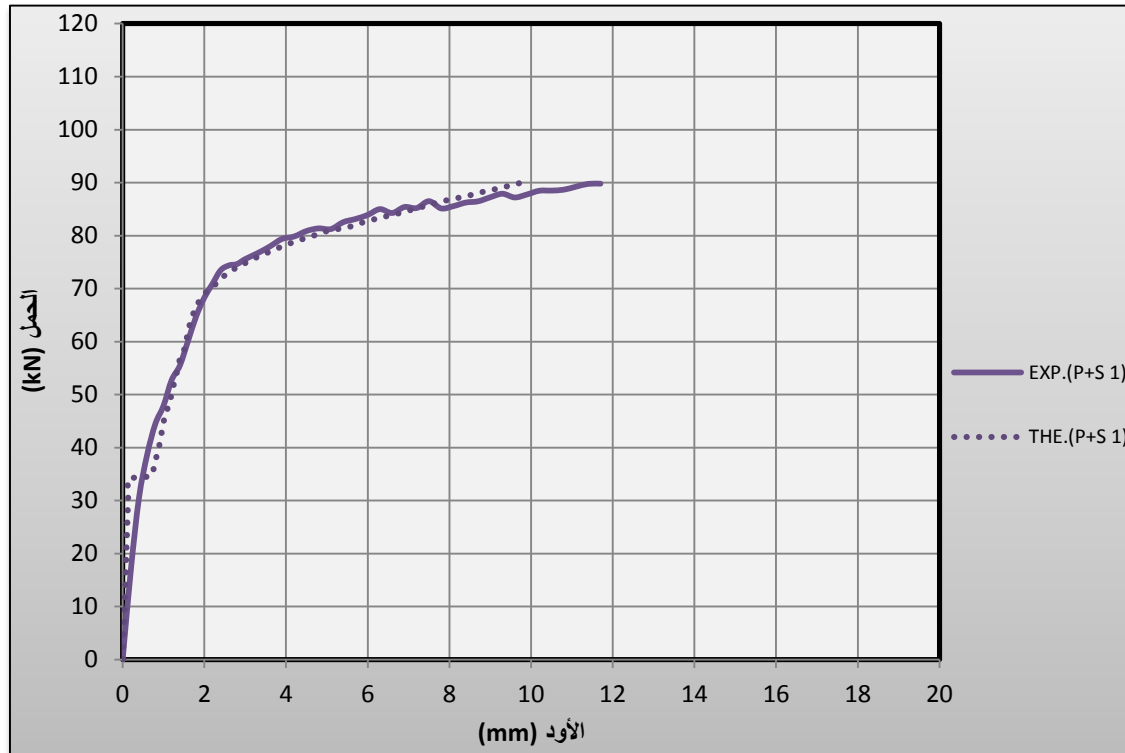
الشكل (5 - 19) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة S ٢



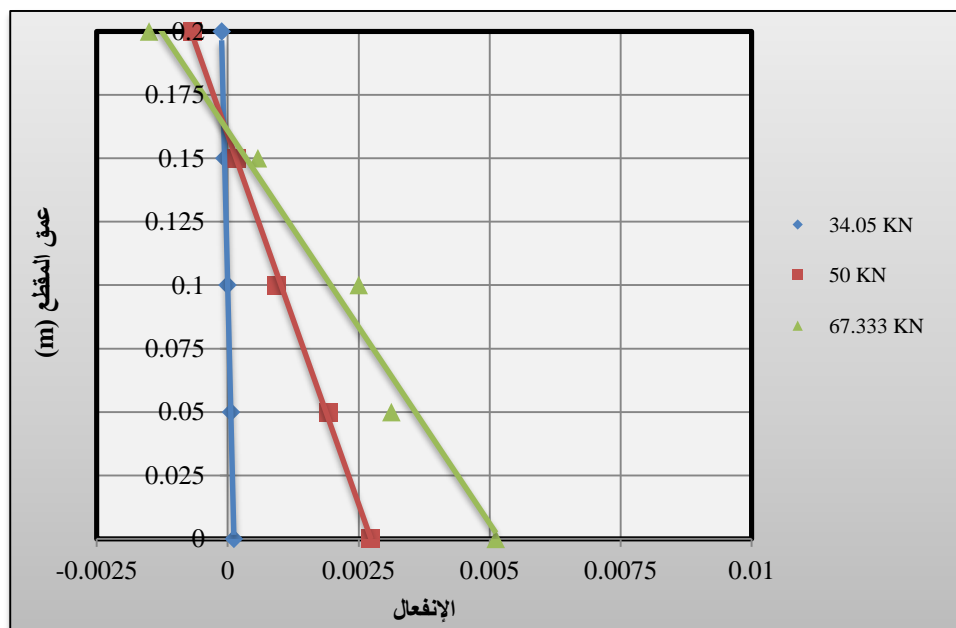
الشكل (5 - 20) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة S ٣



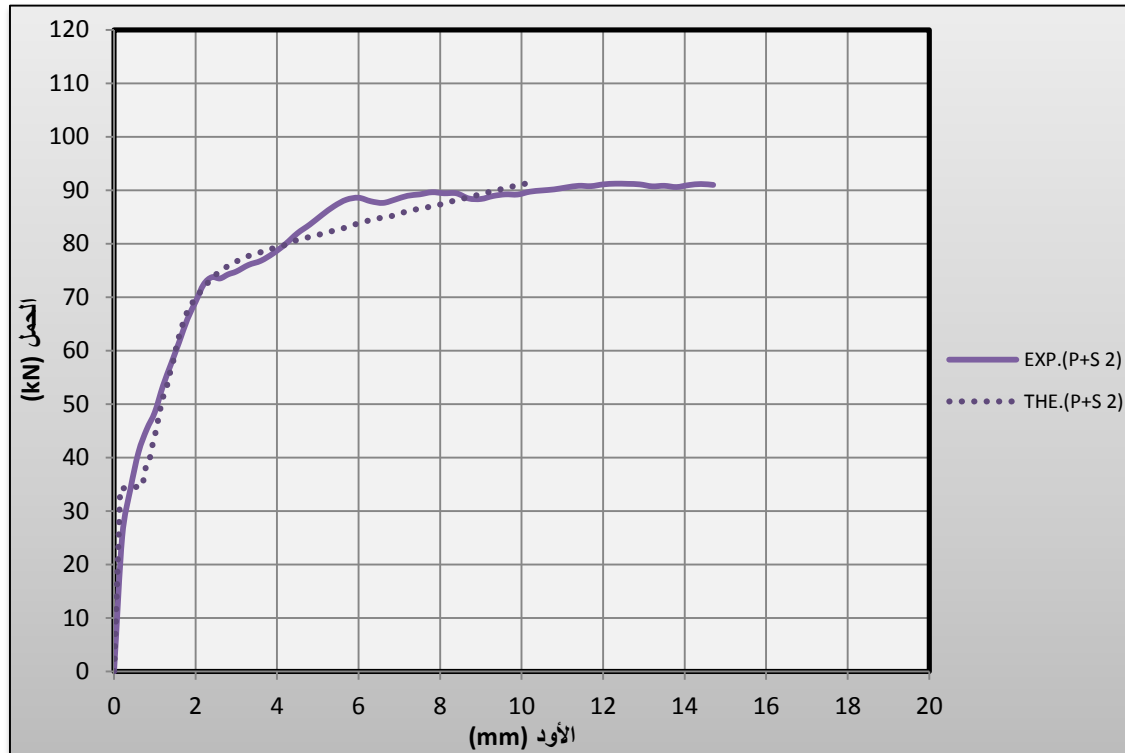
الشكل (5 - 21) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة S ٣



