



جامعة دمشق
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الإنشائية

"دراسة تأثير النحافة على قدرة تحمل الأعمدة البيتونية"

“Effect of slenderness on the capacity of concrete columns”

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية – قسم الهندسة الإنشائية

إعداد

المهندسة سلمى الخطيب

إشراف

الدكتور المهندس هيثم زرزور

العام الدراسي

2015

"دراسة تأثير النخافة على قدرة تحمل الأعمدة البيتونية"

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة المدنية – قسم الهندسة الإنشائية

إعداد

المهندسة سلمى الخطيب

إشراف

الدكتور المهندس هيثم زرزور

لجنة الحكم السادة الأساتذة:

أ.د. رياض العيسى الأستاذ في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية

عضواً جامعة دمشق – اختصاص: مقاومة مواد

د.م. هيثم زرزور المدرس في قسم الهندسة الإنشائية كلية الهندسة المدنية

عضواً مشرفاً جامعة دمشق – اختصاص: خرسانة مسلحة

د.م. أمجد الحلواني المدرس في قسم الهندسة الإنشائية المعهد العالي للبحوث

والدراسات الزلزالية جامعة دمشق – اختصاص: التفاعل

عضواً المشترك بين الضرر الزلزالي ومبددات الطاقة.

فهرس المحتويات

Contents

فهرس الأشكال

فهرس الجداول

الرموز المستخدمة

قائمة المختصرات

ملخص البحث

1..... الفصل الأول: مقدمة

1-1 مقدمة عن الأعمدة البيتونية المسلحة..... 1

2-1 التحنيب..... 4

3-1 الهدف من البحث وأهميته..... 7

4-1 طرائق البحث..... 7

5-1 محتويات الأطروحة..... 7

9..... الفصل الثاني: الدراسات المرجعية

1-2 مقدمة..... 9

2-2 مادة البيتون المسلح وقدرة تحملها..... 9

3-2 سلوك الأعمدة البيتونية المسلحة..... 15

16.....	4-2 مخطط الترابط وعلاقة القوة – العزم
22.....	5-2 أنماط انهيار الأعمدة وعلاقتها بمخطط الترابط
24.....	6-2 علاقة أويلر
28.....	7-2 علاقات الكود العربي السوري في حساب الأعمدة
32.....	8-2 الدراسات والأبحاث المرجعية
46.....	9-2 خلاصة الفصل الثاني
47.....	الفصل الثالث: الدراسة التحليلية باستخدام طريقة العناصر المحدودة
47.....	1-3 مقدمة
47.....	2-3 التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة
47.....	1-2-3 توصيف النموذج
48.....	2-2-3 العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج ABAQUS
49.....	3-2-3 الشروط المحيطية للنموذج
49.....	4-2-3 الأحمال المطبقة على النموذج
49.....	5-2-3 التحليل المستخدم
49.....	6-2-3 طرائق نمذجة المواد المستخدمة
55.....	3-3 دراسة أثر تقارب الشبكة
56.....	4-3 نتائج تحليل النموذج
60.....	5-3 مقارنة نتائج النموذج التحليلي مع النتائج التجريبية
63.....	6-3 خلاصة الفصل الثالث
64.....	الفصل الرابع: الدراسة البارامترية

1-4	مقدمة	64
2-4	دراسة سلوك الأعمدة بتغير معامل النحافة	64
3-4	دراسة سلوك الأعمدة البيتونية بعدة نسب نحافة مع تغير مقاومة البيتون على الضغط	68
4-4	دراسة حالات انهيار الأعمدة بتغير معامل النحافة	70
5-4	مقارنة النتائج التحليلية مع قيم علاقة أويلر	76
6-4	مقارنة النتائج التحليلية مع الكود السوري	78
7-4	خلاصة الفصل الرابع	81
82	الفصل الخامس: النتائج والتوصيات	82
1-5	النتائج	82
2-5	التوصيات	83
84	المراجع	84

فهرس الأشكال

- الشكل /1-1/: جملة البلاطات والجوائز والأعمدة.....1
- الشكل/2-1/: أعمدة معدنية.....2
- الشكل/3-1/: أعمدة حجرية.....2
- الشكل/4-1/: أعمدة مبنية لأهداف معمارية.....3
- الشكل/5-1/: التسليح الحلزوني والتسليح العادي في الأعمدة.....3
- الشكل /6-1/: الأعمدة المختلطة.....4
- الشكل /7-1/: أعمدة معرضة لضغط مركزي.....4
- الشكل/8-1/: أعمدة معرضة لضغط لامركزي.....4
- الشكل /9-1/: ظاهرة التحنيب.....5
- الشكل/10-1/: انهيار العمود القصير على الضغط.....5
- الشكل/11-1/: انهيار العمود الطويل على التحنيب.....6
- الشكل /1-2/: المنحني الافتراضي للإجهاد والتشوه للفولاذ الطري والعالي المقاومة وفق الكود العربي السوري.....11
- الشكل /2-2/: المنحني الافتراضي للإجهاد والتشوه للفولاذ المعالج على البارد وفق الكود العربي السوري.....11

- الشكل/2-3/: منحنى الإجهاد – التشوه للبيتون على الضغط وفق الكود الأوربي (EuroCode2-)
13.....2004)
- الشكل/2-4/: منحنى الإجهاد – التشوه النسبي لفولاذ التسليح وفق الكود الأوربي (EuroCode2-)
14..... 2004)
- الشكل/2-5/: سلوك الأعمدة القصيرة.....
15.....
- الشكل/2-6/: سلوك الأعمدة الطويلة.....
16.....
- الشكل/2-7/: لامركزية بسيطة.....
17.....
- الشكل/2-8/: لامركزية مركبة.....
17.....
- الشكل/2-9/: استبدال العزم بقوة مطبقة بشكل لامركزي.....
17.....
- الشكل/2-10/: عمود معرض لقوة ضغط لامركزية ومخطط التشوهات الناتج.....
18.....
- الشكل /2-11/: تأثير اللامركزية على حالة الانهيار.....
20.....
- الشكل/2-12/: منحنى مخطط الترابط.....
21.....
- الشكل/2-13/: الانتقالات الجانبية الإضافية في العمود بسبب التحنيب.....
23.....
- الشكل/2-14/: منحنى مخطط الترابط موضح عليه حالات انهيار الأعمدة (Kawk and Kim,
24.....2004)
- الشكل/2-15/: عمود معرض لقوة ضغط محورية.....
25.....
- الشكل/2-16/: أنصاف الموجات المتشكلة في العمود.....
26.....
- الشكل/2-17/: الطول المكافئ في الأعمدة حسب شروط الاستناد.....
27.....
- الشكل/2-18/: توضع العينة ضمن جهاز الاختبار (J. Saravanan et al ,2012).....
35.....
- الشكل /2-19/: تفاصيل الأعمدة المستخدمة في التجربة (R.Porras, et al , 2009).....
37.....

- الشكل /20-2/: نتائج اختبار العينات: منحنيات الحمولة-الانتقال الجانبي (R.Porras, et al , 2009) 38.....
- الشكل /21-2/: تصنيف سلوك الأعمدة بالاعتماد على قيمة نسبة النحافة λ واللامركزية الابتدائية (R.Porras, et al , 2009) 39.....
- الشكل /22-2/: منحنيات الإجهاد-التشوه للعينات البيتونية على الضغط (Fitzwilliam,2006) 40..
- الشكل /23-2/: ترتيب التسليح داخل العينات (Fitzwilliam,2006) 41.....
- الشكل /24-2/: تمثيل العينة في جهاز الاختبار (Fitzwilliam,2006) 42.....
- الشكل /25-2/: منحنيات الحمولة –الانتقال الجانبي للعينات 300-A , 300-B (Fitzwilliam,2006) 43.....
- الشكل /26-2/: منحنيات الحمولة –الانتقال الجانبي للعينات 600-A (Fitzwilliam,2006) 44...
- الشكل /27-2/: منحنيات الحمولة –الانتقال الجانبي للعينات 900-A , 900-B (Fitzwilliam,2006) 44.....
- الشكل /28-2/: منحنيات الحمولة –الانتقال الجانبي للعينات 1200-A , 1200-B (Fitzwilliam,2006) 45.....
- الشكل /29-2/: مقارنة سلوك العينات من خلال منحنيات الحمولة-السهم (Fitzwilliam,2006) 45.
- الشكل /30-2/: مقارنة بين العينات a. – للحمولة الحديدية b. – للسهم الجانبي (Fitzwilliam,2006) 46.....
- الشكل /1-3/: تمثيل العنصر الفراغي بثمان عقد (ABAQUS Ver6.12 Documentation,2012) 48.....
- الشكل /2-3/: تمثيل العنصر الشبكي ذو العقدتين (ABAQUS Ver6.12 Documentation,2012) 48.....

- الشكل/3-3/: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للبيتون على الضغط (ABAQUS Ver6.12)
51..... Documentation,2012)
- الشكل/4-3/: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للبيتون على الشد (ABAQUS Ver6.12)
52..... Documentation,2012)
- الشكل/5-3/: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للبيتون على الشد (EuroCode2-2004)
53.....
- الشكل/6-3/: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للفلواز المستخدم في النمذجة
55.....
- الشكل/7-3/: أثر تقارب الشبكة للنموذج التحليلي
56.....
- الشكل /8-3/: مقارنة بين منحنيات الحمولة-الانتقال الجانبي للأعمدة المدروسة وفق الدراسة
التحليلية
57.....
- الشكل/9-3/: التشوهات اللدنة في العمود $\lambda=9.7$ عند الحمولة الأعظمية وفق برنامج ABAQUS
57.....
- الشكل/10-3/: التشوهات اللدنة في العمود $\lambda=17.6$ عند الحمولة الأعظمية وفق ABAQUS
58.....
- الشكل/11-3/: التشوهات اللدنة في العمود $\lambda=33.4$ عند الحمولة الأعظمية وفق برنامج
ABAQUS
59.....
- الشكل/12-3/: مقارنة النتائج التجريبية مع التحليلية لمنحنى الحمولة-السهم للعمود 300 mm
60.....
- الشكل/13-3/: مقارنة النتائج التجريبية مع التحليلية لمنحنى الحمولة-السهم للعمود 600 mm
61.....
- الشكل/14-3/: مقارنة النتائج التجريبية مع التحليلية لمنحنى الحمولة-السهم للعمود 900 mm
62.....
- الشكل/15-3/: مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية لمنحنى الحمولة-السهم للعمود
mm
63..... 1200
- الشكل/1-4/: منحنيات الحمولة – الانتقال الجانبي للأعمدة المدروسة وفق الدراسة التحليلية
67.....
- الشكل /2-4/ الحمولة الأعظمية للأعمدة مع تغير نسبة النخافة وفق الدراسة التحليلية
68.....

- الشكل/4-3: منحنيات تغير قدرة التحمل بتغير معامل النحافة للأعمدة المدروسة لعدة قيم لمقاومة البيتون على الضغط وفق الدراسة التحليلية69
- الشكل/4-4: المقطع العرضي للأعمدة المدروسة ومخطط الإجهادات والتشوهات71
- الشكل/4-5: منحنى مخطط الترابط للمقطع العرضي للأعمدة المدروسة ومنحنيات القوة-العزم للأعمدة وفق الدراسة التحليلية74
- الشكل /4-6: التشوهات اللدنة الأعظمية عند منتصف ارتفاع العمود $\lambda=101.8$ عند الحمولة العظمى وفق الدراسة التحليلية75
- الشكل /4-7: التشوهات اللدنة الأعظمية عند منتصف ارتفاع العمود $\lambda=123$ عند الحمولة العظمى وفق الدراسة التحليلية76
- الشكل/4-8: منحنى يمثل علاقة أويلر مع تغير نسبة النحافة ومقارنته مع المنحني الناتج عن الدراسة التحليلية77
- الشكل/4-9: مقارنة بين منحنى الدراسة التحليلية والمنحني الناتج من علاقة الكود السوري80

فهرس الجداول

- الجدول /1-2/: درجات جودة الخرسانة واستعمالاتها وفق الكود العربي السوري.....10
- الجدول /2-2/: تصنيفات مادة البيتون وفق الكود الأوربي (EuroCode 2004)12
- الجدول/3-2/: قيم المعامل Kb (الكود العربي السوري 2004) 31
- الجدول /4-2/: مواصفات العينات (A.Belouar, et al 2013) 33
- الجدول /5-2/: نتائج التجربة (A.Belouar, et al 2013) 33
- الجدول /6-2/: تفاصيل العينات في التجربة (J.Saravanan et al ,2012) 34
- الجدول/7-2/: نتائج التجربة (J.Saravanan et al ,2012) 35
- الجدول/8-2/: مواصفات العينات (Fitzwilliam,2006) 40
- الجدول/9-2/: نتائج اختبارات الشد على فولاذ التسليح (Fitzwilliam,2006) 41
- الجدول/10-2/: نتائج التجربة (Fitzwilliam,2006) 42
- الجدول /1-4/ قيم الحمولة الأعظمية للأعمدة وفق الدراسة التحليلية 66
- الجدول/2-4/: قيم الحمولة الأعظمية للأعمدة لكل قيم f_c المدروسة وفق الدراسة التحليلية 69
- الجدول/3-4/: قيم منحنى مخطط الترابط للمقطع العرضي للأعمدة المدروسة 74
- الجدول/4-4/: قيم الحمولة الأعظمية للأعمدة المدروسة وفق علاقة أويلر 77
- الجدول/5-4/: قيم المعامل Kb والحمولة الأعظمية للأعمدة وفق الكود العربي السوري 79

الرموز المستخدمة

Symbols

A_s	مساحة حديد التسليح
A_{sp}	المساحة المكافئة للأساور الحلزونية
A_c	مساحة المقطع البيتوني
A_k	مساحة مقطع النواة الداخلية للحلزون
d	بعد مركز ثقل التسليح المشدود عن أبعد ليف مضغوط
d'	بعد مركز ثقل التسليح المضغوط عن أبعد ليف مضغوط
d_c	معامل تخفيض القساوة على الضغط
d_t	معامل تخفيض القساوة على الشد
e	اللامركزية الابتدائية للقوة المطبقة
E	معامل المرونة
E_s	معامل مرونة حديد التسليح
E_c	معامل مرونة البيتون
E_o	معامل المرونة الابتدائي للبيتون
f_{cm}	المقاومة المتوسطة للبيتون على الضغط
f_{ctm}	المقاومة الحدية للبيتون على الشد

إجهاد الخضوع الحقيقي لحديد التسليح	f_{yk}
إجهاد الخضوع الحقيقي لحديد التسليح	f_{yd}
إجهاد خضوع حديد التسليح	f_y
مقاومة حديد التسليح للشد	f_t
الإجهاد الحدي لحديد التسليح	f_u
المقاومة المميزة الاسطوانية للبيتون على الضغط	f_c
عزم عطالة المقطع العرضي	I
نصف قطر عطالة المقطع العرضي	i
عزم عطالة المقطع البيتوني بإهمال حديد التسليح	I_g
عزم عطالة حديد التسليح حول مركز ثقل المقطع العرضي	I_{se}
معامل يأخذ بعين الاعتبار موقع العمود	K_e
معامل تخفيض قدرة تحمل الأعمدة الطويلة وفق الكود العربي السوري	K_b
الطول الفعال (المكافئ) للعمود	L_{eff}
الطول الحقيقي للعمود	L
العزم المطبق على المقطع العرضي	M_n
القوة المطبقة على المقطع العرضي	P_n
حمولة التحنيب الحدية (حمولة أويلر)	P_{cr}
بعد مركز ثقل البيتون المضغوط عن المحور السليم في المقطع العرضي	Y_{NA}
إجهاد الضغط في البيتون	σ_c
الإجهاد الحدي للبيتون على الضغط	σ_{cu}

σ_t	إجهاد الشد في البيتون
σ_{to}	الإجهاد الحدي للبيتون على الشد
ϵ_{to}	التشوه النسبي الابتدائي للبيتون على الشد
ϵ_t	التشوه النسبي للبيتون على الشد
ϵ_{Total}	التشوه النسبي الحدي للبيتون على الشد
ϵ_Y	التشوه النسبي للحديد عند الخضوع
ϵ_s	التشوه النسبي لحديد التسليح
Ω	معامل تخفيض المقاومة
λ	معامل النحافة في العمود
δ	الانتقالات الجانبية في العمود الناتجة عن التحنيب

قائمة المختصرات

Abbreviation List

FEM	Finite Element Method
MNA	Materially Non-linear Analysis
CDP	Concrete Damaged Plasticity
RC	Reinforced Concrete
HSC	High Strength Concrete
NSC	Normal Strength Concrete

ملخص البحث

Abstract

يُعد التحنّب من الظواهر الهامة التي تؤثر على سلوك الأعمدة فقد يتسبب بعدم استقرار العمود وانهياره بشكل مفاجئ مما قد يسبب ضرراً بالمنشأ بأكمله.

تم في هذا البحث تحليل ظاهرة التحنّب من خلال دراسة أعمدة بيتونية بمقطع دائري وبنسب نحافة مختلفة لتكون منطلقاً لأعمدة بمقاطع عرضية أخرى، مع الأخذ بعين الاعتبار تغير مقاومة البيتون على الضغط، ودراسة أنماط انهيار الأعمدة فيما إذا كانت على الضغط أي انهيار المادة أو بسبب التحنّب أي انهيار بسبب فقدان الاتزان.

تم استخدام طريقة العناصر المحدودة FEM في إجراء هذه الدراسة واعتماد التحليل اللاخطي الذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة MNA ولا خطية الشكل الهندسي.

بينت هذه الدراسة أثر تغير نسبة النحافة على قدرة تحمل الأعمدة و نمط انهيارها , وتبين من خلال إجراء دراسة مقارنة للنتائج التحليلية مع قيم علاقة أويلر ومع علاقات الكود العربي السوري مدى تطابق النتائج التحليلية مع كلتا الحالتين, ثم تم استخلاص العديد من النتائج وتم وضع عدة توصيات لأعمال مستقبلية.

الفصل الأول

مدخل في البحث

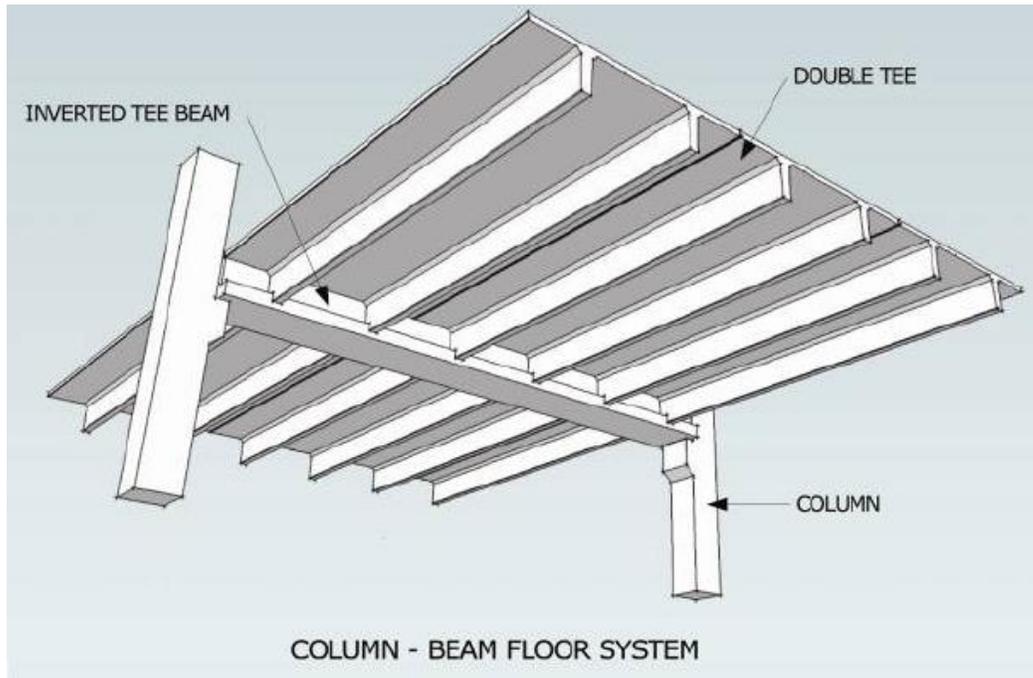
Introduction

1-1- مقدمة عن الأعمدة البيتونية المسلحة:

Introduction to Reinforced Concrete Columns

تعد الأعمدة من العناصر الهامة في المنشآت البيتونية حيث تؤمن نقل الأحمال من البلاطات والجوائز المتصلة بها إلى الأساسات الشكل /1-1/.

وتعرف الأعمدة بأنها العناصر التي يكون طولها أكبر بكثير من أبعاد مقطعها العرضي وتخضع بشكل أساسي لأحمال ضاغطة بالاتجاه الطولي ويكون تسليحها العامل باتجاه هذه الأحمال على أن يتم تسليحها بتسليح عرضي مناسب.



الشكل /1-1/: جملة البلاطات والجوائز والأعمدة

تختلف مواد إنشاء الأعمدة حسب الغاية منها، أكثر المواد شيوعاً هي مادة الببتون المسلح والتي تستخدم في معظم المنشآت، وهناك الأعمدة المعدنية التي تستخدم في المنشآت التي تتطلب مجازات واسعة كما في المنشآت الصناعية وغالباً تكون مقاطعها بشكل حرف I أو H أو مفرغة (الشكل 1-2)، وقد تكون أعمدة حجرية كما في الأقواس وبعض المنشآت (الشكل 1-3). وفي بعض الحالات تُبنى الأعمدة لأهداف معمارية معينة (الشكل 1-4).