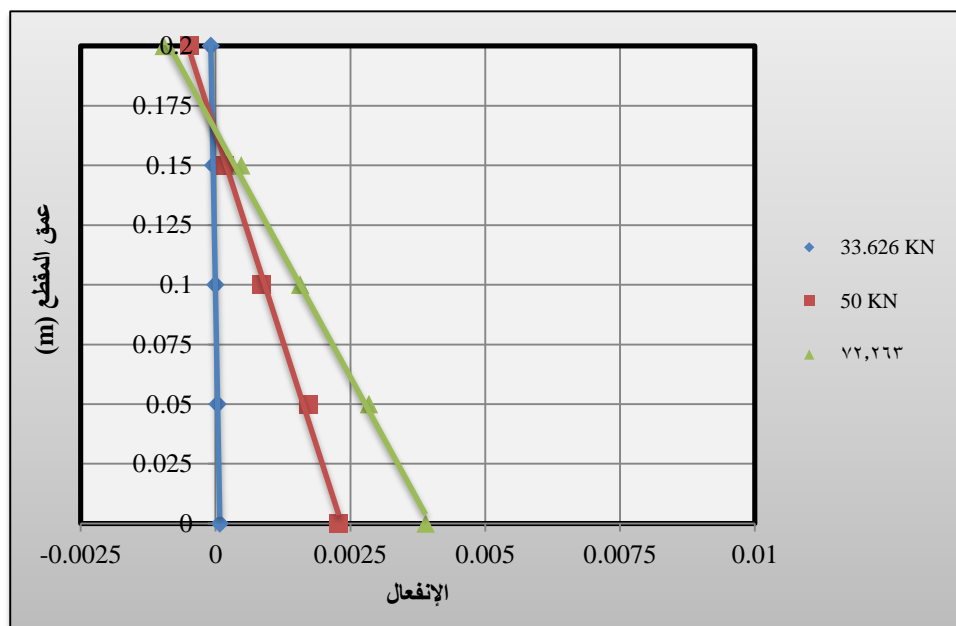
الشكل (5 - 22) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة P+S 1



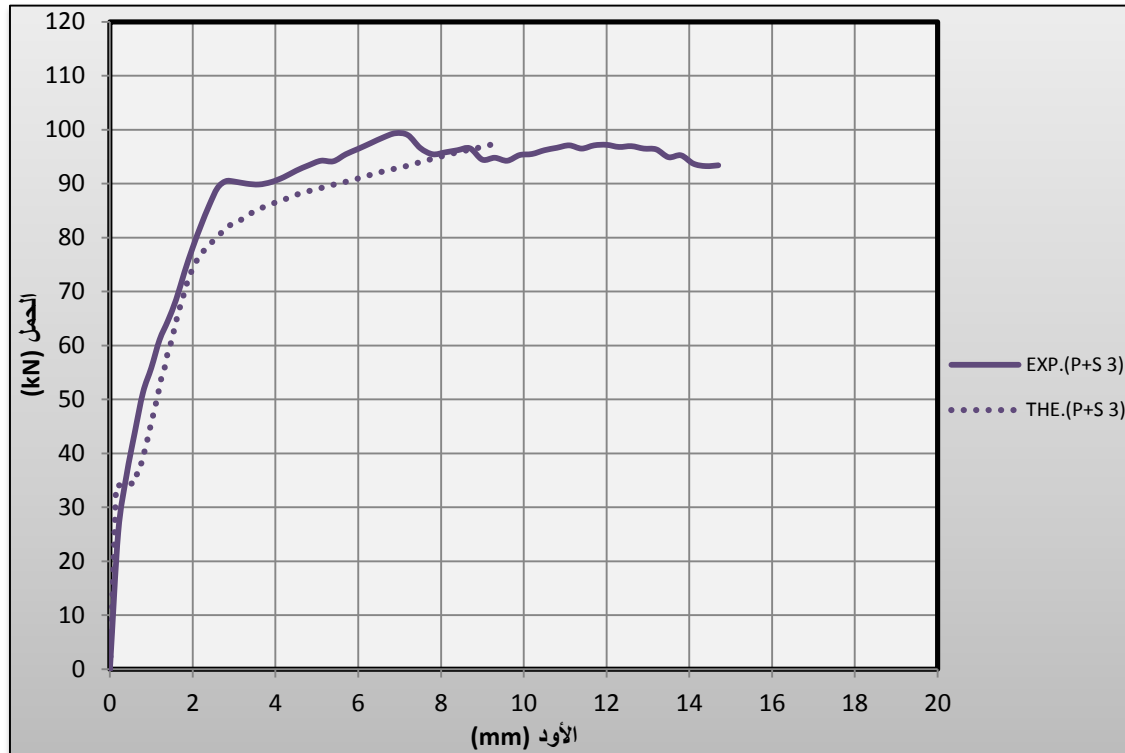
الشكل (5 - 23) : قيم الإنتقال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة P+S 1



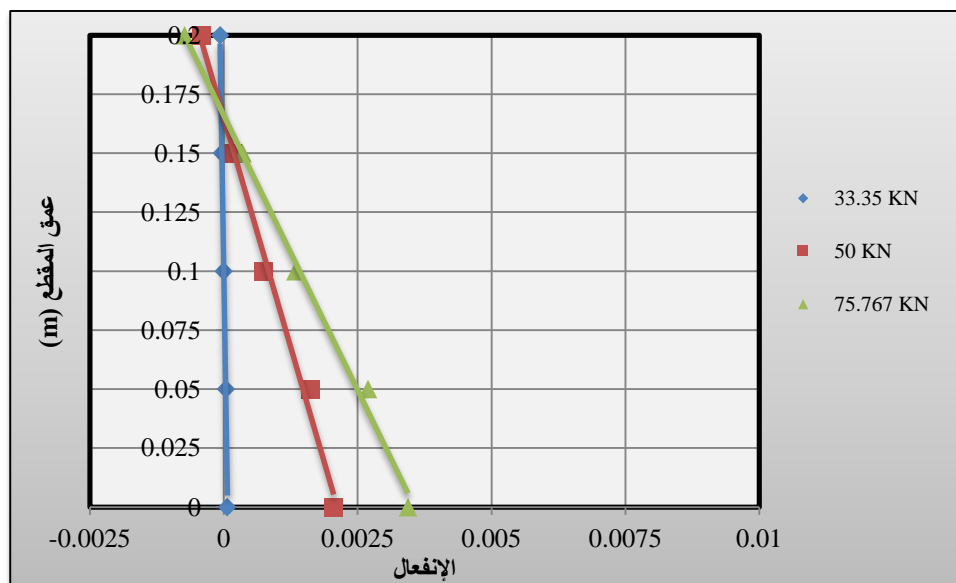
الشكل (5 - 24) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة ٢ P+S