الشكل 1-2: أعمدة معدنية

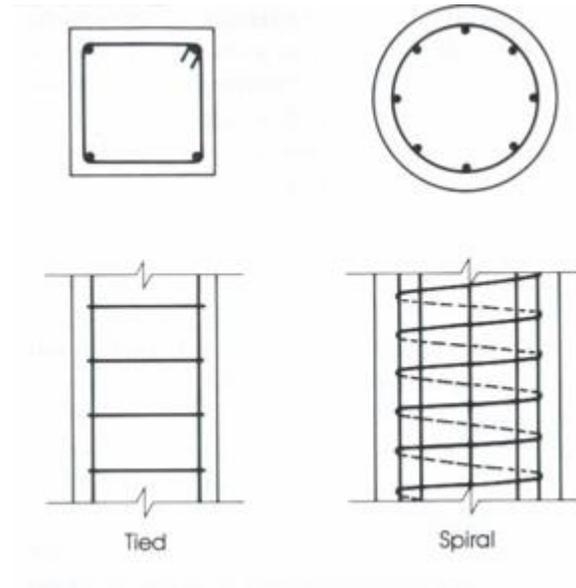


الشكل 1-3: أعمدة حجرية

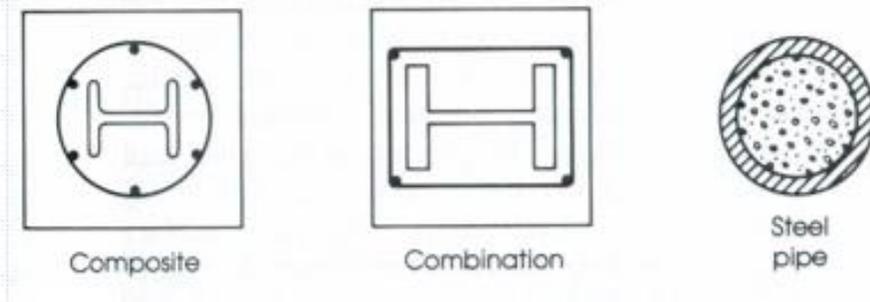


الشكل/1-4: أعمدة مبنية لأهداف معمارية

يمكن أن يكون المقطع العرضي للأعمدة بسيط على شكل مربع أو مستطيل أو دائرة أو بشكل مضلع منتظم. أما تسليح الأعمدة البيتونية فيكون إما قضبان طولية مع أساور عادية (Tied Reinforcement) أو قضبان طولية مع تسليح حلزوني (Spiral Reinforcement) (في الأعمدة الدائرية) كما في الشكل /1-5. أو أعمدة مختلطة (Composite Columns) مسلحة بمقاطع معدنية في الداخل مع أو بدون قضبان طولية أو مطوقة من الخارج بمقاطع معدنية كما في الشكل /1-6.

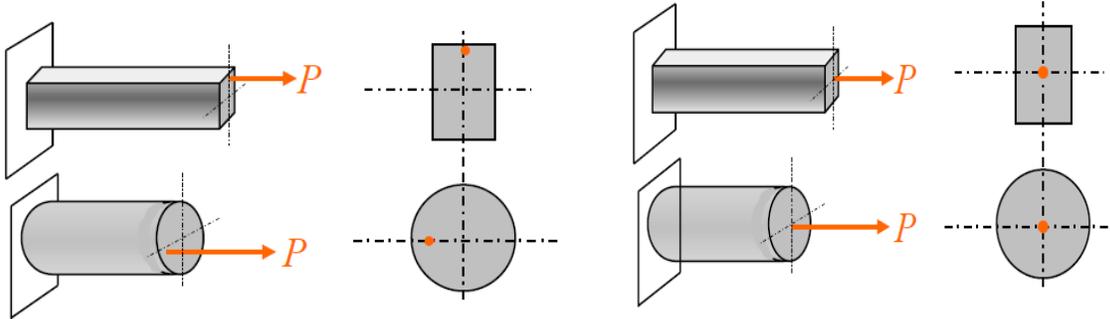


الشكل/1-5: التسليح الحلزوني والتسليح العادي في الأعمدة



الشكل /6-1/: الأعمدة المختلطة

يمكن أن تكون الأعمدة خاضعة لقوة ضغط مطبقة بشكل مركزي (الشكل 7-1) أو بشكل لامركزي (الشكل 8-1)، ويمكن أن تكون اللامركزية صغيرة أو كبيرة وفي هذه الحالة تنشأ في الأعمدة عزوم انعطاف بالإضافة إلى قوى الضغط.



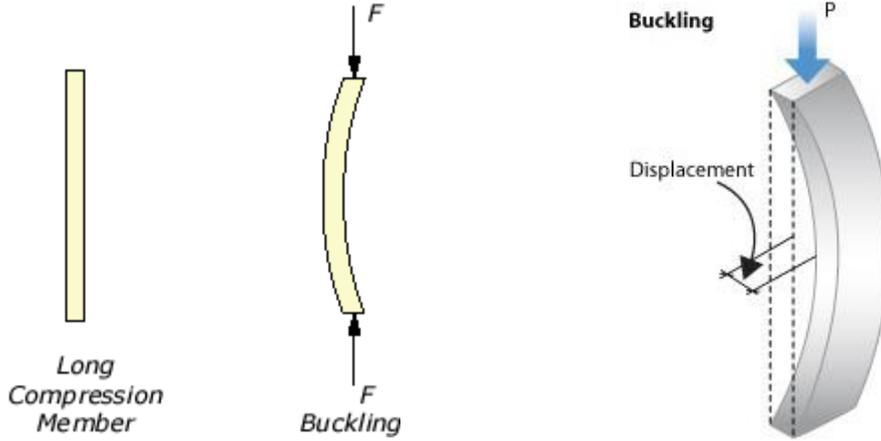
الشكل/8-1/: أعمدة معرضة لضغط لامركزي

الشكل /7-1/: أعمدة معرضة لضغط مركزي

2-1 التحنيط: Buckling

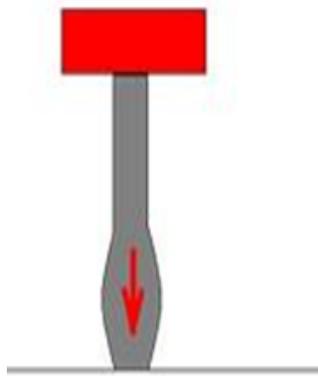
التحنيط عبارة عن تشوهات كبيرة تنتج في العناصر المعرضة لقوى ضغط وتنشأ بالاتجاه العمودي على جهة القوة المطبقة (الشكل 9-1)، وهو شكل من أشكال عدم الاستقرار يحدث بشكل مفاجئ بسبب حصول تشوهات كبيرة مقابل زيادة قليلة في الحمولة وذلك بسبب زيادة العزوم المطبقة على العنصر ولهذا السبب

يعد التحنيب من الظواهر الخطيرة التي يجب تجنبها عند التصميم، ويؤدي حصول التحنيب في العنصر إلى انهياره قبل وصول المادة إلى مقاومتها القصوى.



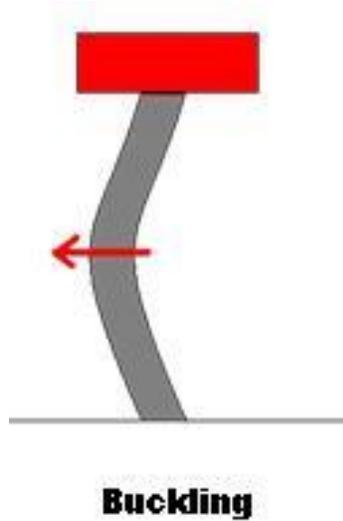
الشكل 9-1/: ظاهرة التحنيب

تخضع معظم الأعمدة البيتونية المسلحة لإجهادات رئيسة ناتجة عن القوى المحورية المطبقة، وعادة تكون الإجهادات الثانوية المرتبطة بالتشوهات الجانبية صغيرة في معظم الأعمدة المستخدمة على أرض الواقع. تُدعى هذه الأعمدة بالأعمدة القصيرة وتكون قدرة تحمل العمود القصير هي نفس قدرة تحمل مقطعه العرضي تحت تأثير الإجهادات الرئيسية بغض النظر عن طوله ويكون انهياره على الضغط (الشكل 1-10).



الشكل 10-1/: انهيار العمود القصير على الضغط

تنشأ في الأعمدة الطويلة إجهادات ثانوية ناتجة عن تشوهات العمود وخاصةً إذا كانت غير مسندة جانبياً. تُدعى هذه الأعمدة بالأعمدة الطويلة وبناءً على ذلك فإن الأعمدة الطويلة تقاوم قوة أقل من التي تقاومها الأعمدة القصيرة التي لها نفس المقطع العرضي بسبب العزم الإضافي الناتج عن التشوهات الجانبية، ويحصل الانهيار في الأعمدة الطويلة إما بسبب انهيار المادة كمقطع عرضي أو بسبب عدم استقرار العمود كعنصر (الشكل 11-1).



الشكل/11-1: انهيار العمود الطويل على التحنيب

يتم الاعتماد في تصنيف الأعمدة (قصيرة أو طويلة) على معامل النحافة λ , وهو معامل يتعلق بطول العمود وأبعاد مقطعه العرضي. حيث تحدد الدراسات والكودات علاقات مختلفة لحساب معامل النحافة ومن ثم يتم تحديد مجالات لقيم معامل النحافة التي يُعتبر فيها العمود قصيراً أو طويلاً وبناءً على ذلك تُتخذ الإجراءات المناسبة عند التصميم.

3-1 الهدف من البحث وأهميته:

Importance and Objectives of this Research:

إن ظاهرة التحنيط التي تتعرض لها الأعمدة ظاهرة لا يُستهان بها، وتكمن خطورتها في أنها تحدث بشكل مفاجئ نتيجة زيادة قليلة في الحمولة والتي تؤدي إلى حدوث تشوهات كبيرة ومفاجئة مما يؤدي إلى الانهيار. وتختلف الكودات والأبحاث في تحديد المجالات التي يُعتبر فيها العمود قصيراً أو طويلاً وكذلك في الإجراءات المتبعة في تصميم الأعمدة الطويلة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة ظاهرة التحنيط من خلال سلوك أعمدة بيتونية مسلحة بنسب نحافة مختلفة مع تغير مقاومة البيتون على الضغط ودراسة أنماط انهيار الأعمدة وسيتم الاقتصار في هذا البحث على المقطع العرضي الدائري ليتم التوسع مستقبلاً بأشكال أخرى.

4-1 طرق البحث: Methods of This Research

تم في هذا البحث القيام بدراسة عددية وفق طريقة العناصر المحدودة (Finite Element Method) عن طريق برنامج ABAQUS V6.12 وإجراء التحليلي اللاخطي (Non-Linear Analysis) الذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة ولا خطية الشكل الهندسي.

5-1 محتويات الأطروحة: Contents of Thesis

تتألف هذه الأطروحة من:

الفصل الأول: مقدمة عامة عن الأعمدة وأنواعها وأشكال مقاطعها العرضية، وتعريف بالتحنيط وكيفية حصوله وتأثيره على الأعمدة، كما يحوي هذا الفصل على الهدف من البحث وأهميته وطرائقه ومحتويات الأطروحة.

الفصل الثاني: وفيه مراجعة لدراسات تجريبية سابقة حول أثر نسبة النحافة على قدرة تحمل الأعمدة وانهيارها، كما يحوي على مراجعة لدراسات نظرية مثل علاقة أويلر التي تُعطي الحمولة الحدية للتحنيط وعلاقات الكود العربي السوري في حساب معامل النحافة وقدرة تحمل الأعمدة.

الفصل الثالث: يحوي على الدراسة التحليلية التي تم استخدامها في هذا البحث باستخدام طريقة العناصر المحدودة , حيث تم توصيف النموذج وفق برنامج ABAQUS V6.12 من حيث المواد المستخدمة والعناصر المختارة للنمذجة وشروط الاستناد والأحمال المطبقة , ومن ثم تم عرض مقارنة بين النتائج التحليلية والنتائج التجريبية للتجربة المعتمدة والتأكد من صحة النموذج.

الفصل الرابع: يحوي على الدراسة البارامترية التي تم إجراؤها على النموذج الموصف في الفصل الرابع , حيث تم دراسة سلوك الأعمدة البيتونية بمقطع دائري وبنسب نحافة مختلفة ثم دراسة سلوك الأعمدة بعدة نحافات مع تغيير مقاومة البيتون على الضغط , وإجراء دراسة مقارنة للنتائج التحليلية مع قيم علاقة أويلر ومع قيم علاقة الكود العربي السوري.

الفصل الخامس: يحوي تلخيصاً للنتائج التي تم التوصل إليها، بالإضافة إلى التوصيات من أجل أعمال مستقبلية.

الفصل الثاني

الدراسات المرجعية

Literature Review

1-2 مقدمة:

يحتوي هذا الفصل على تعريف بمادة البيتون المسلح وسلوكها، وتعريف بالأعمدة البيتونية القصيرة والطويلة وسلوك كل منهما، كما يتضمن شرح لعلاقات الضغط اللامركزي وكيفية تمثيلها على مخطط الترابط وتحديد نمط انهيار الأعمدة عن طريق مخطط الترابط، كما تم في هذا الفصل عرض مراجعة نظرية لعلاقة أويلر المستخدمة في حساب حمولة التحنيب الحديدية في الأعمدة ولعلاقات الكود العربي السوري المستخدمة في حساب معامل النحافة وقدرة تحمل الأعمدة، وأخيراً تم عرض عدة دراسات تجريبية حول موضوع البحث.

2-2 مادة البيتون المسلح وقدرة تحملها:

Reinforced Concrete Material and its Strength:

تُعتبر مادة البيتون المسلح مادة غير متجانسة فهي تتألف من قضبان التسليح (Steel Reinforcement) والبيتون (Concrete)، حيث يقاوم البيتون القوى الضاغطة بينما يقاوم حديد التسليح القوى الشادة، وتعتبر مادة البيتون بحد ذاتها مادة مركبة لاحتوائها على العديد من المواد مثل الاسمنت - الحصى - الرمل - الماء التي تُخلط مع بعضها بنسب معينة لتكوين مادة البيتون النهائية، وقد تُضاف في بعض الحالات محسنات معينة أو إضافات بهدف استخدام البيتون لأغراض محددة.

من الضروري معرفة خواص مادة البيتون وسلوكها عند التصميم مثل الوزن الحجمي الظاهري - درجة التراص - النفاذية - المقاومة للتأثيرات المائية - الناقلية الحرارية - وأهمها المقاومة الميكانيكية على الضغط وعلى الشد.

1-2-2 خواص مكونات البيتون المسلح وفق الكود العربي السوري:

تُحدد المقاومة المميزة للخرسانة في الضغط والشد من نتائج اختبارات الضغط والشد والانفلاق على عينات قياسية عمرها 28 يوماً محفوظة تحت الماء في درجة حرارة 20 ± 2 درجة مئوية، ويجب ألا يزيد عدد الاختبارات المحتمل أن تنخفض مقاومتها عن المقاومة المميزة على 10% طبقاً للمعايير الإحصائية.

يتم اختيار جودة الخرسانة التي تمثل المقاومة الاسطوانية المميزة لها على الضغط (f_c) بما يتناسب مع طبيعة المنشأة المراد تنفيذها، وبصورة عامة يمكن تصنيف درجات جودة الخرسانة واستعمالاتها كما هو مبين في الجدول /1-2/:

الجدول /1-2/: درجات جودة الخرسانة واستعمالاتها وفق الكود العربي السوري

درجة الجودة	C 5	C 8	C 10	C 12	C 15	C 18	C 20	C 25	C 30	C 35
المقاومة المميزة بالضغط f_c MPa	5	8	10	12	15	18	20	25	30	35
مجال الاستعمال	ردم	نظافة تحت الاساسات	خرسانة عادية (اساسات - جدران... الخ)	خرسانة مسلحة		خرسانة مسلحة وخرسانة مسبقة الإجهاد				

ولا تستعمل خرسانة من درجة جودة أعلى من C35 إلا في حالة الخرسانة المسبقة الإجهاد أو لأغراض إنشائية خاصة.

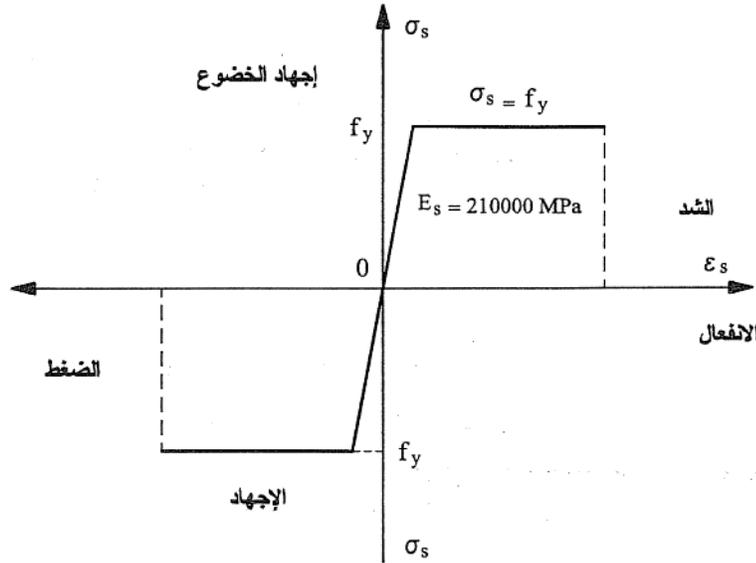
أما أهم خواص مادة الفولاذ فهي إجهاد الخضوع f_y - مقاومة الشد القصوى f_{SU} - والنسبة المئوية للاستطالة عند الانقطاع.

إن إجهاد الخضوع f_y هو المقاومة الميكانيكية المميزة للفولاذ في الشد والتي يُبنى التصميم على أساسها.

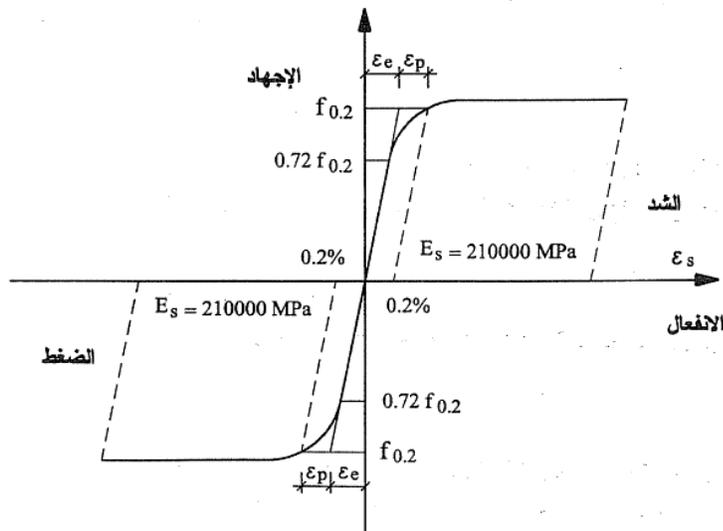
وتؤخذ العلاقة بين الإجهاد والتشوه للفولاذ من الاختبارات، وفي حال عدم وجود اختبارات يمكن الاعتماد على الشكلين /1-2/ و /2-2/.

في أنواع الفولاذ الطري عادي وعالي المقاومة (الشكل 1-2) الذي تظهر فيه خاصة الخضوع يكون فيه إجهاد الخضوع هو الإجهاد المطابق لمرحلة الخضوع، ويرمز له f_y .

في الفولاذ المعالج على البارد (الشكل 2-2) وفي بعض الأنواع الأخرى من الفولاذ عالي المقاومة الذي لا تظهر فيه عتبة خضوع يكون إجهاد الخضوع هو الإجهاد الذي يترك تشوهاً متبقياً مقداره 0.2% ويرمز له $f_{0.2}$.



الشكل 1-2/: المنحني الافتراضي للإجهاد والتشوه للفولاذ الطري العادي والعالي المقاومة وفق الكود العربي السوري



الشكل 2-2/: المنحني الافتراضي للإجهاد والتشوه للفولاذ المعالج على البارد وفق الكود العربي السوري

2-2-2 تصنيف الكود الأوربي لمادة البيتون: (EuroCode2-2004)

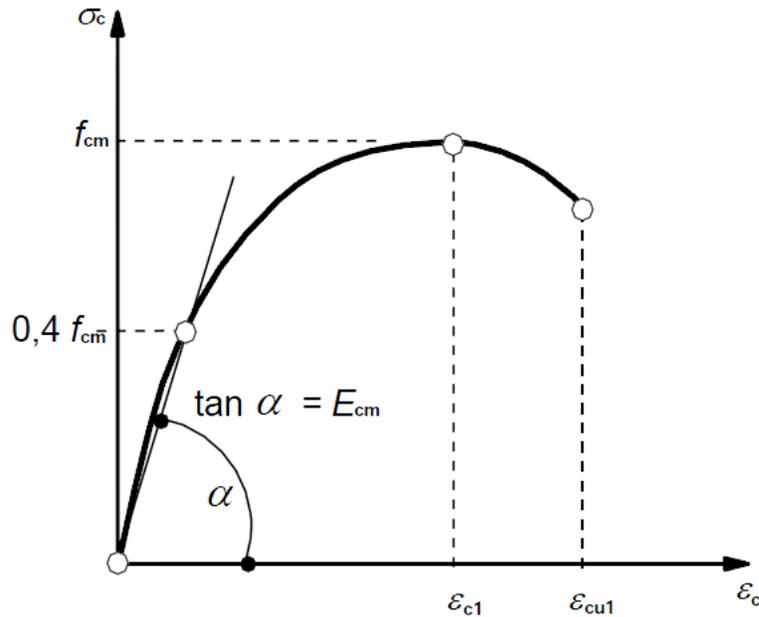
يعتمد الكود الأوربي في تصنيف البيتون على مقاومته المميزة على الضغط f_{ck} : وهي المقاومة التي يتم الحصول عليها بعد 28 يوم من صب العينات الاسطوانية.

يبين الجدول (2-2) الخواص الفيزيائية للبيتون وفق الكود الأوربي (EuroCode2- 2004) والتي نحصل عليها اعتماداً على مقاومته المميزة على الضغط f_{ck} .

الجدول /2-2/ تصنيفات مادة البيتون وفق الكود الأوربي (EuroCode 2004)

Analytical relation / Explanation	Strength classes for concrete															
	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90		
f_{ck} (MPa)																
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105		2.8
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98		$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$f_{cm, 0.05}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0		$f_{cm, 0.30} = 0,30 \cdot f_{cm, 0.05} \leq C50/60$ $f_{cm, 0.95} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm, 0.05} / 10)) > C50/60$
$f_{ax, 0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5		$f_{ax, 0.05} = 0,7 \cdot f_{cm}$ 5% fractile
$f_{ax, 0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6		$f_{ax, 0.95} = 1,3 \cdot f_{cm}$ 95% fractile
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44		$E_{cm} = 22((f_{cm})/10)^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)
ϵ_{t1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8		see Figure 3.2 $\epsilon_{t1}^{(f_{ck})} = 0,7 \cdot f_{ck} \leq 2,8$ (‰)
ϵ_{cur1} (‰)					3,5					3,2	3,0	2,8	2,8	2,8		see Figure 3.2 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cur1}^{(f_{ck})} = 2,3 + 27(98 - f_{cm})/1000$
ϵ_{t2} (‰)					2,0					2,2	2,3	2,4	2,5	2,6		see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{t2}^{(f_{ck})} = 2,0 + 0,065(f_{ck} - 50)^{0,25}$
ϵ_{cu2} (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6		see Figure 3.3 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu2}^{(f_{ck})} = 2,6 + 35(90 - f_{cm})/1000$
n					2,0					1,75	1,6	1,45	1,4	1,4		for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4(90 - f_{cm})/1000$
ϵ_{t3} (‰)					1,75					1,8	1,9	2,0	2,2	2,3		see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{t3}^{(f_{ck})} = 1,75 + 0,55((f_{ck} - 50)/40)$
ϵ_{cu3} (‰)					3,5					3,1	2,9	2,7	2,6	2,6		see Figure 3.4 for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu3}^{(f_{ck})} = 2,6 + 35(90 - f_{cm})/1000$

يُعطى الكود الأوربي (EuroCode2-2004) علاقة الإجهاد-التشوه النسبي للبيتون على الضغط بالمنحني المبين في الشكل 2-3، حيث يكون سلوك البيتون في البداية مرناً خطياً حتى الوصول إلى قيمة الإجهاد $(0.4f_{cm})$ حيث f_{cm} هي المقاومة المتوسطة على الضغط، بعد ذلك تبدأ المرحلة اللاخطية (Inelastic Behavior) حتى الوصول إلى قيمة f_{cm} ، ثم تنخفض مقاومة المادة تدريجياً حتى الوصول إلى قيمة التشوه النسبي ϵ_{cu1} الذي يُعتبر مساوياً إلى (0.0035) .



الشكل 2-3: منحنى الإجهاد – التشوه النسبي للبيتون على الضغط وفق الكود الأوربي (EuroCode2-2004)

σ_c : إجهاد الضغط

ϵ_c : التشوه النسبي للبيتون على الضغط

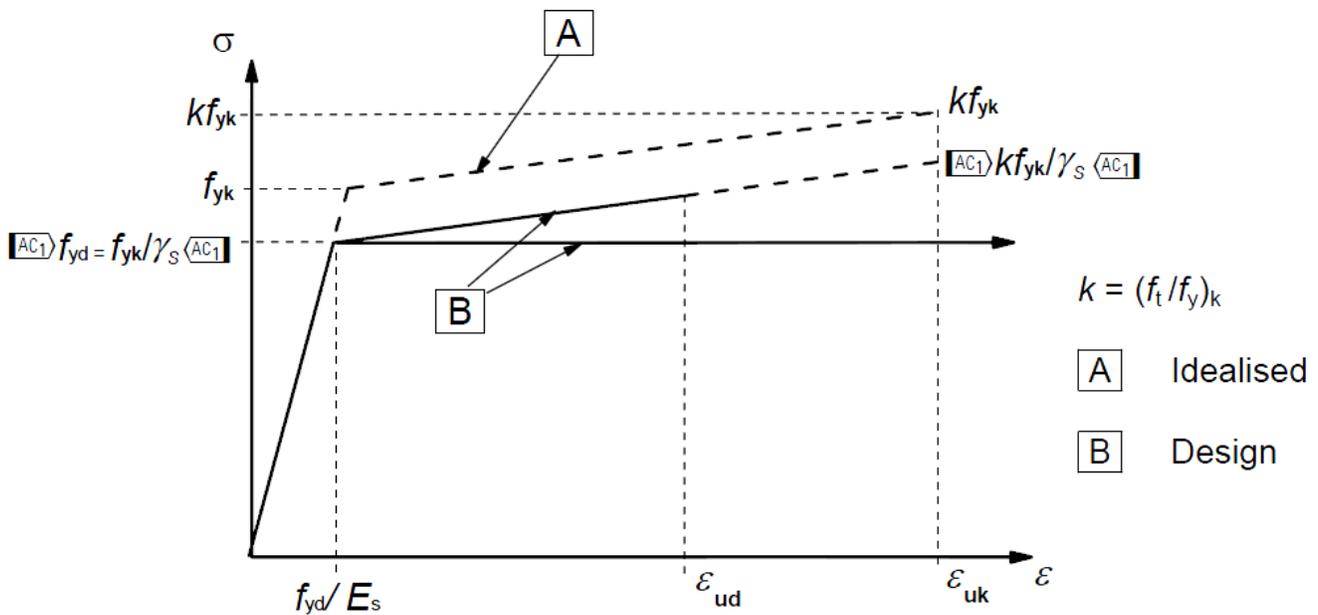
f_{cm} : المقاومة المتوسطة للبيتون على الضغط

ϵ_{c1} : التشوه النسبي الابتدائي للبيتون على الضغط المقابل للإجهاد f_{cm}

ϵ_{cu1} : التشوه النسبي الحدي للبيتون على الضغط المقابل للإجهاد عند الانهيار

أما بالنسبة لفولاذ التسليح فيعطي الكود الأوربي علاقة الإجهاد-التشوه النسبي لفولاذ التسليح كما هو مبين في الشكل /2-4/ حيث يقاوم الحديد قوى الشد. يكون السلوك في البداية مرناً خطياً بمعامل مرونة E_s حتى الوصول إلى إجهاد الخضوع f_{yk} , بعد ذلك يدخل الحديد بمرحلة اللدونة حيث تزداد التشوهات النسبية بشكل كبير مقابل زيادة قليلة في قيمة الإجهادات حتى الوصول إلى الانهيار عند القيمة $K \cdot f_{yk}$, ويبين الشكل ثلاث منحنيات : الأول A يمثل السلوك الحقيقي للفولاذ , والمنحنيين B يمثلان السلوك عند التصميم , فالمستقيم الأفقي يمثل سلوك كامل اللدونة والمستقيم المائل يمثل تخفيض السلوك الحقيقي مقداره

$\cdot \gamma_s$



الشكل/2-4: منحنى الإجهاد – التشوه النسبي لفولاذ التسليح وفق الكود الأوربي (EuroCode2-2004)

إجهاد الخضوع الحقيقي للفولاذ f_{yk}

إجهاد الخضوع التصميمي للفولاذ f_{yd}

قيمة الإجهاد الحقيقي عند الانهيار للفولاذ Kf_{yk}

مقاومة الفولاذ للشد f_t

إجهاد الخضوع للفولاذ f_y

K نسبة إجهاد الانقطاع إلى إجهاد السيلا

ϵ_{ud} التشوه النسبي الأعظمي للفولاذ عند التصميم

ϵ_{uk} التشوه النسبي المقابل لإجهاد الانهيار الحقيقي للفولاذ

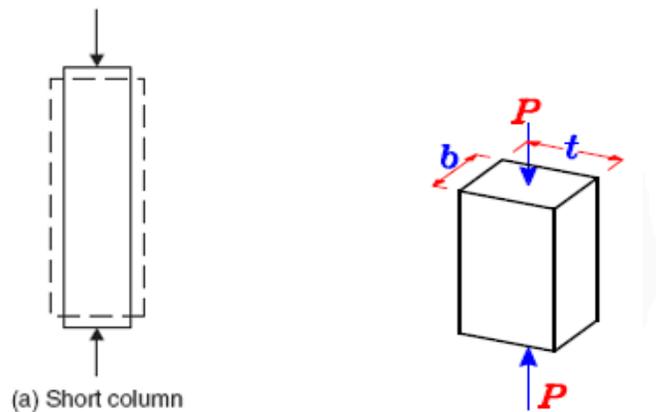
γ_s معامل أمان تصميمي جزئي للفولاذ

3-2 سلوك الأعمدة البيتونية المسلحة:

Behavior of Reinforced Concrete Columns

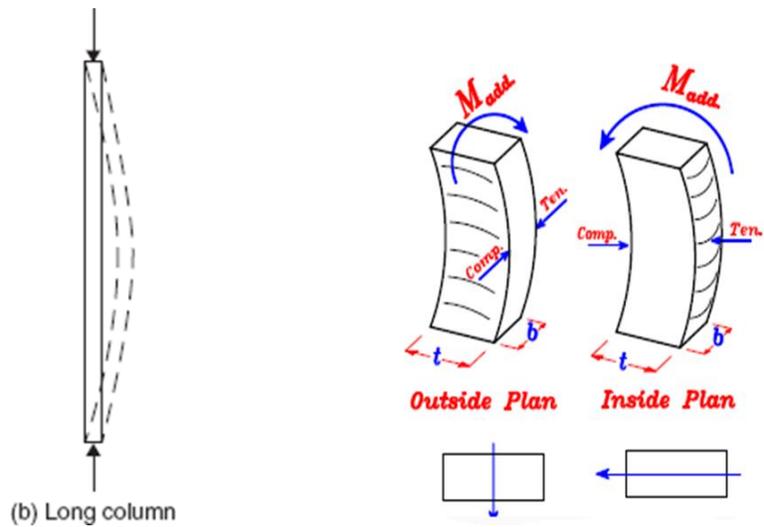
تصنف الأعمدة إلى أعمدة قصيرة وأعمدة طويلة وذلك حسب استجابتها لحصول تحنيب فيها.

تسبب القوى المطبقة على العمود القصير حصول تشوهات ضغط مما يؤدي إلى نقصان في طول العمود بجهة القوة المطبقة، ومع تزايد الحمولة يستمر العمود بالانضغاط إلى أن يتحطم أي تكون مادة البيتون عندها وصلت إلى طاقة تحملها القصوى، في هذه الحالة يكون طول العمود لا يسبب حدوث تحنيب مؤثر فيه أي لا تؤخذ التأثيرات الثانوية بعين الاعتبار ونسمي الانهيار في هذه الحالة انهيار في المادة (Material Failure) (الشكل 5-2).



الشكل 5-2: سلوك الأعمدة القصيرة

تسبب القوى المطبقة في العمود الطويل تشوهات ضغط فقط في المراحل الأولى من التحميل ومع تزايد الحمولة تبدأ التشوهات الجانبية بالظهور أي يحدث انتقالات جانبية بالاتجاه العمودي على القوة المطبقة ويصبح محور العمود غير مستقيم، وقد يؤدي تزايد الحمولة في بعض الحالات التي يكون فيها طول العمود كبير إلى حدوث عدم استقرار في العمود وينهار قبل وصول المادة إلى طاقة تحملها القصوى. ونسمي الانهيار في هذه الحالة انهيار على التحنيب (Instability Failure) (الشكل 2-6)، ولهذا السبب يجب أخذ التأثيرات الثانوية بعين الاعتبار في هذا النوع من الأعمدة حيث تسبب الانتقالات الجانبية نشوء عزوم إضافية تضاف إلى العزوم الأساسية -في حال وجودها- عند التصميم.



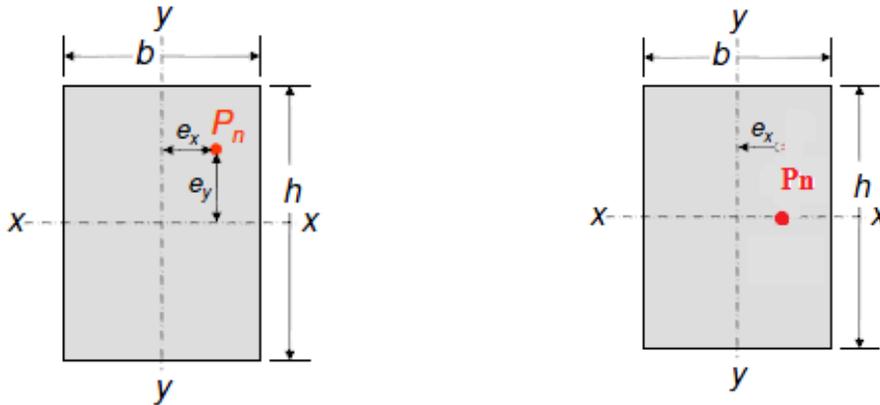
الشكل 2-6: سلوك الأعمدة الطويلة

4-2 مخطط الترابط وعلاقة القوة - العزم:

Interaction Diagram and Moment-force Relation:

نصادف في كثير من المنشآت البيتونية عناصر معرضة لقوى محورية مترافقة مع عزم انعطاف سواء كان هذا العزم مطبق بشكل مباشر أو بشكل غير مباشر عندما تكون القوة مطبقة بشكل لا مركزي بالنسبة لمركز ثقل المقطع العرضي للعنصر، ويمكن أن تكون اللامركزية بسيطة وهي الحالة التي تكون فيها القوة واقعة على أحد محوري تناظر المقطع العرضي ومنحرفة عن مركز الثقل (الشكل 2-7)، أو لامركزية

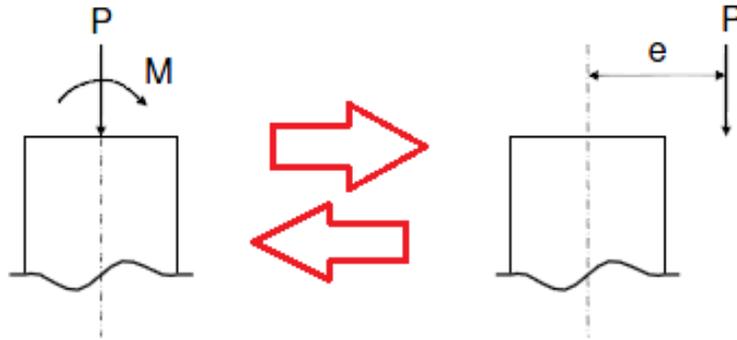
مركبة وهي الحالة التي لا تكون فيها القوة واقعة على أحد محوري التناظر (الشكل 2-8) وفي هذه الحالة ينتج لدينا عزمي انعطاف حول محوري المقطع العرضي للعنصر.



الشكل/2-8: لامركزية مركبة (Assakkaf 2007)

الشكل/2-7: لامركزية بسيطة (Assakkaf 2007)

يمكن استبدال عزم الانعطاف المطبق على العنصر بقوة مطبقة بشكل لا مركزي، كما يمكن استبدال القوة المطبقة بشكل لا مركزي بقوة محورية مطبقة بشكل مركزي مع عزم انعطاف كما يبين الشكل /2-9/.



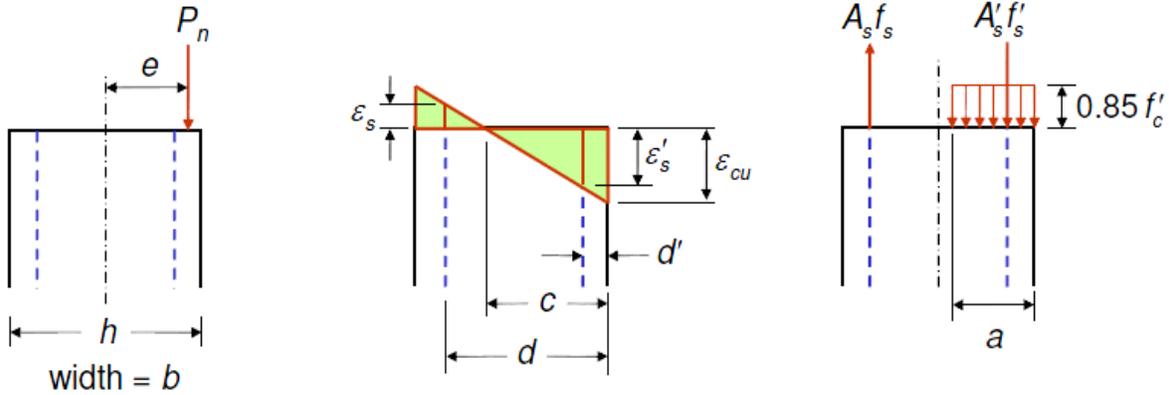
الشكل/2-9: استبدال العزم بقوة مطبقة بشكل لا مركزي (Assakkaf 2007)

في حالة اللامركزية البسيطة يتم استنتاج علاقة القوة والعزم من توازن القوى الداخلية والخارجية في العنصر.

يبين الشكل /2-10/ عمود معرض لقوة ضغط لامركزية وبفرض أن قيمة اللامركزية تسبب تعرض جزء من المقطع البيتونى إلى ضغط والجزء الآخر إلى شد وبإهمال البيتون المشدود ينتج لدينا قوة ضغط في البيتون في جزء من المقطع العرضي $(0.85f_c \cdot a \cdot b)$ وقوة ضغط في قضبان التسليح الواقعة من طرف

القوة (A`s.f`s) وقوة شد في قضبان التسليح الواقعة في الطرف المقابل للقوة (As.fs). ومن توازن القوى يكون:

$$P_n = 0.85f^c.a.b + A`s.f`s - As.fs \dots \dots (1 - 2)$$



الشكل/2-10: عمود معرض لقوة ضغط لامركزية ومخطط التشوهات الناتج (Assakkaf 2007)

وبأخذ مجموع عزوم القوى حول محور العنصر نجد معادلة العزم:

$$M_n = P_n.e = 0.85f^c.a.b \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A`s.f`s \left(\frac{h}{2} - d' \right) + As.fs \left(d - \frac{h}{2} \right) \dots \dots (2 - 2)$$

Pn القوة المطبقة على العمود

Mn العزم الناتج في العمود

As مساحة التسليح المشدود

A`s مساحة التسليح المضغوط

f`c مقاومة الببتون على الضغط

fs قيمة الإجهاد في التسليح المشدود

f`s قيمة الإجهاد في التسليح المضغوط

a الجزء المعرض للضغط في الببتون

b عرض المقطع العرضي

h طول المقطع العرضي

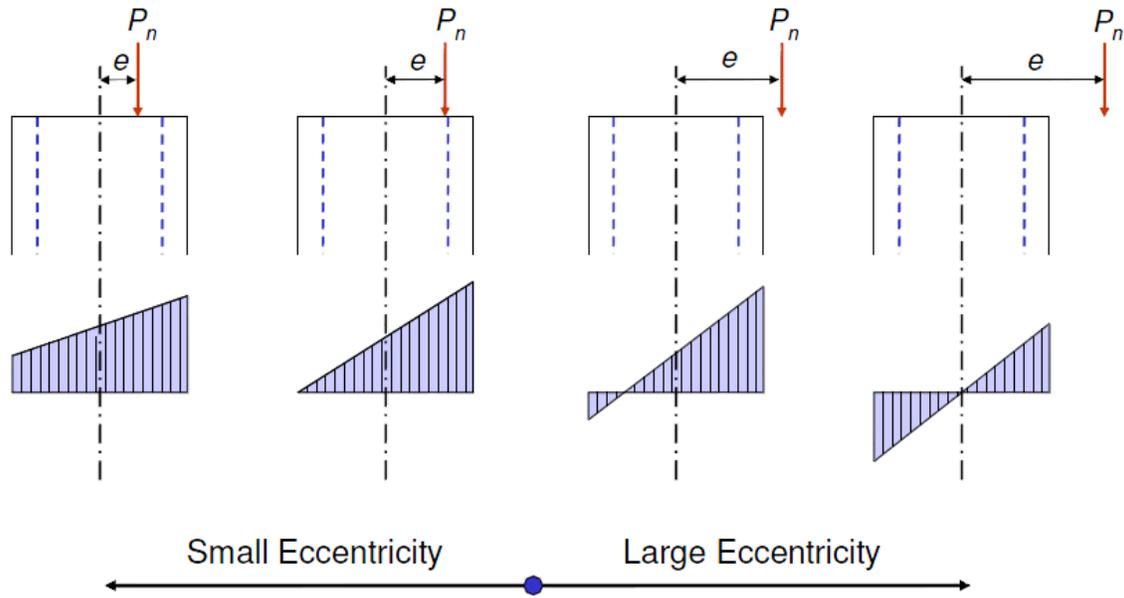
d بعد مركز ثقل التسليح المشدود عن أبعد ليف مضغوط

d` بعد مركز ثقل التسليح المضغوط عن أبعد ليف مضغوط

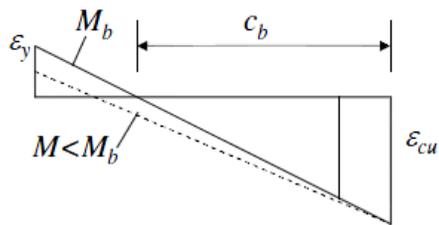
نسمي المعادلتين (1-2) و (2-2) بمعادلات الضغط اللامركزي، ويتم عادة تخفيضهما بمعامل Ω تختلف قيمته باختلاف الكود المعتمد في التصميم.

إن اختلاف قيمة اللامركزية e يؤثر على حالة انهيار العنصر (الشكل 2-11): ففي اللامركزية صغيرة تكون التشوهات في البيتون وصلت إلى القيمة الحدية $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0.003$ أما الإجهادات في الفولاذ المشدود فتكون أصغر من إجهاد الخضوع $f_s < f_y$ ويكون الانهيار على الضغط (Compression Failure)، أما في اللامركزية الكبيرة فتكون التشوهات في البيتون وصلت إلى القيمة الحدية $\varepsilon_c = 0.003$ والإجهادات في الفولاذ المشدود تكون أكبر من إجهاد الخضوع $f_s > f_y$ ويكون الانهيار على الشد (Tension Failure).

أما الحالة الفاصلة بين الحالتين السابقتين فتسمى بالحالة التوازنية Balance Failure وفيها يكون كل من البيتون والفولاذ المشدود وصل إلى الحالة الحدية $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ و $\varepsilon_s = \varepsilon_y$.



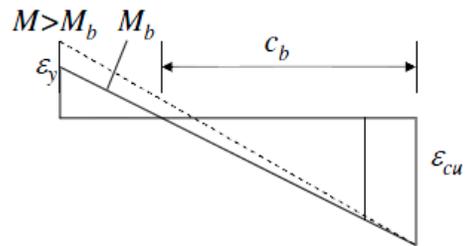
Case 1: $e < e_b$



$$c > c_b \rightarrow \epsilon_s < \epsilon_y \rightarrow f_s < f_y$$

Compression Failure

Case 2: $e > e_b$

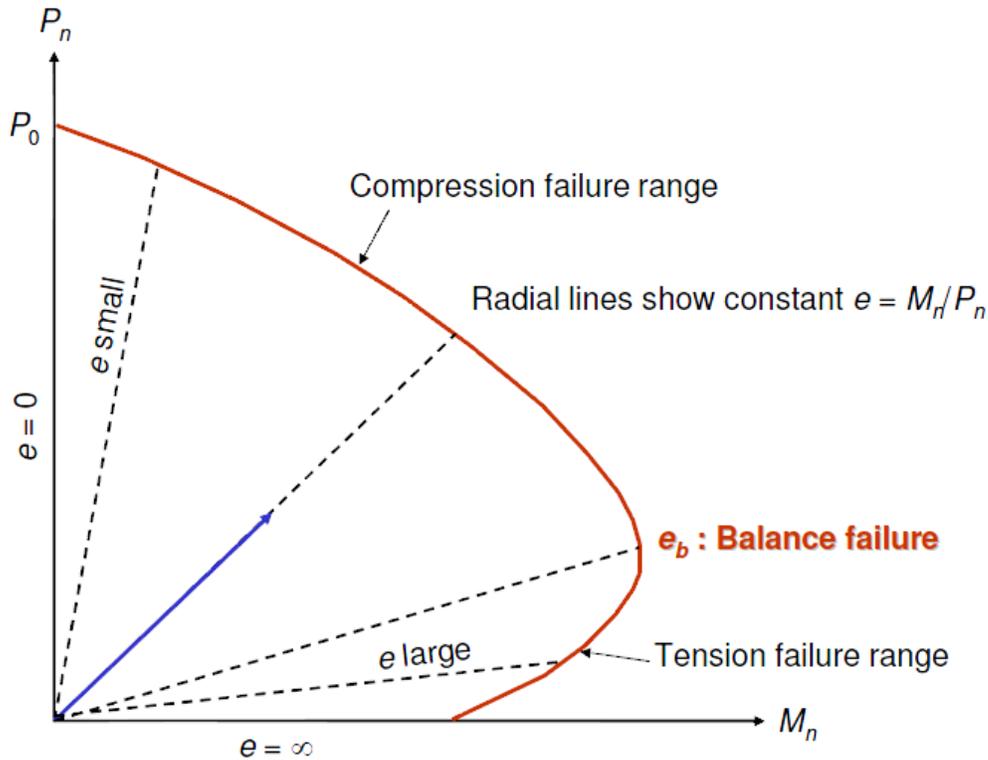


$$c < c_b \rightarrow \epsilon_s > \epsilon_y \rightarrow f_s > f_y$$

Tension Failure

الشكل (11-2): تأثير اللامركزية على حالة الانهيار (Assakkaf 2007)

يتم التعبير عن علاقات الضغط اللامركزي بمنحني مخطط الترابط Interaction Diagram، فمن أجل أي لامركزية ينتج لدينا زوج من القوة والعزم (Mn,Pn) ويرسم مجموعة من هذه الثنائيات من أجل لا مركزيات مختلفة ينتج لدينا مخطط الترابط (الشكل 12-2).