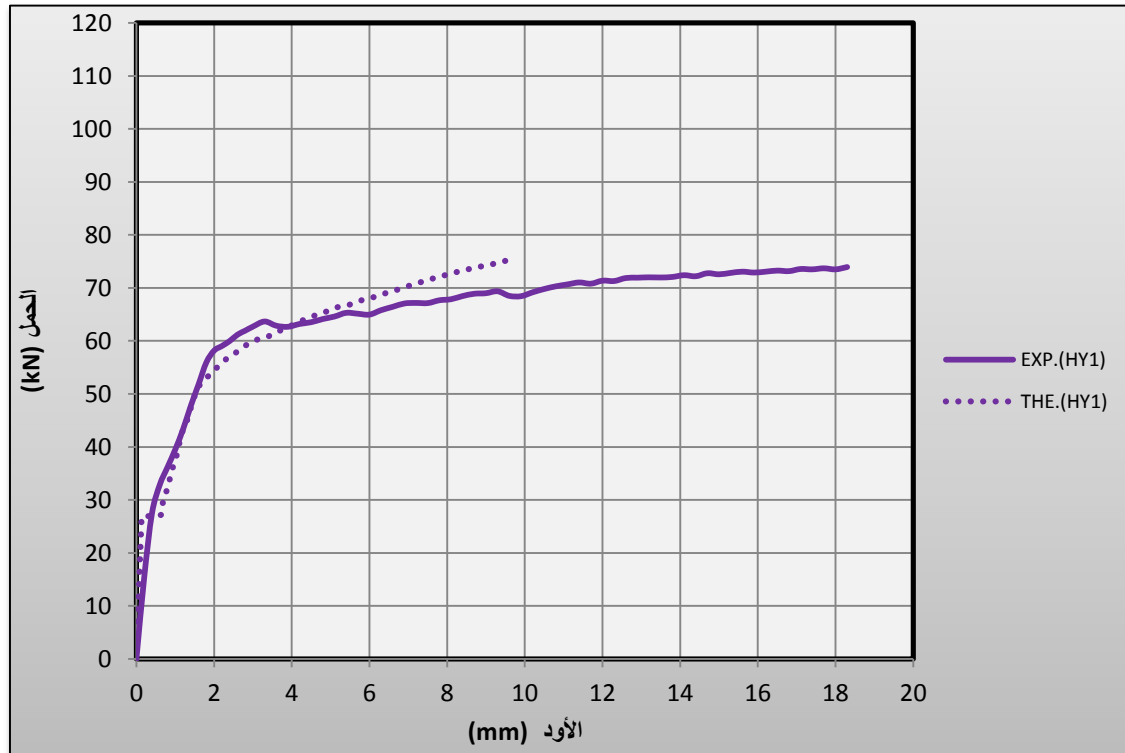
الشكل (5 - 25) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة ٢ P+S



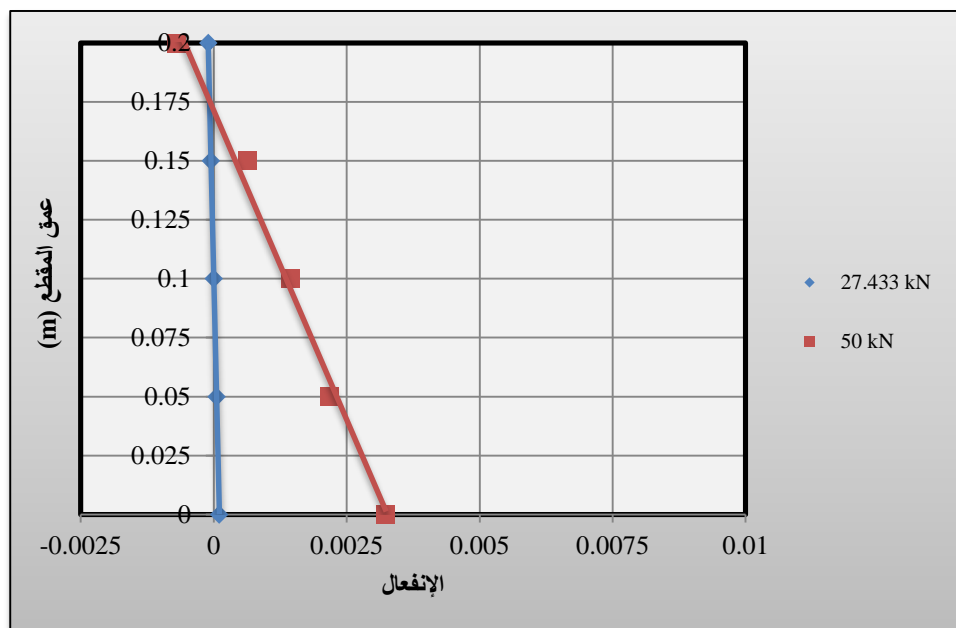
الشكل (5 - 26) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة ٣ P+S



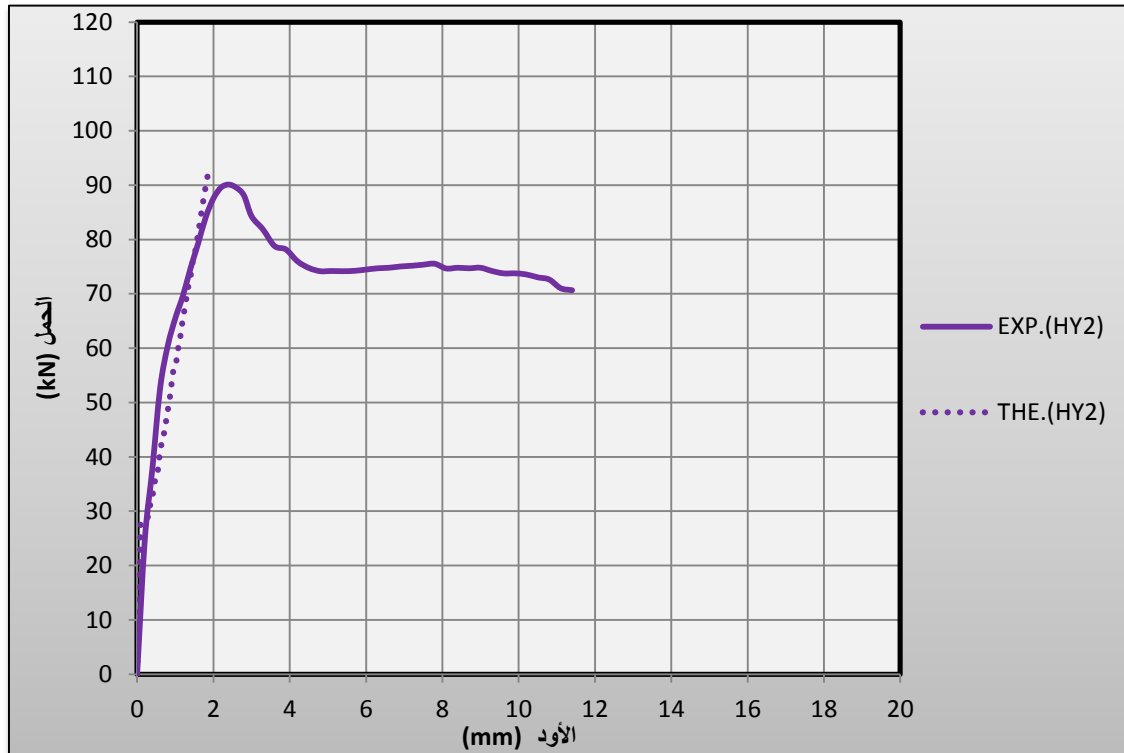
الشكل (5 - 27) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة ٣ P+S



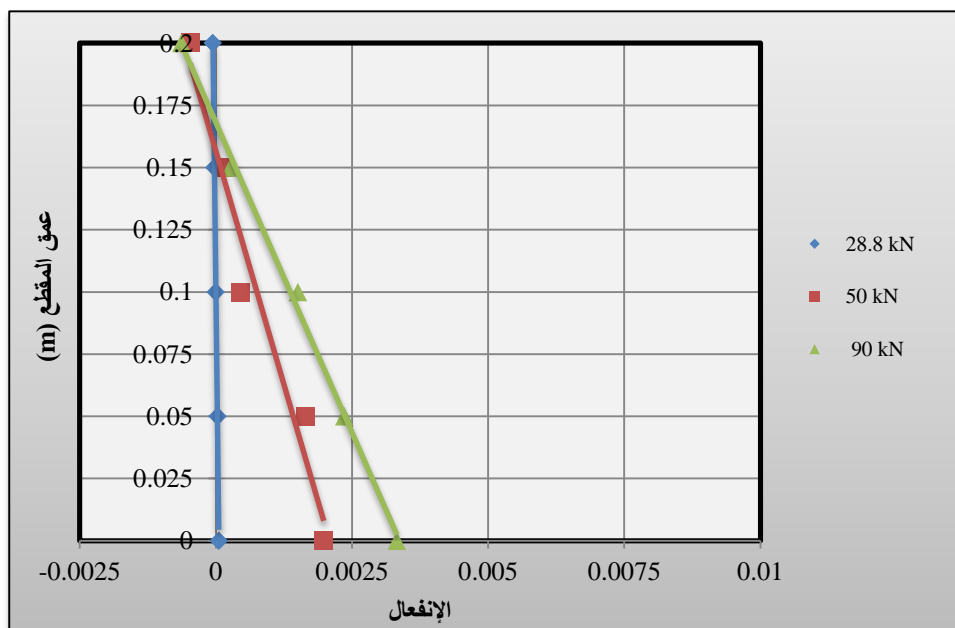
الشكل (5 - 28) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة HY ١



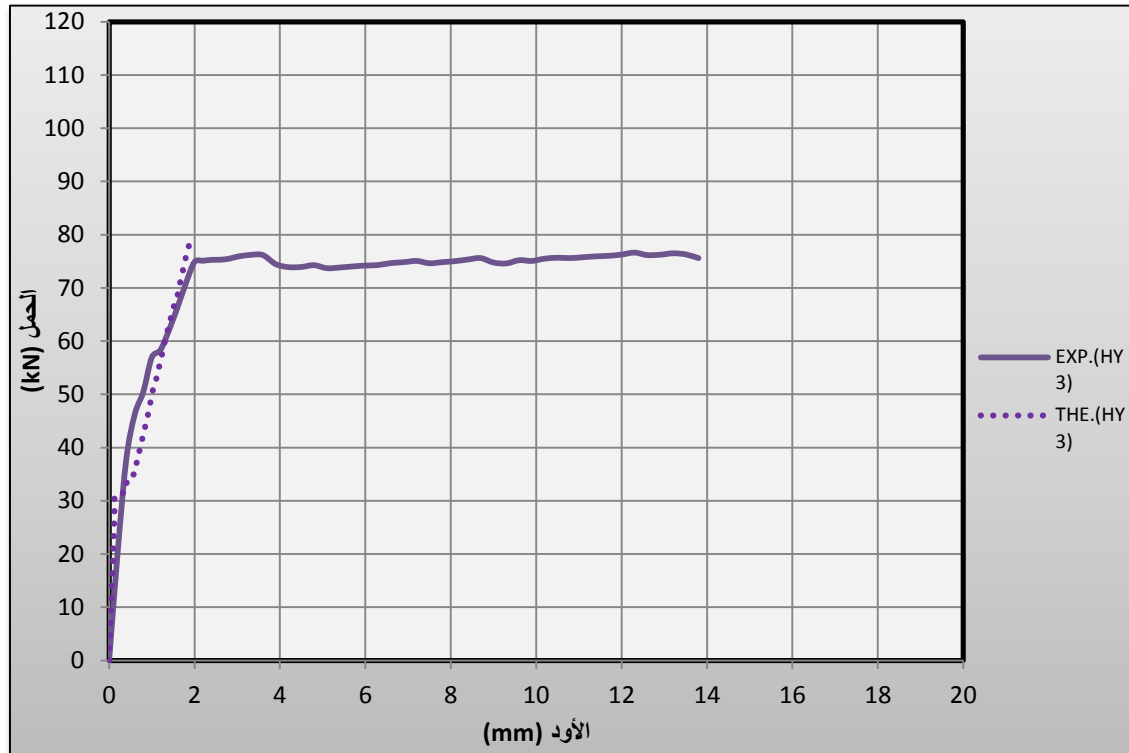
الشكل (5 - 29) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة HY ١



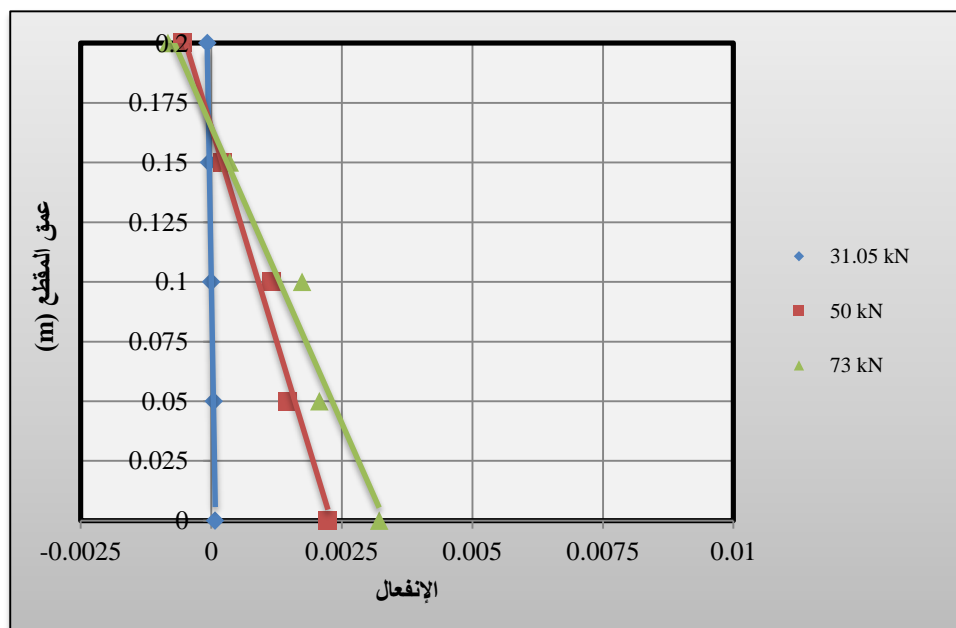
الشكل (5 - 30) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة HY ٢