الشكل/2-12: منحنى مخطط الترابط (Assakkaf 2007)

يمثل المحور الأفقي العزم المطبق على المقطع (M_n) والمحور الشاقولي القوة المطبقة (P_n)، أما ميل الخط الواصل بين مبدأ الاحداثيات ونقطة ما من المخطط مع المحور الشاقولي فيمثل اللامركزية للنقطة المدروسة.

يوضح المخطط النقطة التوازنية e_b حيث يحدث الانهيار على الضغط عندما تكون $e < e_b$ بينما يحدث الانهيار على الشد عندما تكون $e > e_b$.

نستطيع من خلال مخطط الترابط التحقق من المقطع المعرض لقوة محورية مع عزم انعطاف محدد، ففي حال كانت النقطة التي تمثل القوة والعزم (M_n, P_n) واقعة على المخطط أو داخله فالمقطع محقق أما إذا كانت النقطة واقعة خارج المنحنى فالمقطع غير محقق ويجب إعادة تصميمه.

5-2 أنماط انهيار الأعمدة وعلاقتها بمخطط الترابط: (Kawk and Kim, 2004)

Failure modes of columns and its relation with interaction diagram

تعد الأعمدة البيتونية المسلحة إحدى العناصر الإنشائية الهامة في المنشأ البيتوني وهي تخضع إلى حمولات محورية بالإضافة إلى عزوم انعطاف والتي تنتج عن طبيعة استناد جوائز البلاطة والأعمدة في الطوابق الأخرى أو تنتج عن وجود لا مركزية في الحمولات المطبقة. وبسبب التركيب الناتج عن الحمولة المحورية وعزم الانعطاف فإن المقطع العرضي للعمود يجب أن يُصمم بحيث نضمن أن القوى المطبقة على العنصر والتي تسبب انهيار العمود واقعة داخل مخطط الترابط وهي تمثل قدرة تحمل العمود.

في الأعمدة القصيرة عندما لا تؤخذ التأثيرات الثانوية (P-Δ effect) بعين الاعتبار فإن معادلة العزم للمقطع العرضي تتمثل بالعلاقة:

$$M=P.e \dots (3-2)$$

M: العزم الناتج في المقطع العرضي للعمود

P: القوة المطبقة على العمود

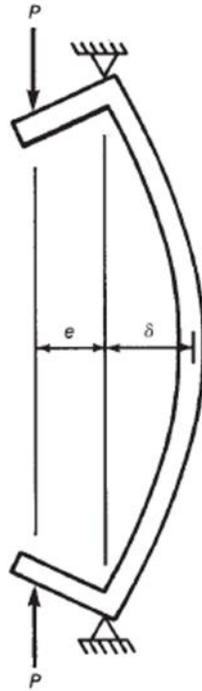
e: اللامركزية الابتدائية للقوة المطبقة.

وتكون العلاقة بين القوة P وعزم الانعطاف M علاقة خطية متمثلة بالمنحني O-A المبين في الشكل (2-14). وتصل المادة في هذه الحالة إلى طاقة تحملها القصوى عند النقطة A أي عند تقاطع منحنى معادلة العزم مع مخطط الترابط ويسمى الانهيار هنا بالانهيار بسبب المادة أو (Material Failure).

مع زيادة نسبة نحافة العمود تبدأ التأثيرات الثانوية بالظهور (P-Δ effect) وينتج انتقالات جانبية إضافية ناتجة عن التحنيب (الشكل 2-13) وتتمثل معادلة العزم في المقطع العرضي في هذه الحالة بالمعادلة:

$$M=P.(e+\delta) \dots (4-2)$$

حيث: δ: الانتقالات الجانبية الإضافية الناتجة عن التحنيب.

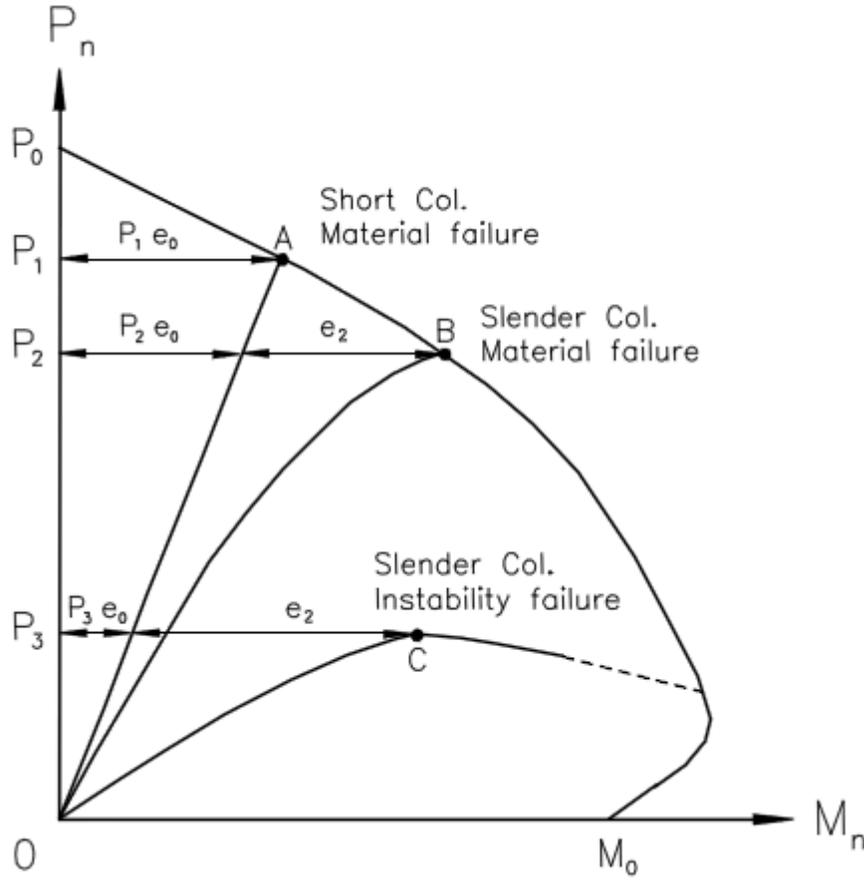


الشكل/2-13: الانتقالات الجانبية الإضافية في العمود بسبب التحنيب (Kawk and Kim, 2004)

وتصبح العلاقة بين القوة P وعزم الانعطاف M علاقة غير خطية وتتمثل بالمنحني O-B المبين في الشكل (2-14)، حيث نلاحظ أن نقطة الانهيار وهي النقطة B واقعة على مخطط الترابط ولكن بقيمة أقل من النقطة A، وهذا الانخفاض في مقدار القوة يسمى بتأثير النحافة (Slenderness effect).

عندما تصبح نسبة النحافة كبيرة بحيث يصبح العمود طويل فإن أثر التحنيب يزداد وتصبح الانتقالات الجانبية الإضافية كبيرة وتصبح علاقة القوة P وعزم الانعطاف M ممثلة بالمنحني O-C المبين في الشكل (2-14). حيث نلاحظ أن النقطة C وهي نقطة الحمولة العظمى لا تصل إلى منحنى مخطط الترابط وإنما تقع داخله وهذا يعني أن الانهيار هنا حدث بسبب عدم استقرار العمود أو ما يسمى (Instability Failure).

وعليه فإن نسبة النحافة عندما تكون بقيم صغيرة فلا تؤثر على انهيار العمود، ومع ازدياد قيمة النحافة يبدأ تأثيرها في خفض قدرة تحمل العمود، ثم عندما تصبح النحافة بقيم كبيرة يحصل الانهيار على فقدان الاتزان قبل الوصول إلى طاقة التحمل العظمى للمقطع.

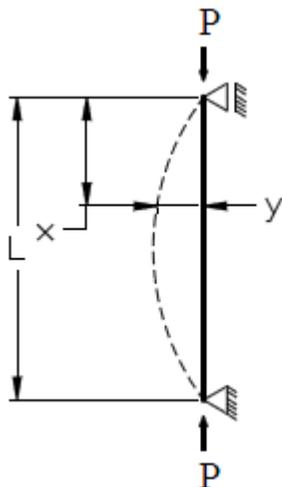


الشكل/2-14: منحنى مخطط الترابط وحالات انهيار الأعمدة (Kawk and Kim, 2004)

6-2 علاقة أويلر Euler formula:

تسمى الحمولة المحورية الأصغرية في العناصر المعرضة للضغط والتي يبدأ عندها العنصر بالانحناء خارج مستويه بحمولة أويلر للتحنيب Euler Buckling Load أو حمولة التحنيب الحدية Critical Buckling Load والتي تعتمد على الخصائص الميكانيكية والهندسية للعنصر (الطول - أبعاد المقطع العرضي - معامل المرونة - شروط الاستناد).

بفرض لدينا عمود طويل معرض لقوة ضغط كما هو مبين في الشكل/2-15.



الشكل/2-15: عمود معرض لقوة ضغط محورية (Beer et al,2012)

تُعطى المعادلة التفاضلية للانتقال الجانبي بالعلاقة /5-2/ (Beer et al,2012):

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} = EIy'' \quad \dots (5-2)$$

E: معامل المرونة

I: عزم العطالة حول المحور الذي يحصل فيه الانعطاف

P: القوة المحورية المطبقة

M: العزم الناتج عند المسافة x من المسند

ويُعطى العزم بالعلاقة /6-2/ (Beer et al,2012):

$$M = -p \cdot y \quad \dots (6-2)$$

وبالتالي:

$$y'' = \frac{M}{EI} = -\frac{p \cdot y}{EI} \quad \dots (7-2)$$

$$y'' + \frac{p}{EI}y = 0 \rightarrow y'' + k^2 \cdot y = 0 \quad \dots (8-2)$$

$$k^2 = \frac{p}{EI} \quad \dots (9-2)$$

يُعطى الحل العام للمعادلة التفاضلية السابقة بالعلاقة (10-2) (Beer et al,2012):

$$y = A \cdot \cos kx + B \cdot \sin kx \quad \dots (10-2)$$

بالاعتماد على الشروط المحيطية نجد:

$$x = 0 \rightarrow y = 0 \rightarrow A = 0$$

$$y = B \cdot \sin kx \quad \dots (11-2)$$

$$x = L \rightarrow y = 0 \rightarrow B \cdot \sin kL = 0$$

إما $B=0$ وبالتالي تكون $y=0$ دوماً , وهذا الحل مرفوض.

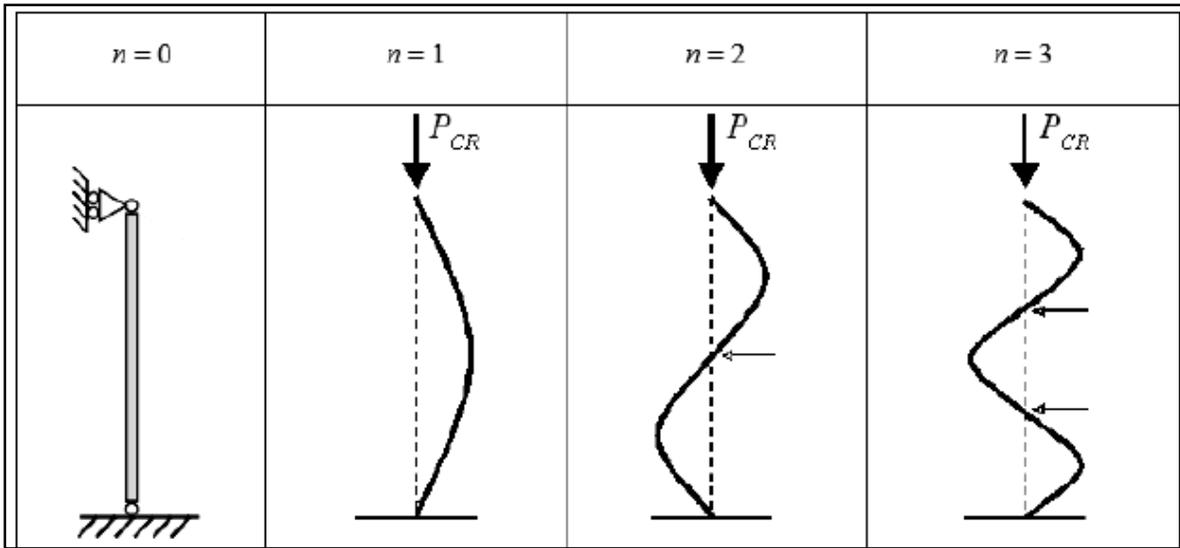
أو $\sin kL = 0$ إذاً $kL = 0$ أو $kL = n \cdot \pi$

$$kL = n \cdot \pi \rightarrow k^2 \cdot L^2 = n^2 \cdot \pi^2 \rightarrow \frac{n^2 \cdot \pi^2}{L^2} = k^2 \quad \dots (12-2)$$

إذاً:

$$P_E = EI \frac{n^2 \cdot \pi^2}{L^2} \quad \dots (13-2)$$

حيث يعبر n عن عدد أنصاف الموجات المتشكلة في العمود والتي تعتمد على شروط الاستناد (الشكل 2-16).



الشكل/2-16: أنصاف الموجات المتشكلة في العمود (Wang et al 2005)

وباعتبار أن : $L_{eff} = L/n$

يمكننا كتابة العلاقة السابقة كما يلي:

$$P_E = \frac{EI \cdot \pi^2}{L_{eff}^2} \quad \dots (14-2)$$

وهي علاقة أويلر النهائية.

P_E الحمل المحورية التي تسبب التحنيب (حمولة أويلر)

E معامل مرونة الببتون

I عزم عطالة المقطع العرضي

L_{eff} الطول المكافئ للعمود

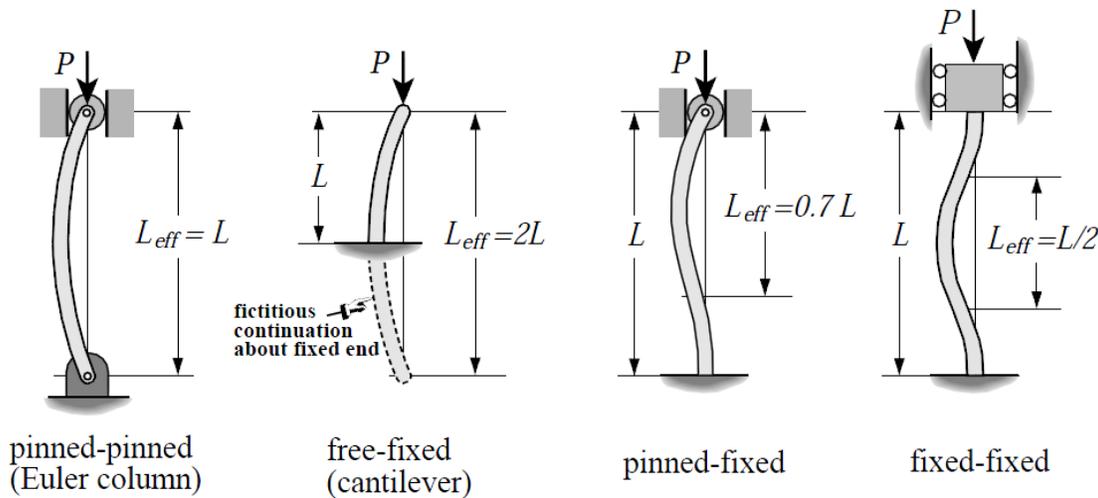
ويؤخذ الطول المكافئ للعمود L_{eff} حسب شروط الاستناد كما يبين الشكل (2-17) حيث يؤخذ:

للعמוד المتمفصل من الطرفين. $L_{eff}=1L$

للعמוד الموثوق من الطرفين. $L_{eff}=0.5L$

للعמוד المتمفصل من طرف والموثوق من طرف. $L_{eff}=0.7L$

للعמוד الحر (الظفر). $L_{eff}=2L$



الشكل 2-17: الطول المكافئ في الأعمدة حسب شروط الاستناد (Beer et al,2012)

إن المشكلة الأهم في علاقة أويلر هي تحديد قيمة القساوة EI وذلك لأن مادة الببتون المسلح غير متجانسة فالببتون مادة سلوكها لا خطي nonlinearity of material ويخضع لتأثير السيلان Creep والانكماش Shrinkage بينما الحديد لا يتأثر بها، لذلك ليس من السهل إيجاد قيمة EI الدقيقة.

يوصي الكود الأمريكي ACI 318M-08 بأخذ قيمة EI وفق العلاقة (2-15):

$$EI = \frac{0.2Ec.Ig + Es.Ise}{1 + \beta_{dns}} \dots (15-2)$$

أو العلاقة (16-2):

$$EI = \frac{0.4Ec.Ig}{1+\beta_{dns}} \dots (16-2)$$

إن العلاقة (15-2) تم اشتقاقها من أجل لامركزيات صغيرة وحمولات كبيرة حيث يكون أثر النحافة واضحاً، أما العلاقة (16-2) فهي شكل مبسط للعلاقة (15-2) وأقل دقة.

E_c : معامل مرونة البنتون. ويؤخذ وفق الكود الأمريكي حسب العلاقة (17-2):

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \dots (17-2)$$

E_c معامل مرونة البنتون (MPa)

f_c مقاومة البنتون على الضغط (MPa)

E_s معامل مرونة الفولاذ (MPa)

I_g عزم عطالة المقطع البنتوني الكلي بإهمال التسليح (mm^4)

I_{se} عزم عطالة قضبان التسليح حول مركز ثقل المقطع العرضي (mm^4)

β_{dns} عامل يأخذ بعين الاعتبار تأثير السيلان ويساوي النسبة بين الحمولة الأعظمية الدائمة المصعدة إلى الحمولة الكلية المصعدة ($\beta_{dns} \leq 1$).

للتبسيط يمكن اعتبار قيمة $\beta_{dns} = 0.6$ وعند تعويضها بالعلاقة (16-2) ينتج لدينا العلاقة (18-2):

$$EI = 0.25E_c.I_g \dots (18-2)$$

وسيتم اعتماد هذه العلاقة في هذا البحث لاحقاً.

7-2 علاقات الكود العربي السوري في حساب الأعمدة Syrian Code Formula :

يتم تحديد نوع العمود وفق الكود العربي السوري عن طريق معامل النحافة λ الذي يُعطى بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{L_o}{i} \dots (18-2)$$

L_0 الطول الفعال (المكافئ) للعمود

I نصف قطر العطالة للمقطع العرضي. ويعطى بالعلاقة:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \dots (19-2)$$

I عزم عطالة المقطع العرضي

A مساحة المقطع العرضي

يؤخذ الطول المكافئ للعمود L_0 للأعمدة المسندة جانبياً كما يلي:

$L_0=L$ حالة عنصر متمفصل من طرفيه

$L_0=0.85L$ حالة عنصر متمفصل من طرف ومثبت من الطرف الآخر (وثاقه جزئية)

$L_0=0.7L$ حالة عنصر مثبت (وثاقه جزئية) من الطرفين

$L_0=L$ حالة الأبنية العادية

أما الأعمدة غير المسندة جانبياً فيؤخذ الطول المكافئ حسب العلاقة (20-2):

$$L_0 = \alpha L \dots (20-2)$$

A : معامل يؤخذ من الشكل (4-7) في الفقرة (1-5-1-7) من الكود.

يجب ألا تزيد نحافة العنصر المضغوط في كل اتجاه عن 100 ($\lambda \leq 100$) إلا في حالات خاصة.

في جميع الحالات يجب ألا تزيد النحافة في كل اتجاه عن 150.

- يعتبر الكود أن العمود قصير $\lambda \leq 40$ ولا داعي لأخذ أثر التحنيب. وتُحسب قدرة تحمل العمود بالعلاقات التالية:

○ في الحالة الاستثمارية:

حالة الأساور العادية:

$$N = \frac{0.3 f_c}{K_e} \left(A_c + 1.17 \frac{f_y}{f_c} A_s \right) \quad (21 - 2)$$

في حالة الأساور الحلزونية:

$$N = \frac{0.3 f_c}{Ke} \left(A_k + 1.17 \frac{f_y}{f_c} A_s + 3 \frac{f_{yp}}{f_c} A_{sp} \right) \quad (22 - 2)$$

○ في الحالة الحديدية:

أساور عادية:

$$N_u = \frac{0.8}{Ke} (0.85 f_c \cdot A_c + f_y \cdot A_s) \quad (23 - 2)$$

أساور حلزونية:

$$N_u = \frac{0.85}{Ke} (0.85 f_c \cdot A_k + f_y \cdot A_s + 2.5 f_{yp} \cdot A_{sp}) \quad (24 - 2)$$

Nu قدرة التحمل الحديدية للعمود في الحالة الحديدية (N)

N قدرة التحمل الحديدية للعمود في حالة الاستثمار (N)

f_c المقاومة المميزة الاسطوانية للبيتون على الضغط (MPa)

A_c مساحة المقطع العرضي للبيتون (mm²)

f_y إجهاد السيلان في فولاذ التسليح (MPa)

A_s مساحة المقطع العرضي لقضبان التسليح (mm²)

Ω عامل تخفيض المقاومة ويؤخذ 0.7

f_{yp} إجهاد الخضوع للتسليح الحلزوني (MPa)

A_{sp} المساحة المكافئة للأساور الحلزونية (mm²)

A_k مساحة مقطع النواة الداخلية للحلزون (mm²)

Ke عامل يأخذ بعين الاعتبار موقع العمود

- عندما تكون $40 \leq \lambda \leq 80$ يعتبر الكود أن العمود طويل ويسمح بأخذ أثر التحنيب عن طريق تقسيم علاقات حساب الأعمدة القصيرة المعرضة للضغط البسيط على المعامل Kb وذلك عند تحقق الشرطين التاليين (حسب الفقرة 10-3-3-4 في الكود):

- أن يكون المقطع متناظر

- أن لا تقل نسبة التسليح الموجودة في كل طرف من طرفي المقطع بالاتجاه المقاوم للتحنيب عن 0.003 من مساحة المقطع الكلية، وألا تزيد نحافة العمود عن 80. ونحصل على المعامل Kb وفق قيمة λ حسب الجدول (3-2) المبين:

الجدول/3-2: قيم المعامل Kb (الكود العربي السوري 2004)

$\lambda = \frac{L}{i}$	40	42	44	46	48	50	55	60	65	70	75	80
المقطع المستطيل L/b	11.5	12.1	12.7	13.3	13.9	14.4	15.9	17.3	18.8	20.2	21.7	23.1
المقطع الدائري L/d	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.7	15.0	16.2	17.5	18.7	20
k_b	1.00	1.02	1.04	1.07	1.10	1.13	1.20	1.35	1.6	1.95	2.40	3.00

أما بحال $\lambda > 80$ فيجب أخذ أثر التحنيب عن طريق حساب العزم الإضافي الناتج عن التحنيب بضرب القوة الناظمية الأعظمية المؤثرة على العنصر باللامركزية الإضافية الناتجة من تشوه العمود وإضافة هذا العزم إلى العزم الأصلي المؤثر على العمود ومن ثم تصميم المقطع باستخدام علاقات الضغط اللامركزي. ويجب ألا تزيد نسبة النحافة عن 100 إلا في حالتين:

1- عندما يجري تحليل حسابي للمنشأة بالطرائق الدقيقة مع أخذ الأفعال من الدرجة الثانية بالحسبان

(تأثير $P-\Delta$) (أي تأثير انحراف المنشأة على القوة الداخلية فيها).