الشكل (5 - 31) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة HY ٢



الشكل (5 - 32) : منحنى الحمل-الأود للبرنامج العملي والنظري للمجموعة HY 3



الشكل (5 - 33) : قيم الإنفعال على عمق مقطع العتبة العرضي للمجموعة HY 3

جدول (4 - 5) قيم الحمل عند الشق الأول والحمل الأقصى

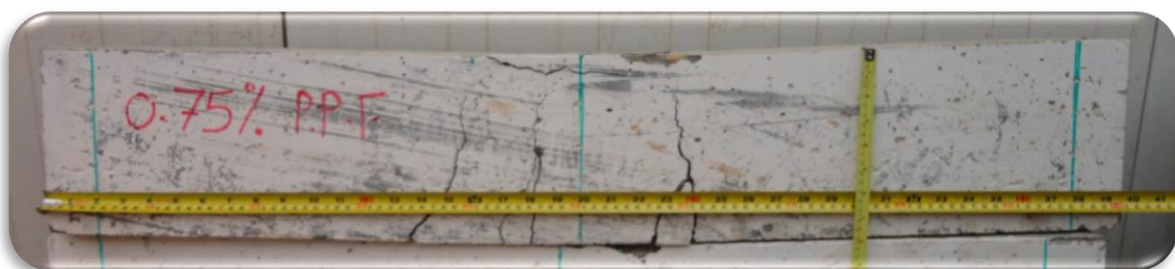
رقم الخلطة	رمز المجموعة	نسبة الألياف %	نسبة الياف البولي بروبيلين %	نسبة ألياف الفولاذ %	الحمل عند الشق الأول (KN)	الحمل الأقصى (KN)
١	R	٠	٠	٠	٣٥,١٥	٧٧,٦٥
٢	P١	٠,٢٥	١٠٠	٠	٣٥,٤٣٣	٧٨,٧٣٣
٣	P٢	٠,٧٥	١٠٠	٠	٣٨,٦٣٣	٧٩,٤
٤	P٣	١,٢٥	١٠٠	٠	٣٧,١٥	٧٩,٧٣٣
٥	S١	٠,٢٥	٠	١٠٠	٤٢,٨٦٧	٩١,٥٣٣
٦	S٢	٠,٧٥	٠	١٠٠	٤٥,٣٧٥	٩٨
٧	S٣	١,٢٥	٠	١٠٠	٥٥,٠١٧	١٠٦,٦٣٣
٨	P+S ١	٠,٢٥	٥٠	٥٠	٤٣,١٧٥	٨٨,٦٦٧
٩	P+S ٢	٠,٧٥	٥٠	٥٠	٤٥,٢٣٣	٩٠,٧٦٦
١٠	P+S ٣	١,٢٥	٥٠	٥٠	٥١,٣	٩٨,٥٥
١١	HY١	١,٢٥	١٠٠	٠	٣٢,٨٣٣	٧٣,٧
١٢	HY٢	١,٢٥	٠	١٠٠	٥٢,٥	٨٩,٥٦٧
١٣	HY٣	١,٢٥	٥٠	٥٠	٤٧,٠٢٥	٧٦,٣



المجموعة المرجعية



المجموعة الحاوية على الياف البولي بروبيلين بنسبة (٠,٢٥%)



المجموعة الحاوية على الياف البولي بروبيلين بنسبة (٠,٧٥%)



المجموعة الحاوية على الياف البولي بروبيلين بنسبة (١,٢٥%)



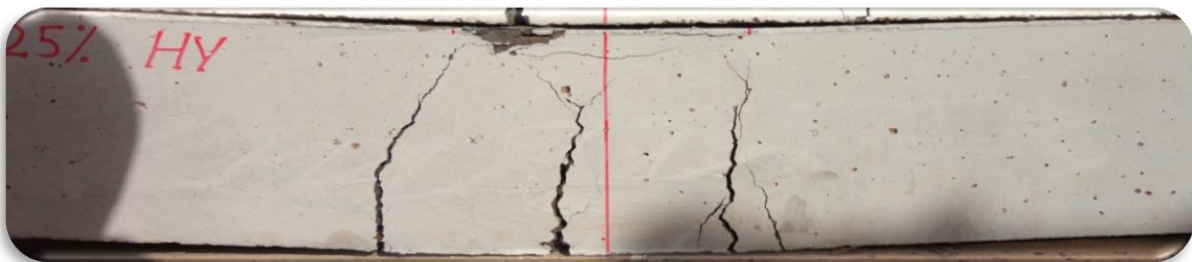
المجموعة الحاوية على الياف الحديد بنسبة (٠,٢٥%)



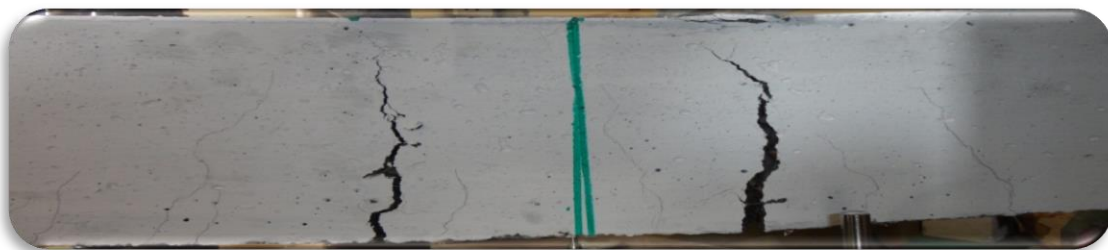
المجموعة الحاوية على الياف الحديد بنسبة (٠,٧٥%)



المجموعة الحاوية على الياف الحديد بنسبة (١,٢٥%)



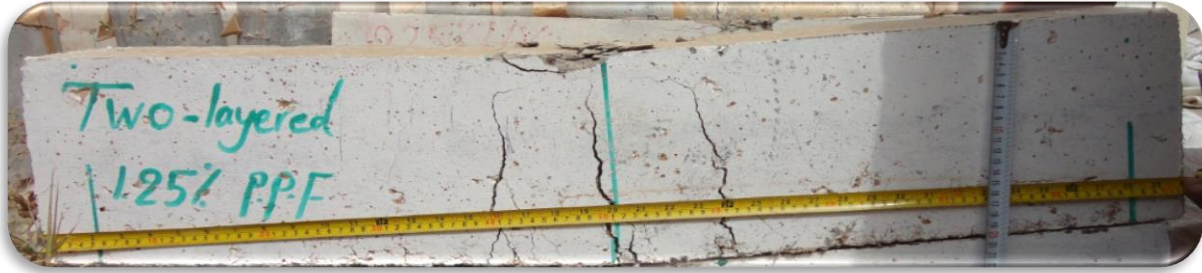
المجموعة الحاوية على الياف (البولي بروبيلين + الحديد) بنسبة (٠,٢٥%)