2- في العناصر المضغوطة ذات الأهمية الثانوية كالعناصر التزيينية أو المتقاربة.

وفي جميع الحالات يجب ألا تزيد نحافة العضو المضغوط في كل اتجاه على 150.

8-2 الدراسات التجريبية: Experimental Researches

أجريت العديد من الدراسات التجريبية حول موضوع قدرة تحمل الأعمدة بنسب نحافة مختلفة، نذكر منها الأبحاث التالية:

1-8-2 السلوك الإنشائي للأعمدة البيتونية المربعة: (A.Belouar et al 2013)

تم في هذا البحث إجراء دراسة تجريبية على أعمدة بيتونية مسلحة بمقطع مربع حيث تم تحميلها حتى الانهيار بضغط مركزي والتحقق من الاتجاهين المحوري والأفقي. بارامترات التجربة هي نسبة النحافة ومقاومة البيتون على الضغط. تم تسجيل التشوهات المحورية والقطرية وكذلك إجهادات الضغط لتقييم العلاقة بين الإجهاد والتشوه، المتانة الحديدية، القساوة، ومطاوعة العينات.

تم استخدام نوعين من خلائط البيتون: البيتون العادي (NSC – 25 MPa) والبيتون عالي المقاومة (HSC – 60 MPa). قطر التسليح الطولي المستخدم 12 مم وللتسليح العرضي 8 مم، نسبة التسليح الطولي ثابتة وتساوي 2.25%. حد السيالان للتسليح الطولي 500 MPa وللتسليح العرضي 235 MPa. يبين الجدول (4-2) مواصفات العينات، حيث يشير الحرف N إلى البيتون العادي والرمز H إلى البيتون عالي المقاومة، والرمز P يشير إلى البيتون دون تسليح، وتشير كل من الأحرف z, y, x إلى نسبة النحافة حيث $x=L/a=2$, $y=L/a=4$, $z=L/a=7.14$.

a طول ضلع المقطع العرضي

L طول العمود

الجدول /4-2/: مواصفات العينات (A.Belouar, et al 2013)

Specimen designation	Dimensions (side x high) mm	Number of specimens	Slenderness ratio
PN x	140 x 140 x 280	2	2
N x	140 x 140 x 280	2	2
N y	140 x 140 x 560	2	4
N z	140 x 140 x 1000	2	7.14
PH x	140 x 140 x 280	2	2
H x	140 x 140 x 280	2	2
H y	140 x 140 x 560	2	4
H z	140 x 140 x 1000	2	7.14

تم تحميل العينات بضغط محوري حتى الانهيار وتم تطبيق الحمولة بمعدل 0.24 MPa/s.

يبين الجدول (5-2) نتائج التجربة حيث:

f_{co} إجهادات الضغط.

ϵ_{co} التشوهات بالاتجاه الطولي

ϵ_{ho} التشوهات بالاتجاه العرضي

الجدول /5-2/: نتائج التجربة (A.Belouar, et al 2013)

Specimen designation	f_{co} (MPa)	ϵ_{co} ‰	ϵ_{ho} ‰
PN x	24.77	2.2	3.88
N x	33.59	7.61	17.00
N y	30.49	1.67	9.78
N z	24.69	0.96	-
PH x	59.53	3.66	3.31
H x	63.79	3.05	10.30
H y	63.62	2.05	0.35
H z	69.98	2.08	0.49

يُلاحظ أن زيادة نسبة النحافة يخفض من قدرة تحمل العمود حيث تقل إجهادات الضغط الناتجة، ولكن البيتون عادي المقاومة يبدي انخفاض أكبر من البيتون عالي المقاومة، كما يُلاحظ انخفاض في قيمة التشوهات الطولية مع زيادة نسبة النحافة، أي أن البيتون عالي المقاومة يُظهر قساوة أكبر من البيتون العادي عند زيادة نسبة النحافة.

2-8-2 سلوك المطاوعة للأعمدة البيتونية عالية المقاومة (J. Saravanan et al 2012)

يتناول هذا البحث نتائج الدراسة التي أجريت على أداء الأعمدة البيتونية عالية المقاومة تحت تأثير الضغط المحوري. تم اختبار الأعمدة تحت تأثير الضغط المحوري المنتظم حتى الانهيار. تم إجراء التجربة على أعمدة دائرية بقطر 150 mm ونسبة النحافة 8 , 16 , 24 , و 32 . التسليح الطولي يتألف من 6 قضبان بقطر 8 mm والتسليح العرضي عبارة عن أساور عرضية بقطر 6 mm كل 115 mm. مقاومة البيتون على الضغط 60 MPa، حد السييلان للتسليح الطولي 450 MPa وللأساور العرضية 300 MPa. قدرة تحمل آلة تطبيق الحمولة 2000 kN. تفاصيل العينات مبينة في الجدول/6-2/.

الجدول /6-2/: تفاصيل العينات في التجربة (J.Saravanan et al ,2012)

Details of specimens	Diameter (mm)	Height (mm)	Nominal slenderness
S8	150	300	8
S16	150	600	16
S24	150	900	24
S32	150	1200	32

يوضح الشكل /18-2/: توضع العينة ضمن جهاز الاختبار.



الشكل/2-18: توضع العينة ضمن جهاز الاختبار (J. Saravanan et al ,2012)

يبين الجدول/2-7/ النتائج من حيث الحمولة الحديدية والتشوهات.

الجدول/2-7: نتائج التجربة (J.Saravanan et al ,2012)

Specimen designation	Ultimate load (kN)	Ultimate deflection (mm)	Ultimate stress (MPa)	Ultimate axial micro-strain ($\mu\epsilon$)	Deflection ductility	Energy ductility
S8R0	1150	2.93	65.08	9766.67	1.47	1.74
S16R0	1080	3.01	61.12	5016.67	1.43	1.66
S24R0	1000	3.29	56.59	3655.56	2.01	3.23
S32R0	900	3.45	50.93	2875.00	1.99	3.42

يُلاحظ زيادة في الاجهاد الحدي كلما قلت نسبة النحافة. الأعمدة ذو نسبة النحافة 24 , 16 , 8 , تظهر زيادة في الإجهاد الحدي بنسبة 11.11% , 20.01% , 27.78% على الترتيب, عند مقارنتها مع العمود ذو نسبة النحافة 32.

يزداد التشوه المحوري مع نقصان نسبة النحافة. الأعمدة ذو نسبة النحافة 24 , 16 , 8 , تظهر زيادة في التشوه المحوري الحدي بنسبة 27.14% , 74.4% , 239.71% على الترتيب عند مقارنتها مع العمود ذو نسبة النحافة 32 .

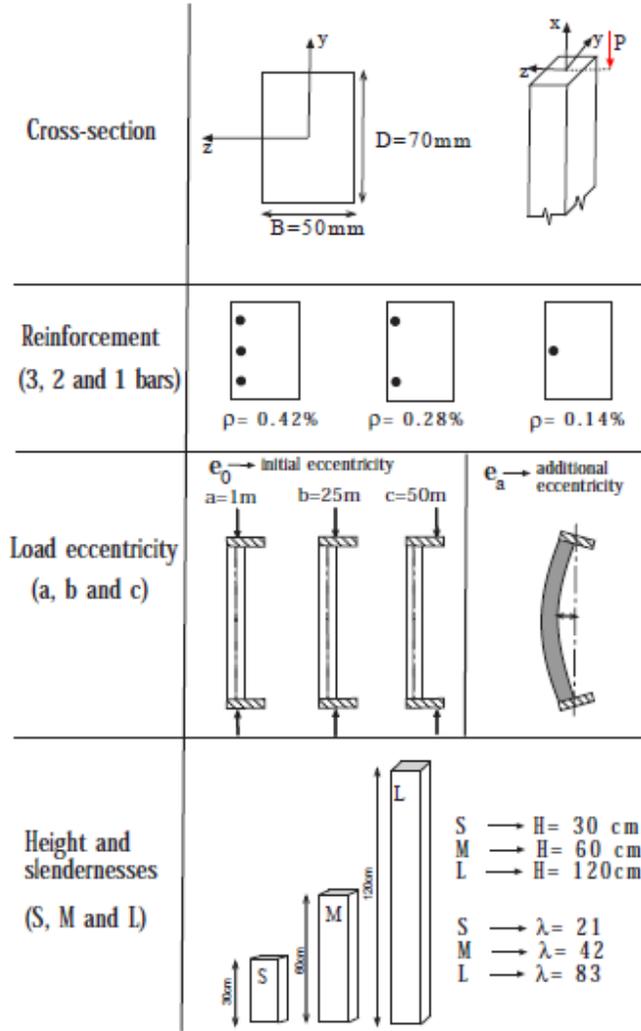
الأعمدة ذو نسبة النحافة 24 , 16 , 8 , تظهر زيادة في التشوهات الجانبية الحديدية بنسبة 3.42% , 2.09% , 13.01% على الترتيب عند مقارنتها مع العمود ذو نسبة النحافة 32 .

3-8-2 دراسة تجريبية لانهايار العناصر المسلحة بتسليح خفيف والخاضعة لضغط لا مركزي (R.Porras et al 2009)

في هذا البحث تمت دراسة أثر نسبة التسليح ومعامل النحافة واللامركزية على سلوك العناصر المعرضة للضغط اللامركزي وانهايارها.

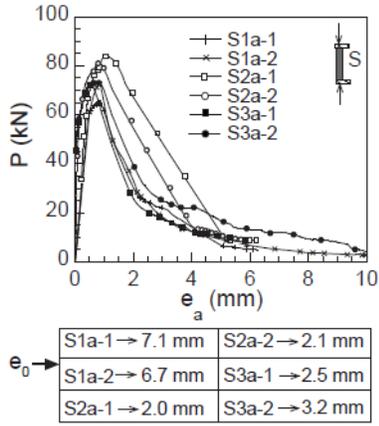
تم استخدام أعمدة بمقطع مستطيل بأبعاد 70*50 mm وبنسب تسليح منخفضة , 0.28% , 0.14% , 0.42% , أما قيم معامل النحافة فكانت 83 , 42 , 21 = λ , وقيم اللامركزية المدروسة , 25 , 1 = e_o , 50 mm كما هو مبين في الشكل /19-2/.

مقاومة البيتون على الضغط $f_c = 36.5$ MPa ومعامل المرونة $E_c = 26000$ MPa ومقاومة البيتون على الشد $f_t = 3.9$ MPa . معامل مرونة الفولاذ المستخدم $E_s = 188000$ MPa وحد السيلان $f_y = 458$ MPa.

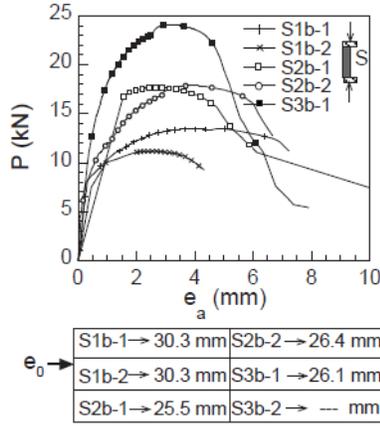


الشكل /19-2/ تفاصيل الأعمدة المستخدمة في التجربة (R.Porrás, et al , 2009)

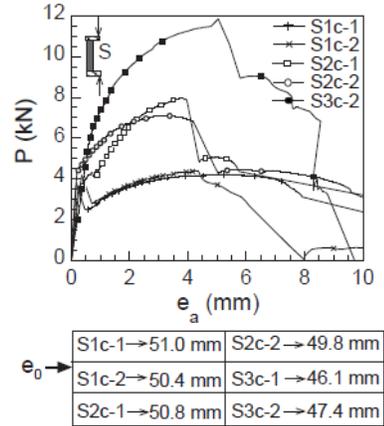
تم رسم منحنيات الحمولة P مع الانتقال الجانبي عند منتصف الارتفاع ea , كما في الشكل /20-2/. نلاحظ أن المنحنيات تبدأ بشكل خطي، ثم بعد ذلك تبدأ المرحلة اللاخطية قبل الوصول إلى الحمولة العظمى، ونلاحظ انخفاض في قيمة الحمولة العظمى بزيادة النحافة أو بزيادة اللامركزية الابتدائية. ومن الملاحظ أنه من أجل قيمة محددة لمعامل النحافة فإن زيادة اللامركزية الابتدائية يحسن من المطاوعة، وأيضا من أجل قيمة محددة للامركزية الابتدائية فإن زيادة معامل النحافة تؤدي إلى تحسين المطاوعة في العنصر.



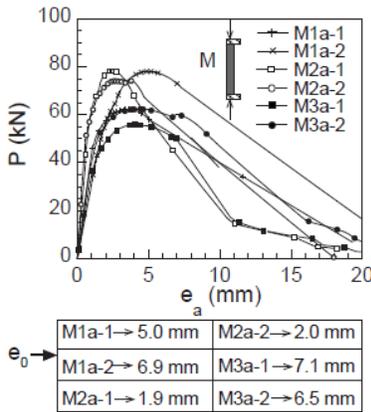
$\lambda=21, e_o=1\text{mm}$



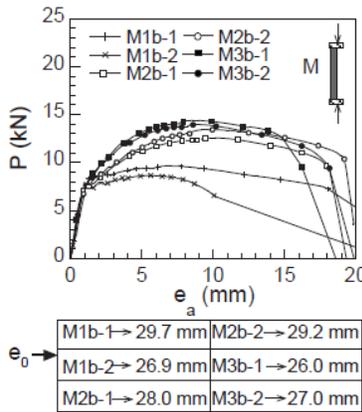
$\lambda=21, e_o=25\text{mm}$



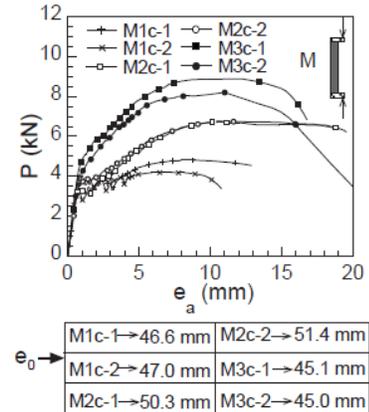
$\lambda=21, e_o=50\text{mm}$



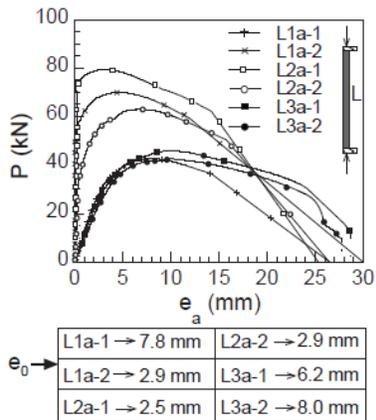
$\lambda=42, e_o=1\text{mm}$



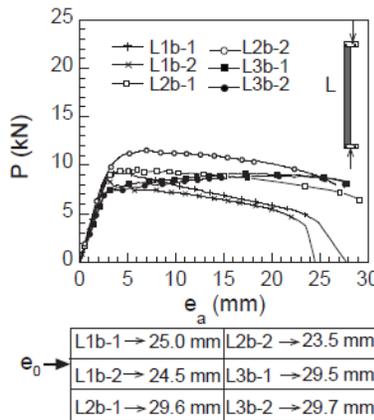
$\lambda=42, e_o=25\text{mm}$



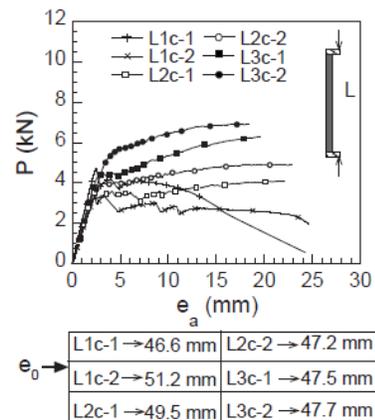
$\lambda=42, e_o=50\text{mm}$



$\lambda=83, e_o=1\text{mm}$



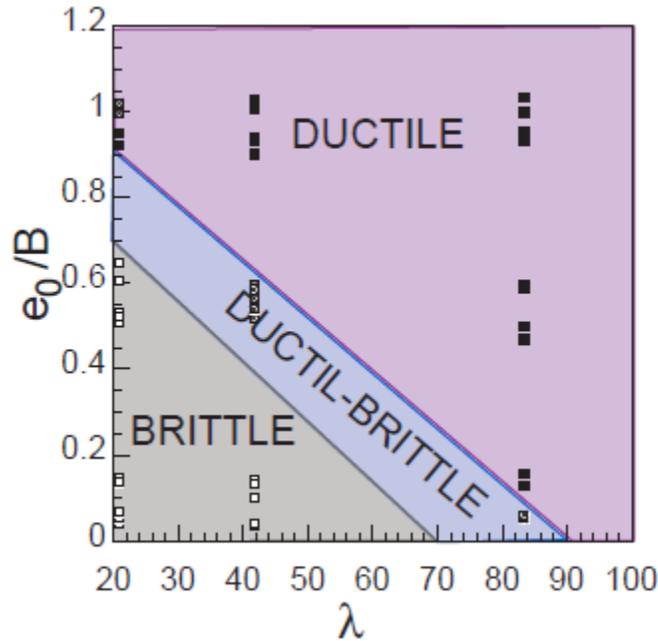
$\lambda=83, e_o=25\text{mm}$



$\lambda=83, e_o=50\text{mm}$

الشكل 20-2/ نتائج اختبار العينات: منحنيات الحمل-الانفعال الجانبية (R.Porras, et al , 2009)

بناء على ماسبق تم تصنيف سلوك العناصر إلى سلوك هش او مطاوع او مطاوع-هش وذلك بالاعتماد على قيم معامل النحافة واللامركزية الابتدائية كما هو مبين في الشكل /21-2/.



الشكل /21-2/: تصنيف سلوك الأعمدة بالاعتماد على قيمة نسبة النحافة λ واللامركزية الابتدائية (R.Porras, et al , 2009)

4-8-2 سلوك الأعمدة البيتونية المسلحة المحملة لامركزياً (Fitzwilliam,2006)

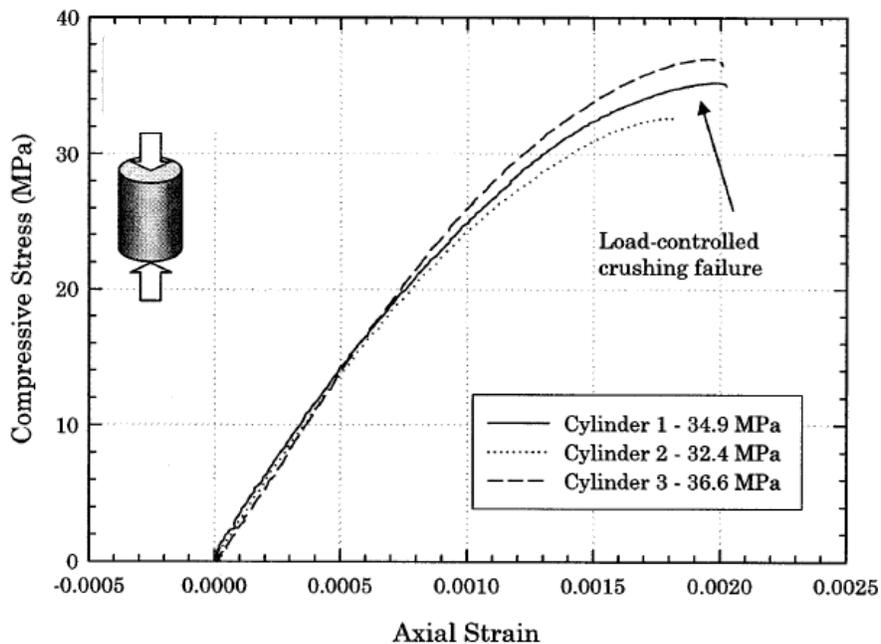
تم في هذه التجربة إيجاد قدرة التحمل لأعمدة دائرية بقطر 152 mm بأربع أطوال مختلفة (300,600,900,1200 mm) , خاضعة لحمولة محورية ضاغطة بلا مركزية ثابتة مقدارها 20 mm لمحاكاة عدم الدقة المتوقعة في الإنشاء . لجميع العينات نفس المقطع العرضي ونسبة التسليح منخفضة نسبياً.

يبين الجدول/8-2/ مواصفات العينات من حيث الطول ونسبة التسليح ونسبة النحافة.

الجدول/2-8: مواصفات العينات (Fitzwilliam,2006)

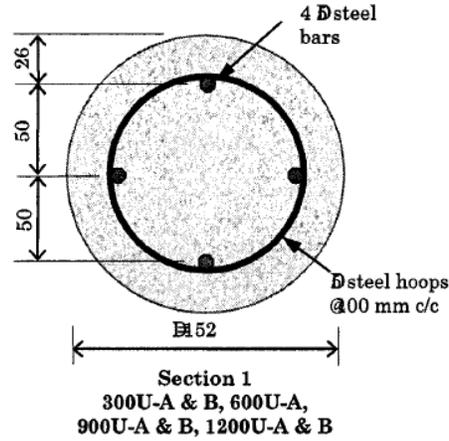
Specimen ID	Length (kL _o) mm	Longitudinal Reinf. Ratio (ρ%)	Radius of Gyration (r) mm	Slenderness kL _o /r	Slenderness L _o /D
300-A	300	0.71	38	9.74	1.97
300-B	300	0.71	38	9.74	1.97
600-A	600	0.71	38	17.63	3.94
900-A	900	0.71	38	25.53	5.91
900-B	900	0.71	38	25.53	5.91
1200-A	1200	0.71	38	33.42	7.87
1200-B	1200	0.71	38	33.42	7.87

تم استخدام بيتون متوسط الكثافة مقاومته على الضغط 36.6 MPa, حيث تم إجراء اختبار الضغط على 3 اسطوانات معيارية بقطر 150 mm وطول 300 mm. يبين الشكل /2-22/ منحنيات الإجهاد - التشوه الوسطية التي تم الحصول عليها من العينات الثلاثة.