المجموعة الحاوية على الياف (البولي بروبيلين + الحديد) بنسبة (٠,٧٥%)



المجموعة الحاوية على ألياف (البولي بروبيلين + الحديد) بنسبة (١,٢٥%)



المجموعة الحاوية على ألياف البولي بروبيلين بنسبة (١,٢٥%) ضمن منطقة الشد



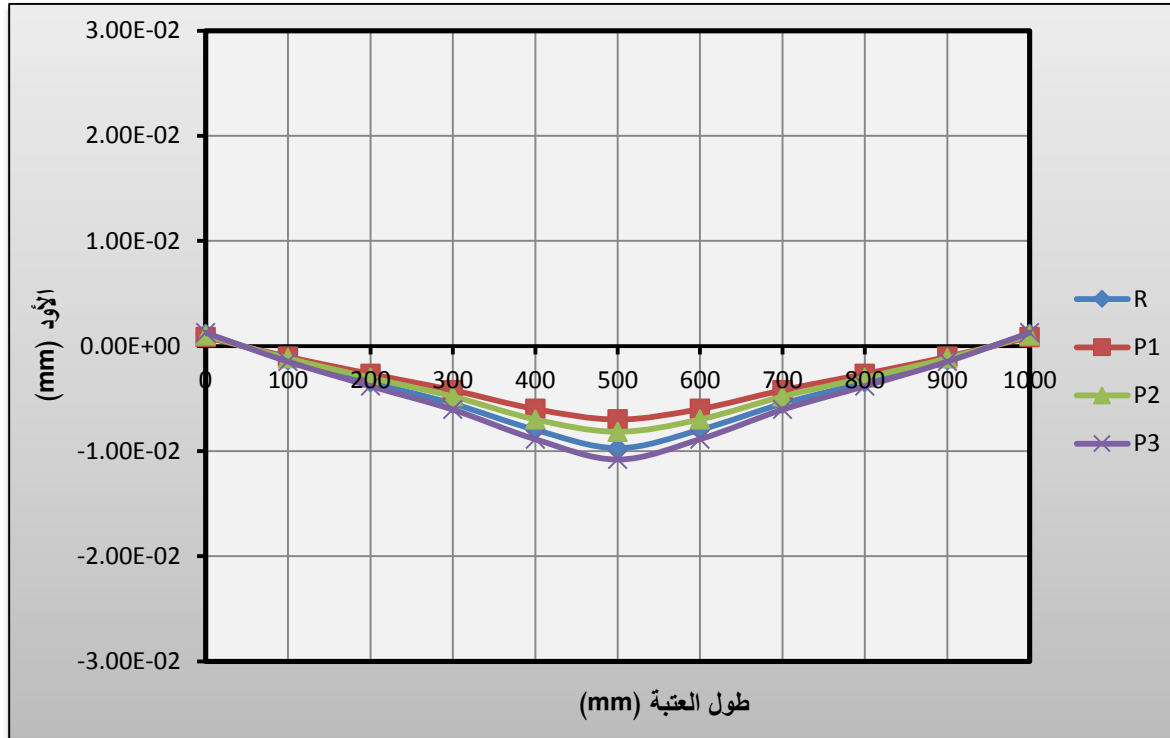
المجموعة الحاوية على ألياف الحديد بنسبة (١,٢٥%) ضمن منطقة الشد



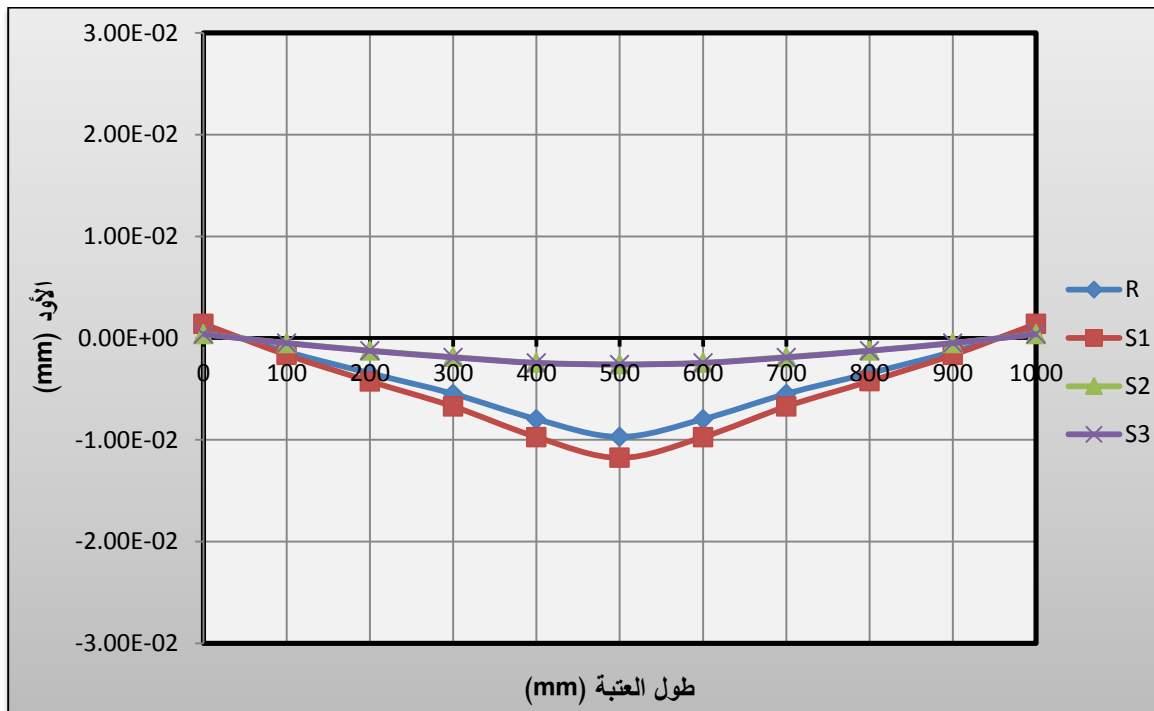
المجموعة الحاوية على ألياف (الحديد + البولي بروبيلين) بنسبة (١,٢٥%) ضمن منطقة الشد

الشكل (5 - 34) : صور لعينات للعتبات المفحوصة لمجاميع الدراسة الحالية

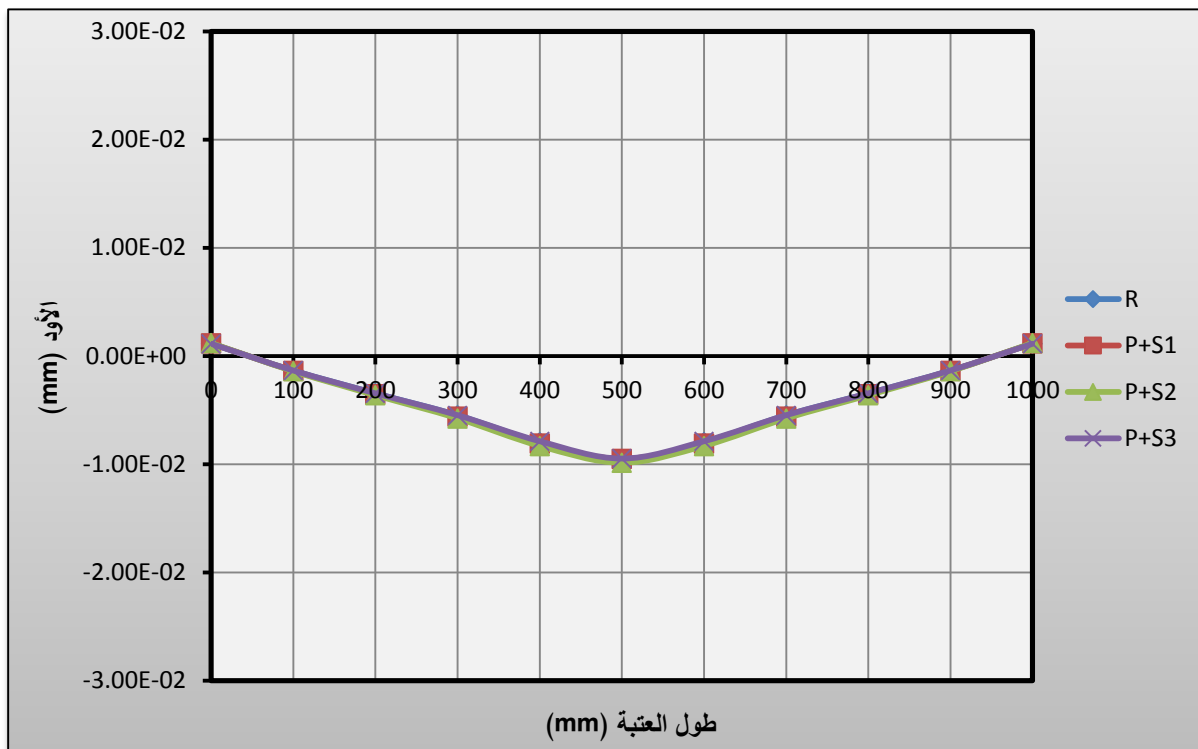
وفيما يأتي عرض للنتائج المتمثلة بالأود على طول المقطع عند الحمل الأقصى للعتبة بالإعتماد على البرنامج النظري .



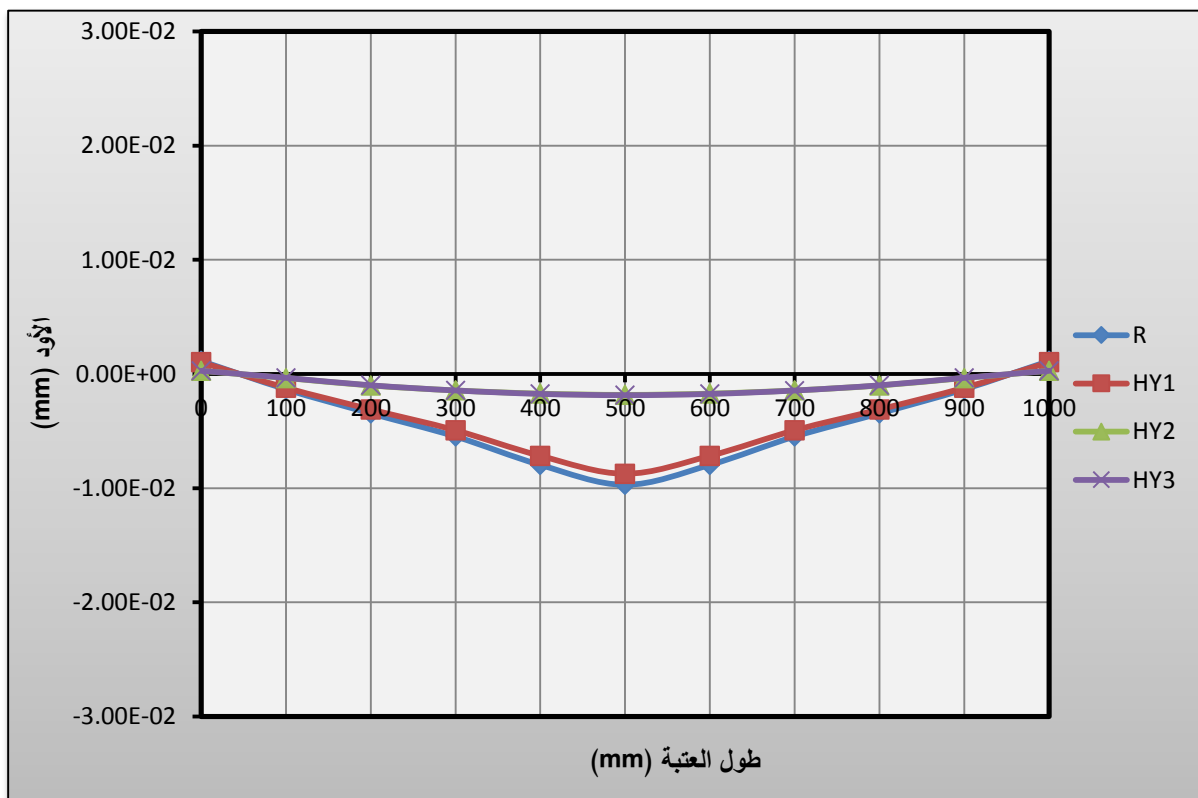
الشكل (5 - 35) : قيم الأود على طول العتبة للمجموعة المرجعية والمجاميع الحاوية على ألياف البولي بروبيلين فقط



الشكل (5 - 36) : قيم الأود على طول العتبة للمجموعة المرجعية والمجاميع الحاوية على ألياف الحديد فقط