الشكل/2-22: منحنيات الإجهاد-التشوه للعينات البيتونية على الضغط (Fitzwilliam,2006)

يبين الشكل/2-23/ بيبين ترتيب التسليح داخل العينات. حيث تم استخدام 4 قضبان من الفولاذ بقطر 6.4 mm و أساور دائرية بقطر 100 mm .



الشكل/2-23/: ترتيب التسليح داخل العينات (Fitzwilliam,2006)

يبين الجدول/2-9/ الخواص الميكانيكية للحديد المستخدم.

الجدول/2-9/: نتائج اختبارات الشد على فولاذ التسليح (Fitzwilliam,2006)

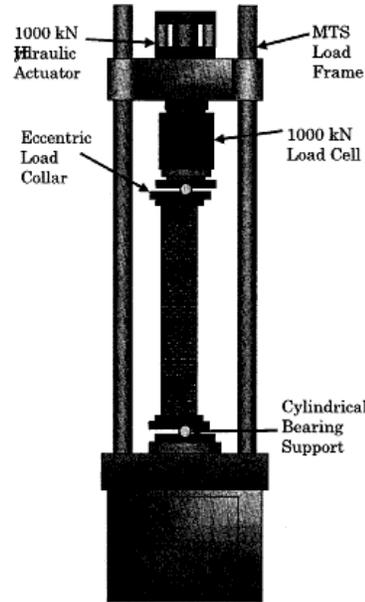
Tensile Test	Elastic Modulus	Yield Strength	Ultimate Strength	Ultimate Strain
	GPa	MPa	MPa	Strain x 10 ³
1	193.7	697.2	730.9	n/a
2	179.8	682.7	733.7	21.00
3	192.6	693.4	738.3	18.00
4	217.9	699.7	740.6	19.00
5	194.9	692.2	720.4	17.50
Average	195.8	693.0	732.8	18.90
St. Dev.	13.8	6.4	8.1	1.55

معامل مرونة الفولاذ المستخدم: $E_s=195800$ MPa

حد السيالان: $f_y=693$ MPa

الإجهاد الحدي: $f_u=732.8$ MPa

يبين الشكل/2-24/ رسم تخطيطي يوضح توضع العينة ضمن جهاز الاختبار.



الشكل/2-24: تمثيل العينة في جهاز الاختبار (Fitzwilliam,2006)

نتائج التجربة:

تتضمن النتائج منحنيات تمثل العلاقة بين الحمولة والانتقال الجانبي عند منتصف ارتفاع العمود.

يبين الجدول /10-2/ نتائج التجربة.

الجدول/10-2: نتائج التجربة (Fitzwilliam,2006)

Specimen ID	P max (kN)	ϵ_{aav} %	ϵ_{cu} %	$\delta_{p \max}$ mm
300-A	471	0.149	0.495	0.7
300-B	462	0.135	0.341	0.6
600-A	428	0.217	0.391	1.6
900-A	295	0.083	0.186	2.4
900-B	398	0.100	0.199	1.7
1200-A	389	0.113	0.267	4
1200-B	411	0.102	0.316	4.9

حيث:

الحمولة المحورية العظمى P_{max}

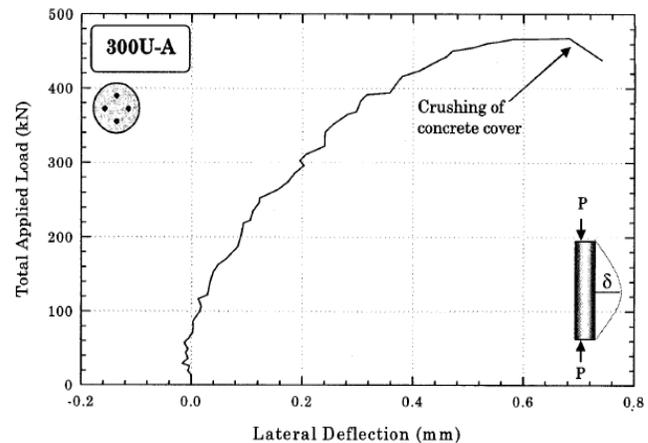
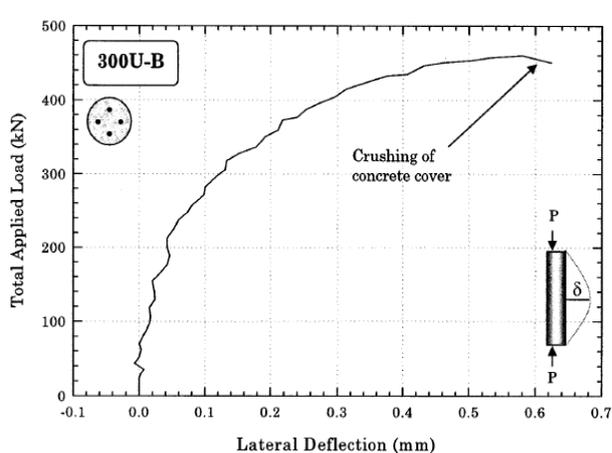
الانتقال الجانبي عند منتصف الارتفاع عند الحمولة العظمى $\delta_{p max}$

التشوه المحوري الوسطي للمقطع العرضي عند الانهيار ϵ_{aav}

التشوهات المحورية في الألياف المضغوطة الخارجية عند منتصف الارتفاع عند الانهيار ϵ_{cu} .

تبين الأشكال من /25-2/ إلى /28-2/ المنحنيات التي تمثل العلاقة بين الحمولة و الانتقال الجانبي

لجميع العينات:



الشكل /25-2/: منحنيات الحمولة –الانتقال الجانبي للعينات 300-A , 300-B (Fitzwilliam,2006)

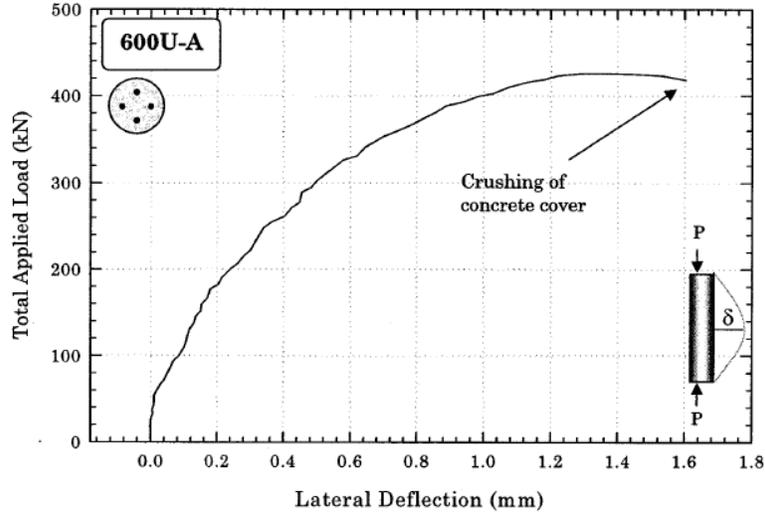


Figure 4.14 Load-deflection behaviour of 600U-A

الشكل /26-2/: منحنيات الحمولة – الانتقال الجانبي للعينات 600-A (Fitzwilliam,2006)

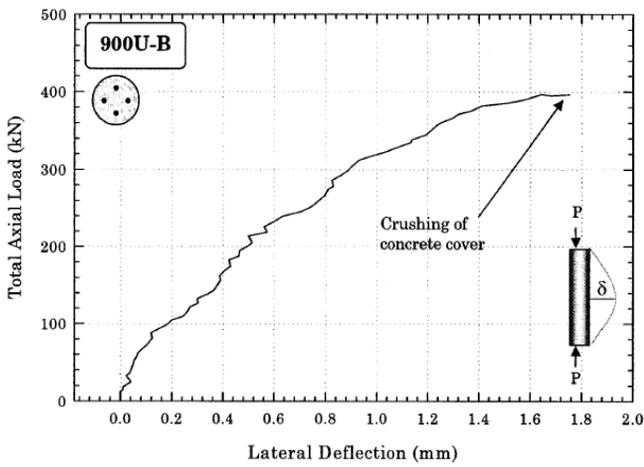


Figure 4.20 Load-deflection behaviour of 900U-B

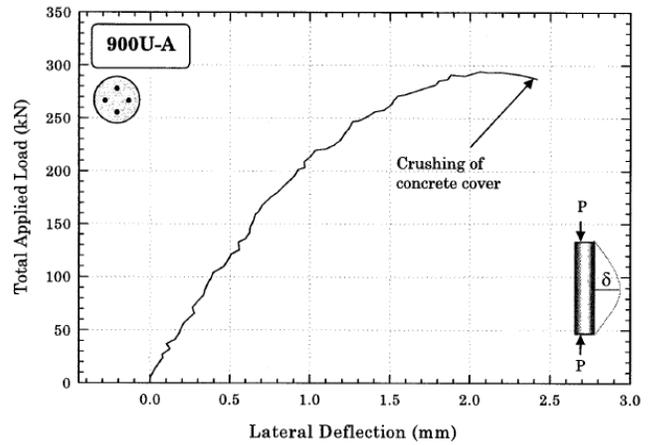


Figure 4.17 Load-deflection behaviour of 900U-A

الشكل /27-2/: منحنيات الحمولة – الانتقال الجانبي للعينات 900-A , 900-B (Fitzwilliam,2006)

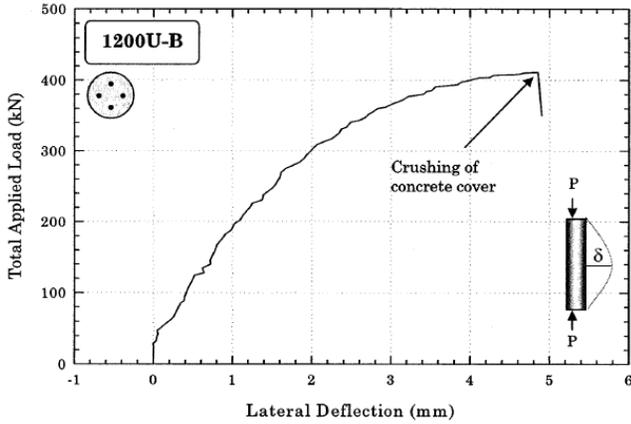


Figure 4.26 Load-deflection behaviour of 1200U-B

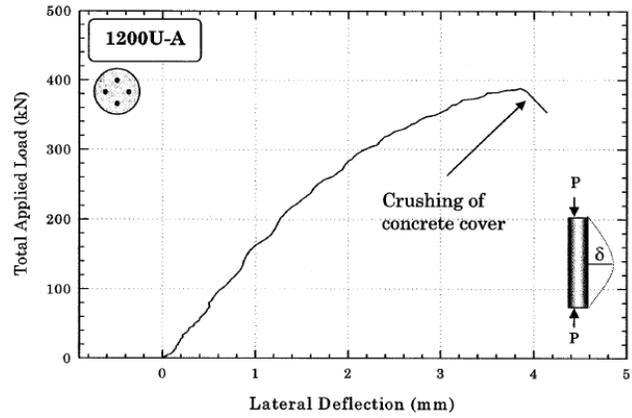
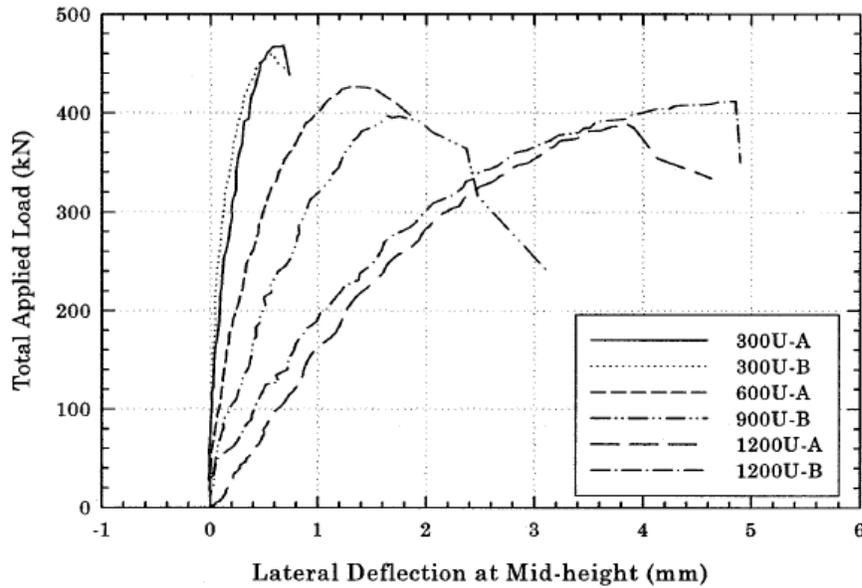


Figure 4.23 Load-deflection behavior for 1200U-A

الشكل /28-2/: منحنيات الحمولة – الانتقال الجانبي للعينات 1200-A , 1200-B (Fitzwilliam,2006)

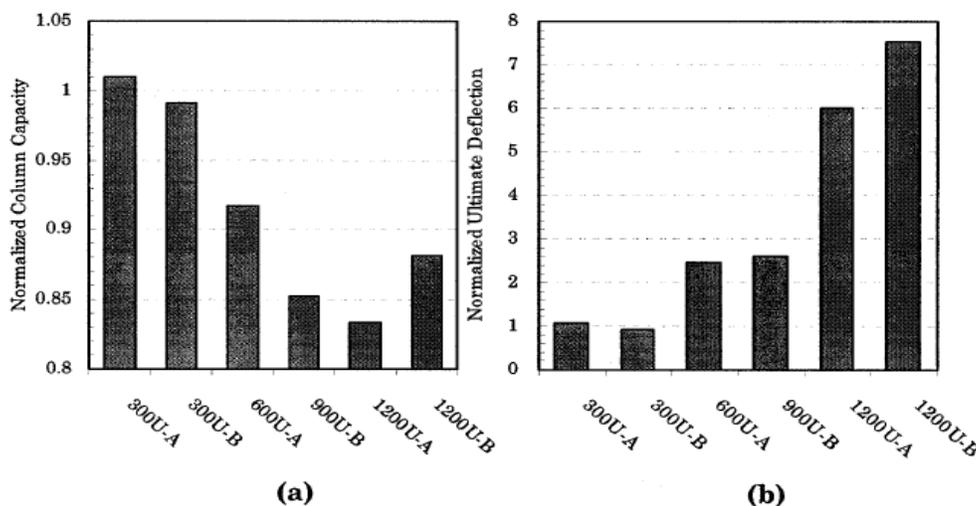
تأثير النحافة:

يبين الشكل /29-2/ تأثير النحافة على منحنيات الحمولة – السهم (الانتقال الجانبي), حيث يبين الشكل مقارنة بين العينات. وكما هو متوقع فإن زيادة نسبة النحافة تؤدي إلى نقصان قدرة التحمل وزيادة الانتقال الجانبي عند الانهيار.



الشكل /29-2/: مقارنة سلوك العينات من خلال منحنيات الحمولة-السهم (Fitzwilliam,2006)

يبين الشكل/2-30/a مقارنة بين قدرات تحمل الأعمدة، والشكل/2-28/b مقارنة بين العينات من حيث الانتقال الجانبي الحدي.



الشكل /2-30/: مقارنة بين العينات a – للحمولة الحدية. b – للسهم الجانبي (Fitzwilliam,2006)

ويبين المخطط أن قدرة تحمل أغلب العينات النحيلة أقل ب 11% على الأقل من العينات الغير نحيلة، وأن الانتقال الجانبي الحدي لأغلب العينات النحيلة (الطويلة) أكبر ب 500% على الأقل من العينات الغير نحيلة (القصيرة) عند الانهيار.

9-2 خلاصة الفصل الثاني: Chapter 2 Conclusion

تم في هذا البحث إجراء مراجعة بحثية لمواضيع تتعلق بهذا البحث، حيث تم التعرف على مادة البيتون المسلح وسلوكها ومادة الفولاذ وسلوكها، وشرح لسلوك الأعمدة البيتونية القصيرة والطويلة وأنماط انهيارها، كما تم بيان علاقات الضغط اللامركزي وعلاقتها بمخطط الترابط، ومن ثم شرح علاقة أويلر المستخدمة في إيجاد حمولة التحنيب الحدية في الأعمدة وكذلك علاقات الكود العربي السوري المستخدمة لحساب الأعمدة البيتونية.

كما تم استعراض مجموعة من الدراسات البحثية التجريبية المتعلقة بتأثير نسبة النحافة على قدرة تحمل الأعمدة البيتونية سواء كان بيتون عادي أو عالي المقاومة وباستخدام متغيرات مختلفة، وتم من خلالها استخلاص العديد من النتائج، وسيتم الاعتماد على تجربة (Fitzwilliam,2006) في إجراء الدراسة التحليلية لما تحويه من تفاصيل ومنحنيات تمكنا من وضع نموذج يخدم موضوع البحث في الفصل التالي.

الفصل الثالث

الدراسة التحليلية باستخدام طريقة العناصر المحدودة

Analytical Study Using Finite Element Method FEM

1-3 مقدمة Introduction:

الهدف من هذا الفصل هو إنشاء نموذج عددي يحاكي الدراسة التجريبية التي قام بها الباحث (Fitzwilliam,2006) والتي أجريت على أعمدة بيتونية مسلحة بمقطع دائري وبعده نسب نحافة تحت تأثير حمولة محورية ضاغطة بلا مركزية ثابتة.

يتضمن الفصل توصيف للنموذج المعتمد في التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة Finite Element Method FEM, والتي تتضمن اختيار العناصر المناسبة للنمذجة وتوصيف المواد مع الأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (Nonlinearity of Material ولا خطية الشكل الهندسي (Nonlinear Geometric) ومن ثم ربط حديد التسليح مع مادة البيتون وتطبيق الحمولة على النموذج وتحديد شروط الاستناد ودراسة أثر تقارب الشبكة.

تم بناء نموذج تحليلي باستخدام برنامج ABAQUS V6.12 والتأكد من صحة نتائجه من خلال مقارنتها مع نتائج الدراسة التجريبية لاستخدامه فيما بعد في الدراسة البارامترية.

2-3 التحليل الإنشائي باستخدام طريقة العناصر المحدودة Structural Analysis

:Using Finite Element Method FEM

1-2-3 توصيف النموذج Model Description:

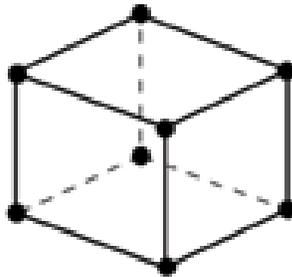
تم تحليل النموذج المدروس تجريبيا في مقالة (Fitzwilliam,2006) حيث قطر المقطع العرضي المستخدم 152mm وبأربع أطوال (300,600,900,1200mm) ينتج عنها أربع نسب نحافة ($\lambda=9.7,17.6,25.5,33.4$) على الترتيب, البيتون المستخدم متوسط الكثافة مقاومته المتوسطة على الضغط 36.6 MPa, التسليح الطولي عبارة عن 4 قضبان بقطر 6.4mm والتسليح العرضي عبارة عن أساور دائرية بقطر 6.4mm كل 100mm, حد السيالان للتسليح الطولي والعرضي $f_y=693$ MPa

ومعامل المرونة $E_s=195800 \text{ MPa}$, تم تطبيق حمولة محورية ضاغطة بلا مركزية ثابتة مقدارها 20 mm حتى الانهيار.

2-2-3 العناصر المستخدمة في النموذج باستخدام برنامج ABAQUS 6.12:

Elements used in the model using ABAQUS 6.12:

لنمذجة العمود البيتوني تم استخدام العنصر C3D8 وهو عنصر فراغي (Solid Section) مكون من ثماني عقد ولكل عقدة 6 درجات حرية (ثلاثة انتقالات وثلاثة دورانات) وهو مبين في الشكل/3-1/.

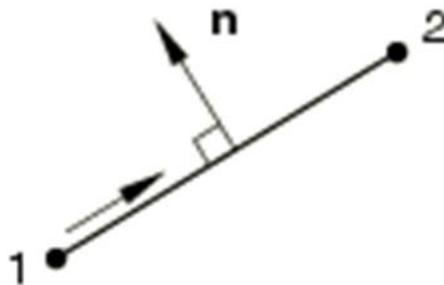


Linear element
(8-node brick, C3D8)

الشكل/3-1/: تمثيل العنصر الفراغي بثمان عقد

(ABAQUS Ver6.12 Documentation,2012)

لنمذجة حديد التسليح الطولي والعرضي تم استخدام العنصر T3D2 وهو عنصر شبكي (Truss Element) مؤلف من عقدتين ولكل عقدة ثلاث درجات حرية وهو مبين في الشكل/3-2/.

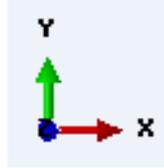


الشكل/3-2/: تمثيل العنصر الشبكي ذو العقدتين

(ABAQUS Ver6.12 Documentation,2012)

3-2-3 الشروط المحيطة للنموذج: Model's Boundary Condition

تم اعتماد شروط الاستناد في النموذج كما وردت في التجربة (Fitzwilliam,2006)، حيث تم تقييد المسند العلوي والسفلي من الانتقال بجميع الاتجاهات وسمح له بالدوران حول المحور Z.



$$U1=U2=U3=UR1=UR2=0$$

$$UR3 \neq 0$$

4-2-3 الأحمال المطبقة على النموذج: Applied Load to the Model

تم تطبيق قوة ضغط محورية على النموذج بلا مركزية ابتدائية ثابتة مقدارها 20 mm حتى الانهيار.

5-2-3 التحليل المستخدم: Type of Used Analysis

تم اعتماد التحليل اللاخطي الذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة (Materially Non Linear Analysis) ولا خطية الشكل الهندسي (Nonlinear Geometric).

6-2-3 طرائق نمذجة المواد المستخدمة: Material Used in Modeling

1-6-2-3 مادة البيتون:

تحتوي قاعدة بيانات برنامج (ABAQUS V6.12) ثلاث طرائق لنمذجة البيتون وهي:

1- Concrete Smearred Cracking Model

2- Cracking Model for Concrete (Brittle Cracking Model)

3- Concrete Damaged Plasticity

تسمح هذه الطرائق الثلاث في نمذجة البيتون لجميع أنواع المنشآت مثل الجوائز Beams , العناصر الشبكية Trusses , القشريات Shells , والعناصر الفراغية Solids , وأيضا البيتون العادي البسيط (Plain Concrete) , والبيتون المسلح (Reinforced Concrete).

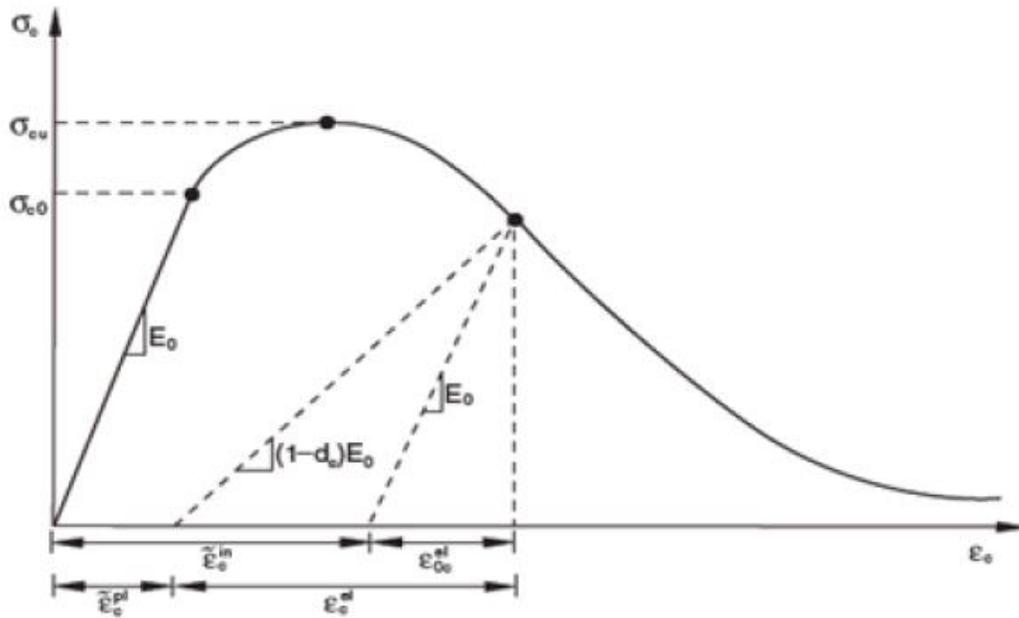
تستخدم طريقة Concrete Smearred Cracking Model في حالات الحمولات المتزايدة (Pushover Loading) ولا تصلح في حالة التحميل الدوري (Cycling Loading) والانهيار فيها

يكون إما بسبب التشقق على الشد (Tensile Cracking) أو التحطم على الضغط (Compressive Crushing). وتستخدم طريقة Brittle Cracking Model للمواد ذات التشقق الهش والتي تسيطر عليها تشققات الشد (Tensile Cracking).

أما طريقة Concrete Damaged Plasticity CDP فيمكن استخدامها في حالات التحميل الرتيب (Monotonic Loads) أو حالات التحميل الديناميكي (Dynamic Loads) أو التحميل الدوري (Cyclic Loads), ونستطيع من خلالها إجراء التحليل اللاخطي للبيتون حيث تأخذ بعين الاعتبار تأثير إزالة القوة والتناقص التدريجي في الصلابة المرنة (Elastic Stiffness) في حالي الشد والضغط بسبب التشوهات اللدنة, أيضاً تأخذ بعين الاعتبار آثار استرداد القساوة المرنة (Recovery of Elastic Stiffness) في حالة التحميل الدوري (Cyclic Loads) عند انعكاس الحمولة من الضغط إلى الشد. وسيتم الاعتماد على هذه الطريقة في بحثنا لنمذجة مادة البيتون لكونها تناسب حالة التحميل (تحميل متزايد) ونتمكن عن طريقها من توصيف مادة البيتون بشكل لاخطي حيث تأخذ بعين الاعتبار وجود التشوهات اللدنة والتناقص في الصلابة الناتج عن ذلك.

المنحنيات التي تمثل سلوك البيتون وفق طريقة CDP:

يبين الشكل 3-3/3 منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الضغط المستخدم في طريقة CDP حيث يمثل المحور الأفقي التشوه النسبي للبيتون على الضغط ϵ_c والمحور الشاقولي إجهاد الضغط في البيتون σ_c , يكون السلوك مرناً حتى الوصول إلى قيمة الإجهاد الابتدائي σ_{co} Initial Stress, ثم يبدأ السلوك اللامرّن وتصبح علاقة الإجهاد-التشوه لا خطية حتى الوصول إلى قيمة الإجهاد الحدي للبيتون على الضغط σ_{cu} Ultimate Stress وتسمى هذه المرحلة بمرحلة التقسية Stress Hardening, بعد ذلك تنخفض الإجهادات مع استمرار تزايد التشوهات وتضعف المادة بسبب ظهور التشققات وتسمى هذه المرحلة (Strain Softening).



الشكل/3-3/: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للبيتون على الضغط

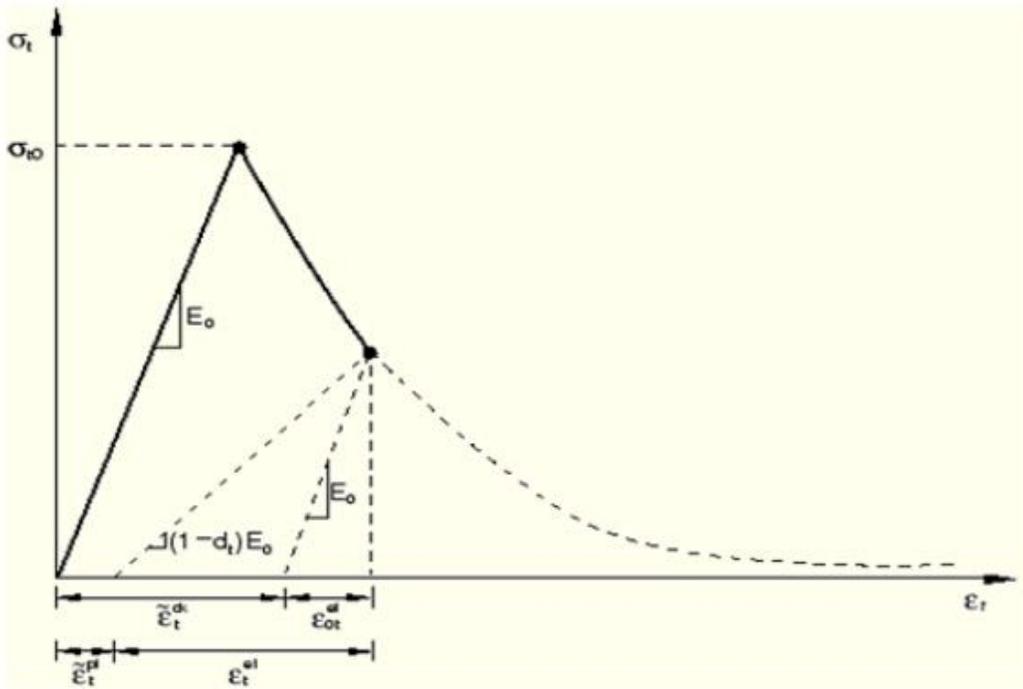
(ABAQUS Ver6.12 Documentation,2012)

عند إزالة القوة من أي نقطة من مرحلة (Strain Softening) من منحنى الإجهاد-التشوه تنخفض قساوة المادة، ونعبر عن انخفاض القساوة بالمعامل d_c (معامل الضرر) الذي يأخذ قيمه من 0 (حيث المادة غير متشققة) إلى 1 (حيث تفقد المادة كل مقاومتها). حيث نلاحظ انخفاض معامل المرونة الابتدائي E_0 بمقدار $(1-d_c)$ بسبب ظهور التشققات اللدنة المتبقية.

يُعطى المعامل d_c بالعلاقة (1-3) (Jankowiak and Lodygowski 2005):

$$d_c = \frac{\sigma_{cu} - \sigma_c}{\sigma_{cu}} \dots\dots(1-3)$$

يبين الشكل /3-4/ منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الشد المستخدم في طريقة CDP، حيث يمثل المحور الأفقي التشوه النسبي للبيتون على الشد والمحور الشاقولي إجهاد الشد في البيتون، ويكون سلوك البيتون خطي مرن حتى الوصول إلى قيمة الإجهاد الحدي للبيتون على الشد، بعد ذلك يصبح السلوك لأمرن وتبدأ المقاومة بالانخفاض بشكل تدريجي مع تزايد التشوهات وتسمى هذه المرحلة (Strain Softening) وتظهر التشققات في المادة.



الشكل/3-4: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للبيتون على الشد

(ABAQUS Ver6.12 Documentation,2012)

وكما في حالة الضغط , عند إزالة الحمولة من أي نقطة من مرحلة Strain Softening من منحنى الإجهاد-التشوه تنخفض قساوة المادة ونعبر عن هذا الانخفاض بالمعامل dt (معامل تخفيض القساوة على الشد) الذي يأخذ قيمه من 0 عندما تكون المادة غير متشققة إلى 1 عندما تفقد المادة كامل مقاومتها. حيث نلاحظ انخفاض معامل المرونة الابتدائي Eo بمقدار (1-dt) بسبب ظهور التشققات اللدنة المتبقية.

يُعطى المعامل dt بالعلاقة (2-3) (Jankowiak and Lodygowski 2005):

$$d_t = \frac{\sigma_{to} - \sigma_t}{\sigma_{to}} \dots (2-3)$$

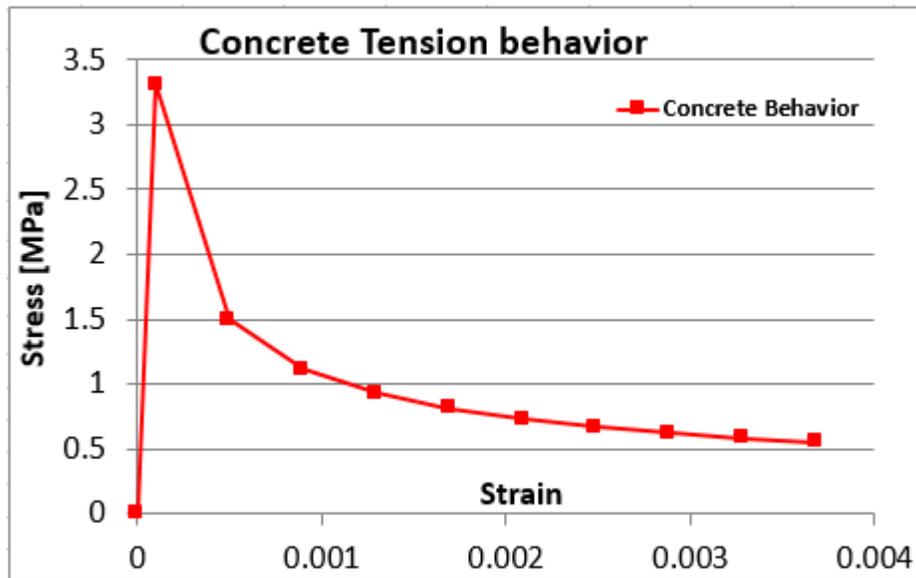
لنمذجة مادة البيتون وفق طريقة ال CDP تم الاعتماد على منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الضغط وفق ماورد في التجربة المعتمدة (Fitzwilliam,2006). حيث تم إجراء اختبار الضغط على ثلاث أسطوانات معيارية بقطر 150 mm وارتفاع 300 mm وتم الحصول على منحنيات الإجهاد-التشوه على الضغط كما هو مبين في الشكل /2-22/.

حيث المقاومة المتوسطة للبيتون على الضغط $f_{cm}=36.6 \text{ MPa}$

ومعامل مرونة البيتون $E_c=32470 \text{ MPa}$

ومعامل بواسون $\nu =0.2$

أما في حالة الشد فتم الاستعانة بالكود الأوربي (EuroCode2, 2004) للحصول على منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الشد وهو مبين في الشكل 3-5. حيث يكون السلوك مرناً حتى الوصول إلى قيمة الإجهاد الحدي للبيتون على الشد f_{ctm} والتي يقابلها التشوه النسبي الابتدائي للبيتون على الشد ϵ_{to} , بعد ذلك تبدأ الشقوق بالظهور وتنخفض المقاومة بشكل تدريجي حتى الوصول إلى قيمة التشوه الحدي للبيتون على الشد ϵ_{total} .



الشكل 3-5: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للبيتون على الشد

(EuroCode2-2004)

نحصل على قيمة الإجهاد الحدي للبيتون على الشد f_{ctm} من الجدول (2-2) والمأخوذ من الكود الأوربي (EuroCode2, 2004) وذلك بالاعتماد على قيمة مقاومة البيتون على الضغط وبالرجوع إلى الجدول نجد أن :

$$f_{ctm} = 3.3 \text{ MPa} \dots(3-3)$$

أما قيمة التشوه النسبي الابتدائي للبيتون على الشد ε_{to} فنحصل عليها من العلاقة /4-3/:

$$\varepsilon_{to} = \frac{f_{ctm}}{E_0} \dots (4-3)$$

حيث E_0 معامل المرونة الابتدائي للبيتون.

نحصل على قيم التشوهات ε_t لنقاط منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الشد بعد قيمة الإجهاد الحدي الأعظمي من العلاقة /5-3/:

$$\varepsilon_t = m \frac{\varepsilon_{total} - \varepsilon_{to}}{10} + \varepsilon_{to} \dots (5-3)$$

m: عدد متزايد يعبر عن ترتيب نقاط المنحنى المراد إيجاد قيمها. وتم أخذ قيمه هنا من 0 إلى 10.

ε_{total} : قيمة التشوه الحدي للبيتون على الشد. ونحصل عليه من العلاقة /6-3/.

$$\varepsilon_{total} = 40 \times \varepsilon_{to} \dots (6-3)$$

أما قيمة الإجهادات σ_t المقابلة لقيم التشوهات فنحصل عليها من العلاقة /7-3/ (EuroCode2-2004):

$$\sigma_t = f_{ctm} \left(\frac{\varepsilon_{to}}{\varepsilon_t} \right)^n \dots (7-3)$$

n: ثابت يعبر عن شكل الجزء اللدن من منحنى الإجهاد-التشوه للبيتون على الشد. وتؤخذ قيمته عادة 0.5.

2-6-2-3 مادة الفولاذ:

يبين الشكل /6-3/ منحنى الإجهاد-التشوه لحديد التسليح الطولي والعرضي المستخدم في النمذجة, حيث سلوك الفولاذ Elastic Perfectly Plastic (مرن-لدن مثالي).

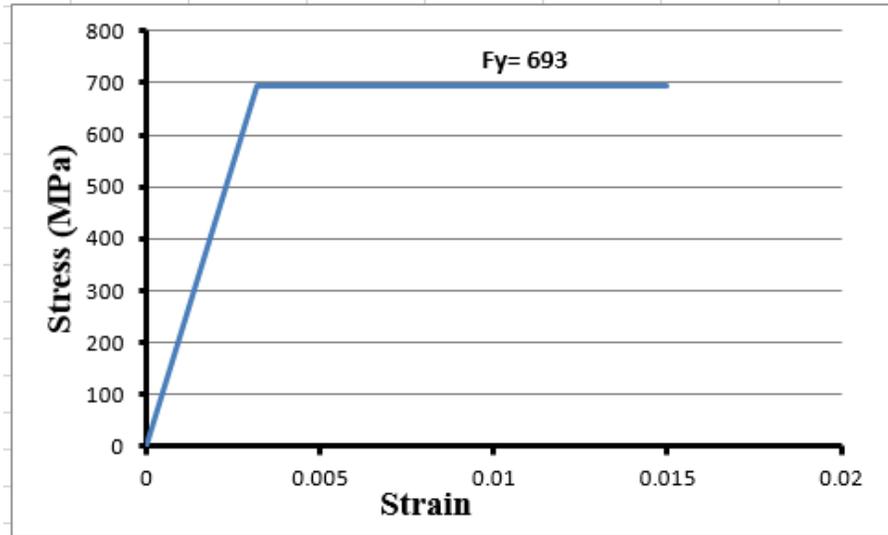
يُحسب إجهاد الخضوع f_y عند قيمة تشوه نسبي ε_y من العلاقة:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \dots (8-3)$$

f_y : قيمة إجهاد الخضوع للفولاذ. وتساوي بحسب التجربة 693 MPa.

Es: معامل مرونة الفولاذ. ويساوي بحسب التجربة 195800 MPa.

بعد ذلك يصبح سلوك الفولاذ لدناً مثالياً.

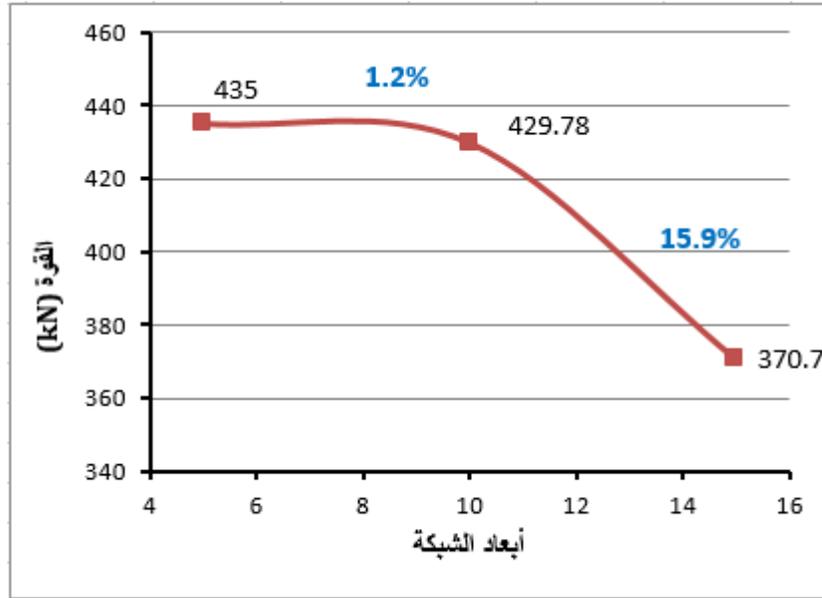


الشكل/3-6: منحنى الإجهاد-التشوه النسبي للفولاذ المستخدم في النمذجة

3-3 دراسة أثر تقارب الشبكة: Mesh Convergence

بما أن طريقة العناصر المحدودة هي طريقة عددية، بالتالي لابد من تحديد الأبعاد المثالية لتقسيمات العناصر المحدودة المستخدمة من أجل الوصول إلى التقسيم الأمثل من حيث الدقة في النتائج والاقتصادية في زمن الحل.

يبين الشكل /3-7/ الدراسة التي تمت على نموذج العمود ذو الطول 600 mm , يمثل المحور الأفقي تقسيمات الشبكة و المحور الشاقولي قيمة الحمولة الحدية التي حصلنا عليها. تم استخدام ثلاثة قيم للتقسيمات وهي (5*5) , (10*10) , و (15*15) . ونلاحظ أن الفرق بين قيمة الحمولة التي حصلنا عليها للشبكة ذات الأبعاد (5*5) و (10*10) هو 1.2% بينما يكون الفرق كبير للشبكة ذات الأبعاد (10*10) و (15*15) يصل إلى 15.9%. أي أن التقسيم الأنسب من حيث الدقة في النتائج والزمن في الحل هو للشبكة ذات الأبعاد (10*10).

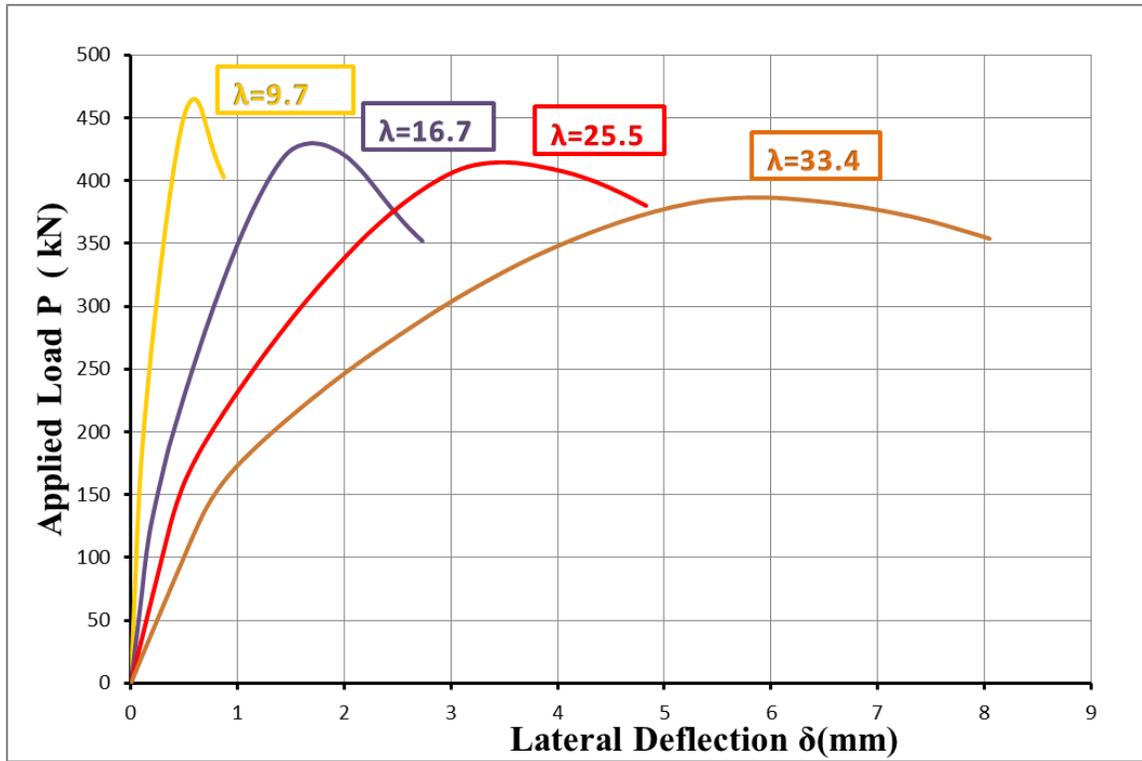


الشكل/3-7: أثر تقارب الشبكة للنموذج التحليلي

4-3 نتائج تحليل النموذج :Results of analysis

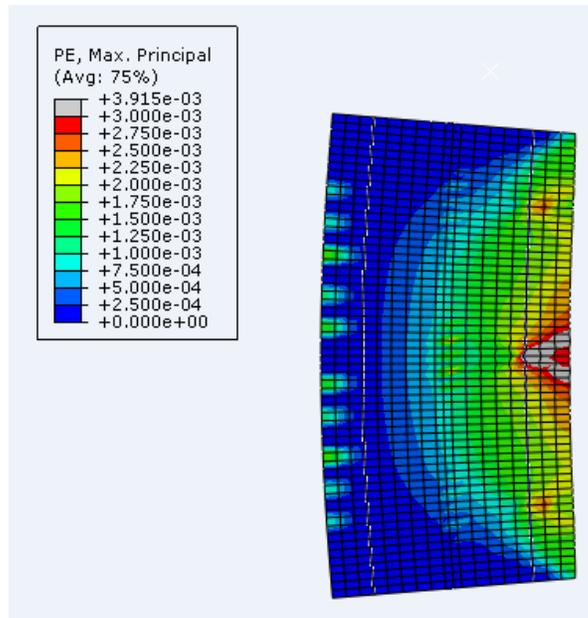
بعد أن تم وضع النموذج للأعمدة المدروسة في تجربة (Fitzwilliam,2006) وفق المعايير المذكورة في الفقرات 2-3 و3-3 وإجراء التحليل اللاخطي وفق برنامج ABAQUS، تم استخلاص النتائج ورسم منحنيات الحمولة –الانتقال الجانبي لكل عمود.