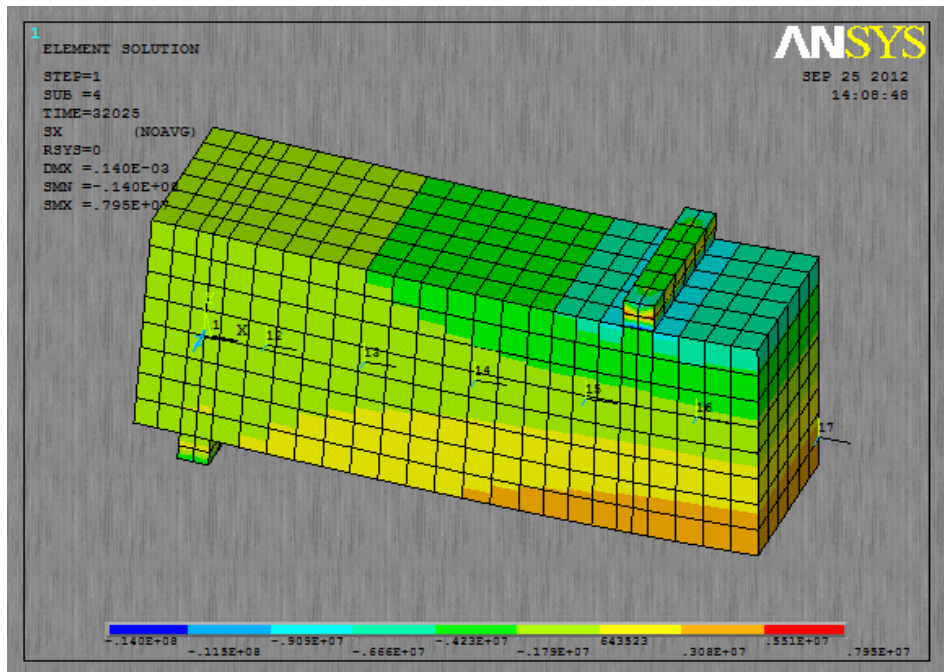


الشكل (5 - 37): قيم الأود على طول العتبة للمجموعة المرجعية والمجاميع الحاوية على الألياف المدمجة

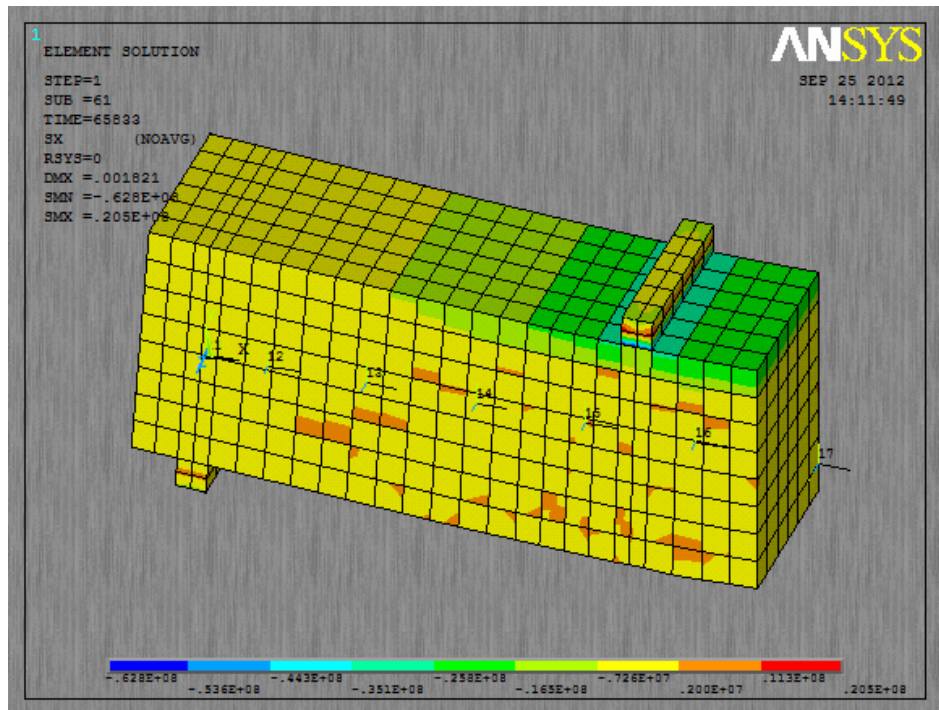


الشكل (5 - 38): قيم الأود على طول العتبة للمجموعة المرجعية والمجاميع بطبقتين

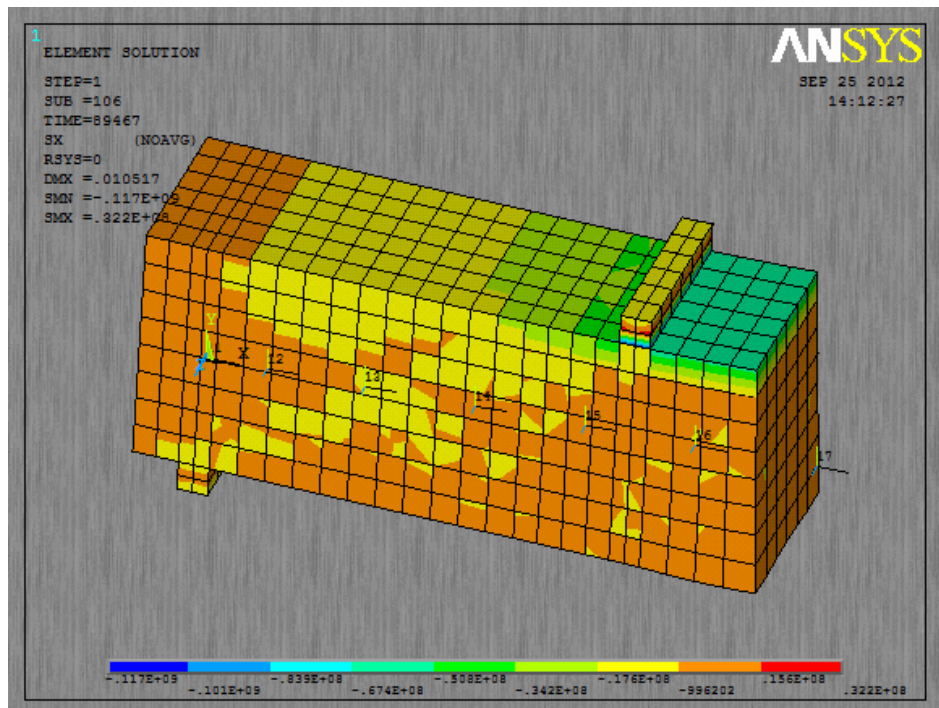
وكمثال عن توزيع الإجهاد على طول العتبة تم الإعتماد على البرنامج النظري لإستخراج هذه النتائج وذلك عند ثلاثة مستويات من التحميل ؛ قبل حدوث الشق الأول بقليل ، في مرحلة خضوع حديد التسليح الرئيس وعند التحمل الأقصى للعتبة وذلك للمجموعة ($P+S'$) الحاوية على الألياف المدمجة (الياف البولي بروبيلين+ألياف الحديد) وبنسبة حجمية للألياف مقدارها (٢٥,٠%) وبنسبة (٥٠%) لكل نوع من الألياف ونلاحظ من خلال هذه الأشكال إنّ الإجهادات تكون اكبر ما يمكن تحت نقطتي التحميل وتليها في منطقة الشد للعتبة ضمن منطقة العزم الثابت ثم تبدأ هذه الإجهادات بالزيادة لتشمل مناطق أوسع من العتبة .



الشكل (5 - 39): توزيع الإجهاد على طول العتبة في حمل ما قبل حدوث الشق الأول بقليل



الشكل (5 - 40): توزيع الإجهاد على طول العتبة في حمل خضوع حديد التسليح الرئيسي



الشكل (5 - 41): توزيع الإجهاد على طول العتبة في الحمل الأقصى للعتبة