يبين الشكل /3-8/ مقارنة بين منحنيات الحمولة-الانتقال الجانبي للأعمدة المدروسة , حيث نلاحظ زيادة الانتقال الجانبي عند منتصف ارتفاع العمود ونقصان في الحمولة الأعظمية مع زيادة قيمة نسبة النحافة λ . حيث انخفضت قدرة التحمل مع تغير نسبة النحافة من $\lambda=9.7$ إلى $\lambda=33.4$ بمقدار 20.3% وزاد الانتقال الجانبي بمقدار 800% .



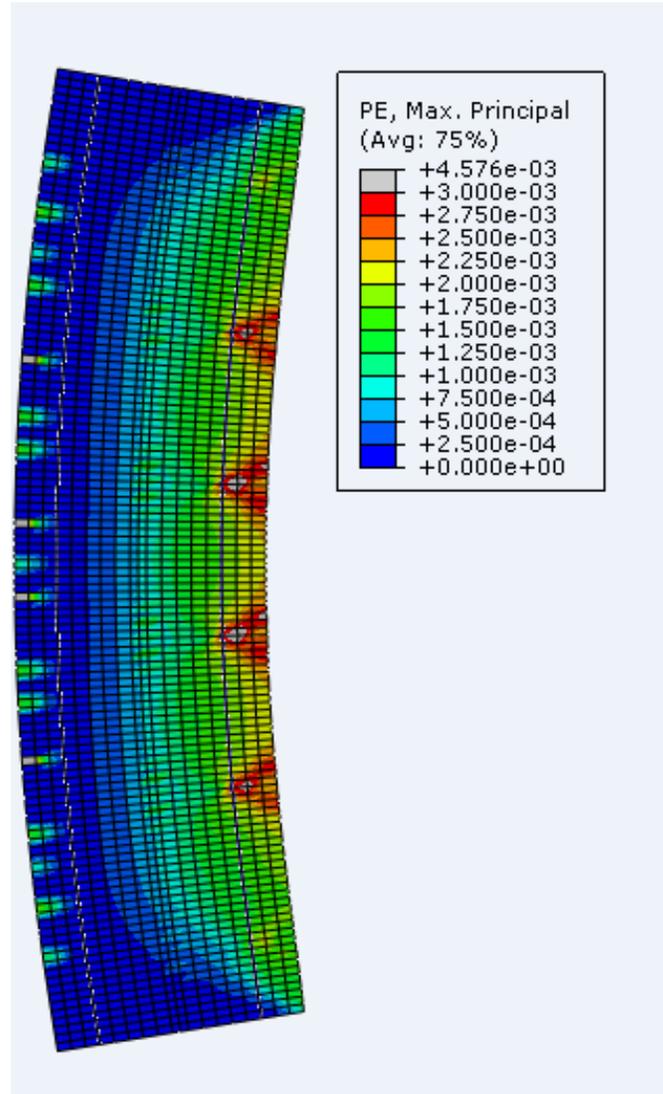
الشكل /8-3/ مقارنة بين منحنيات الحمل-الانتقال الجانبي للأعمدة المدروسة وفق الدراسة التحليلية

يبين الشكل /9-3/ التشوهات اللدنة الأعظمية الرئيسية (Max Principle) في العمود ذو نسبة النحافة 9.7 عند نقطة الحمل الأعظمية.



الشكل/9-3/: التشوهات اللدنة الأعظمية الرئيسية في العمود $\lambda=9.7$ عند الحمل الأعظمية وفق برنامج ABAQUS

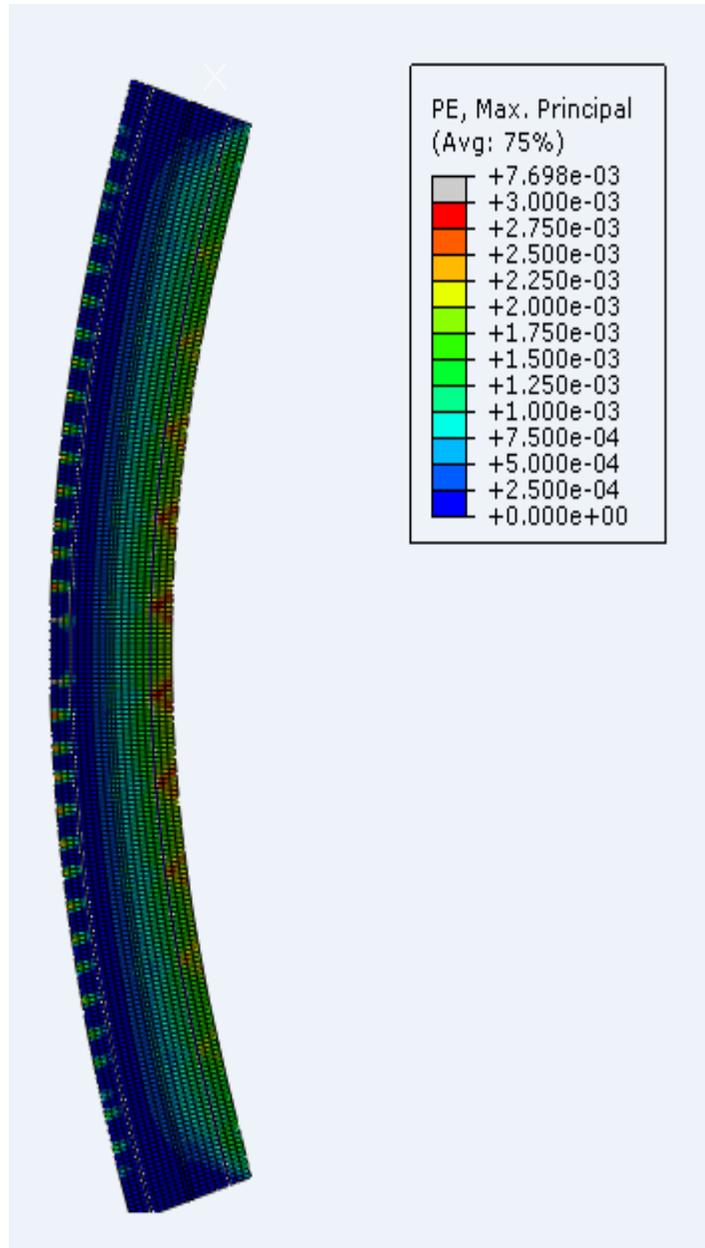
يبين الشكل /10-3/ التشوهات اللدنة الأعظمية الرئيسية (Max Principle) في العمود ذو نسبة النحافة 17.6 عند نقطة الحمولة الأعظمية.



الشكل/10-3/: التشوهات اللدنة الأعظمية الرئيسية في العمود $\lambda=17.6$ عند الحمولة الأعظمية وفق برنامج

ABAQUS

يبين الشكل /11-3/ التشوهات اللدنة الأعظمية الرئيسية (Max Principle) في العمود ذو نسبة النحافة 33.4 عند نقطة الحمولة الأعظمية.



الشكل/3-11: التشوهات اللدنة الأعظمية الرئيسية في العمود $\lambda=33.4$ عند الحمولة الأعظمية وفق برنامج

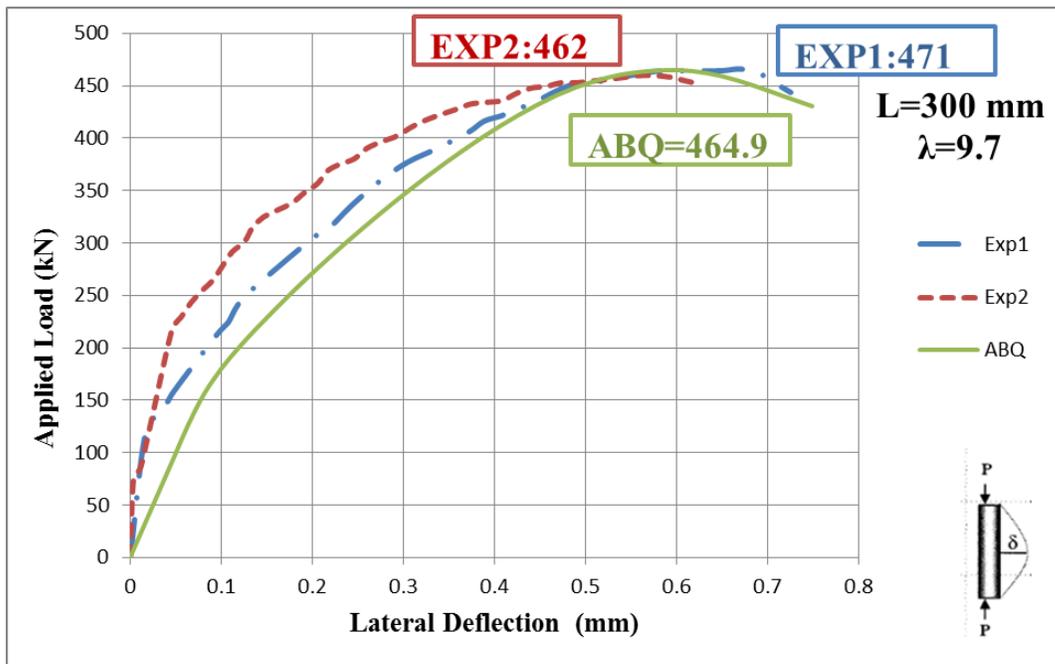
ABAQUS

5-3 مقارنة نتائج النموذج التحليلي مع النتائج التجريبية:

Comparing analytical results with experimental results

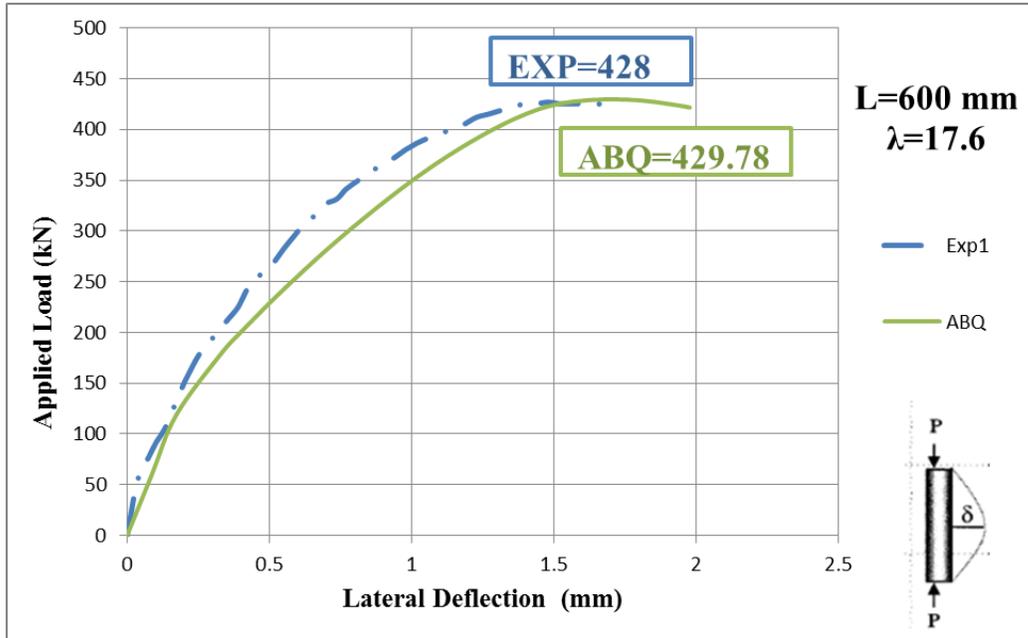
من أجل التحقق من النموذج تمت المقارنة بين النتائج التحليلية والنتائج التجريبية (Fitzwilliam,2006) عن طريق منحنيات الحمل – الانتقال الجانبي حيث يمثل المحور الأفقي الانتقال الجانبي عند منتصف ارتفاع العمود (δ) بينما يمثل المحور الشاقولي القوة المطبقة (P). وتبين الأشكال من /12-3/ إلى /15-3/ نتائج المقارنة بين منحنيات التجربة والمنحنيات التحليلية التي حصلنا عليها باستخدام برنامج (ABAQUS V6.12) وذلك لجميع عينات الأعمدة.

يظهر الشكل /12-3/ مقارنة بين النتائج التحليلية و التجريبية للعمود الأول $L=300$ mm و $\lambda=9.7$. كانت الحمولة الأعظمية وفق الدراسة التحليلية $P_{(ABQ)}=464.9$ kN بينما كانت الحمولة الأعظمية التجريبية بالنسبة للعينة الأولى $P_{(EXP1)}=471$ kN والعينة الثانية $P_{(EXP2)}=462$ kN. أي بفارق مقداره 1.3% عن التجربة الأولى و 0.63% عن التجربة الثانية.



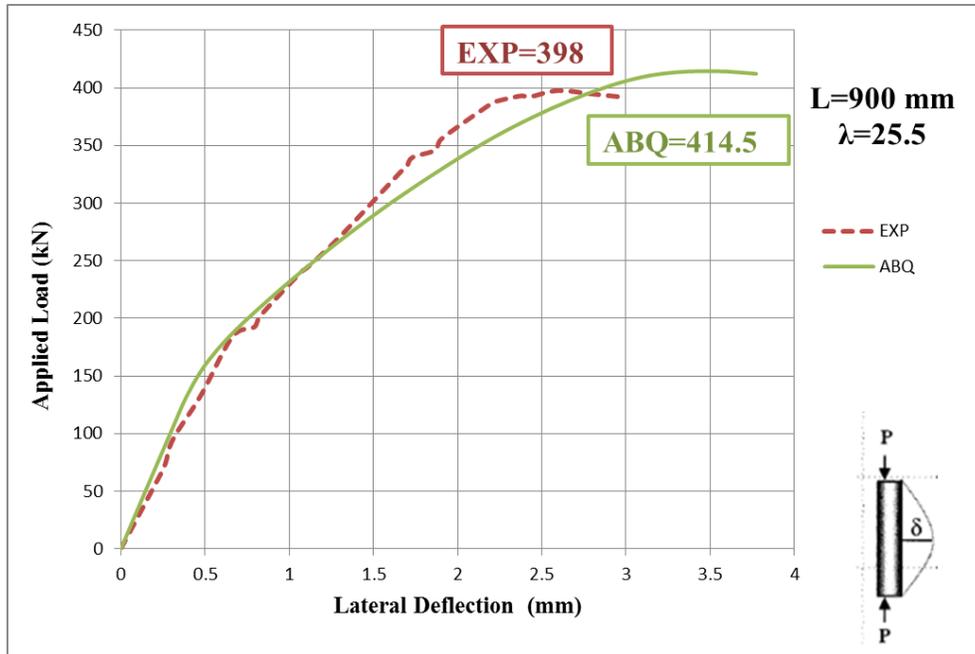
الشكل/12-3/مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية لمنحني الحمولة-السهم للعمود 300 mm

يبين الشكل /3-13/ مقارنة بين النتائج التحليلية و التجريبية للعمود الثاني $L=600$ mm و $\lambda=17.6$. كانت الحمولة الأعظمية وفق الدراسة التحليلية $P_{(ABQ)}=429.8$ kN بينما كانت الحمولة الأعظمية التجريبية $P_{(EXP1)}=428$ kN أي بفارق مقداره 0.42%.



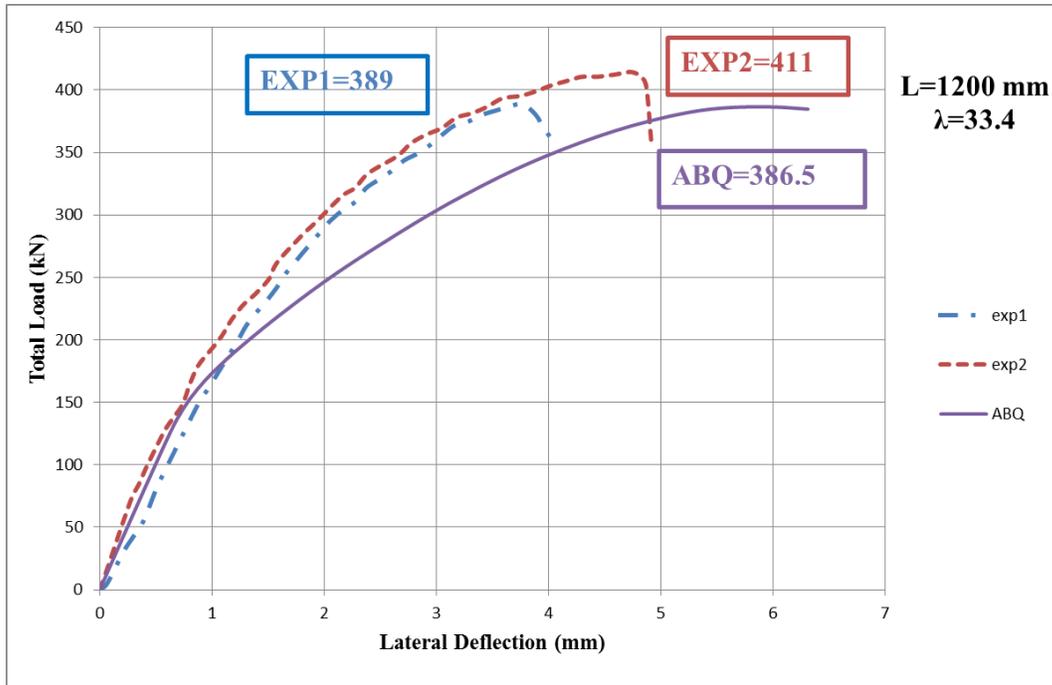
الشكل/3-13:مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية لمنحني الحمولة-السهم للعمود 600 mm

يبين الشكل /3-14/ مقارنة بين النتائج التحليلية و التجريبية للعمود الثالث $L=900$ mm و $\lambda=25.5$. كانت الحمولة الأعظمية وفق الدراسة التحليلية $P_{(ABQ)}=414.5$ kN بينما كانت الحمولة الأعظمية التجريبية $P_{(EXP1)}=398$ kN أي بفارق مقداره 4.15%.



الشكل/3-14: مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية لمنحني الحمولة-السهم للعمود 900 mm

يبين الشكل /3-15/ مقارنة بين النتائج التحليلية والتجريبية للعمود الأخير $L=1200$ mm و $\lambda=33.4$. كانت الحمولة الأعظمية وفق الدراسة التحليلية $P_{(ABQ)}=386.5$ kN بينما كانت الحمولة الأعظمية التجريبية بالنسبة للعينة الأولى $P_{(EXP1)}=389$ kN والعينة الثانية $P_{(EXP2)}=411$ kN. أي بفارق مقداره 0.65% عن التجربة الأولى و 6.34% عن التجربة الثانية.



الشكل/3-15: مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج التحليلية لمنحني الحمولة-السهم للعمود 1200 mm

6-3 خلاصة الفصل الثالث: Chapter 3 Conclusion

تم في هذا الفصل استعراض كيفية بناء النموذج العددي وفق طريقة العناصر المحدودة باستخدام برنامج ABAQUS V6.12 من حيث اختيار العناصر المناسبة لنمذجة كل من مادة البيتون وحديد التسليح وتطبيق الشروط المحيطية وتعريف خصائص المواد المستخدمة ومن ثم اختيار التقسيم المناسب للعناصر المحدودة وإجراء التحليل المناسب. بعد ذلك تم إجراء مقارنة بين نتائج الدراستين التحليلية والتجريبية للتحقق من النموذج وتبين وجود تطابق جيد بين الدراستين وبالتالي سيتم الاعتماد على النموذج في إجراء الدراسة البارامترية التي سترد في الفصل الرابع.

الفصل الرابع

الدراسة البارامترية

Parametric Study

1-4 مقدمة: Introduction

يهدف هذا الفصل إلى استعراض النتائج التحليلية للنموذج المدروس لأعمدة بيتونية مسلحة مقطوعها العرضي دائري وبنسب نحافة مختلفة لمعرفة تأثير نسبة النحافة على قدرة تحمل الأعمدة وعلى نمط انهيارها.

تم إجراء التحليل العددي باستخدام طريقة العناصر المحدودة واستخدام النموذج وفق ما تم شرحه سابقاً في الفصل الثالث.

تهدف الدراسة البارامترية إلى دراسة سلوك الأعمدة البيتونية الدائرية المسلحة بتغير معامل النحافة [حيث تم اعتماد قيم معامل النحافة من 8 – 200] ثم بتغير مقاومة البيتون على الضغط [حيث تم اعتماد القيم التالية لمقاومة البيتون على الضغط $f_c = 15-20-25-30-36$ MPa ، ومن ثم دراسة أنماط انهيار الأعمدة ومدى تأثير العزوم الإضافية الناتجة عن التحنيب في حصول الانهيار، ثم إجراء مقارنة للنتائج التحليلية مع علاقة أويلر ومع القيم التي يعطيها الكود العربي السوري .

2-4 دراسة سلوك الأعمدة بتغير معامل النحافة:

Behavior of Concrete Columns with Different Slenderness Ratios:

لمعرفة تأثير نسبة النحافة على قدرة تحمل الأعمدة تم إجراء دراسة تحليلية على النموذج المعتمد وهو عبارة عن عمود دائري بقطر 152 mm وبعده أطوال ينتج عنها عدة قيم لمعامل النحافة تتراوح من 9.7-200 ، يخضع العمود لقوة ضغط بلا مركزية ثابتة مقدارها 20 mm لمحاكاة عدم الدقة المتوقعة في الإنشاء.

البيتون المستخدم متوسط الكثافة مقاومته المتوسطة على الضغط $f_c=36.6$ MPa و معامل المرونة $E_c=32470$ MPa .

التسليح الطولي عبارة عن 4 قضبان بقطر 6.4 mm أي بنسبة تسليح 0.7% , والتسليح العرضي عبارة عن أساور بقطر 6.4 mm كل 100 mm , حد السييلان للتسليح الطولي والعرضي $f_y=693$ MPa ومعامل المرونة $E_s=195800$ MPa .

تم اعتماد الأطوال التالية في الدراسة : $L=300-600-900-1200-1500-2000-2500-3000$ mm و التي ينتج عنها نسب النحافة التالية : $\lambda=9.7-17.6-25.5-33.4-41-54-67-80-101-122-151-183-201$ على الترتيب .

حيث تم حساب نسبة النحافة λ من العلاقة:

$$\lambda = \frac{L_0}{i} \dots(1-4)$$

L_0 الطول الفعال (المكافئ) للعمود

I نصف قطر العطالة للمقطع العرضي . ويعطى بالعلاقة:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \dots(2-4)$$

I عزم عطالة المقطع العرضي

A مساحة المقطع العرضي

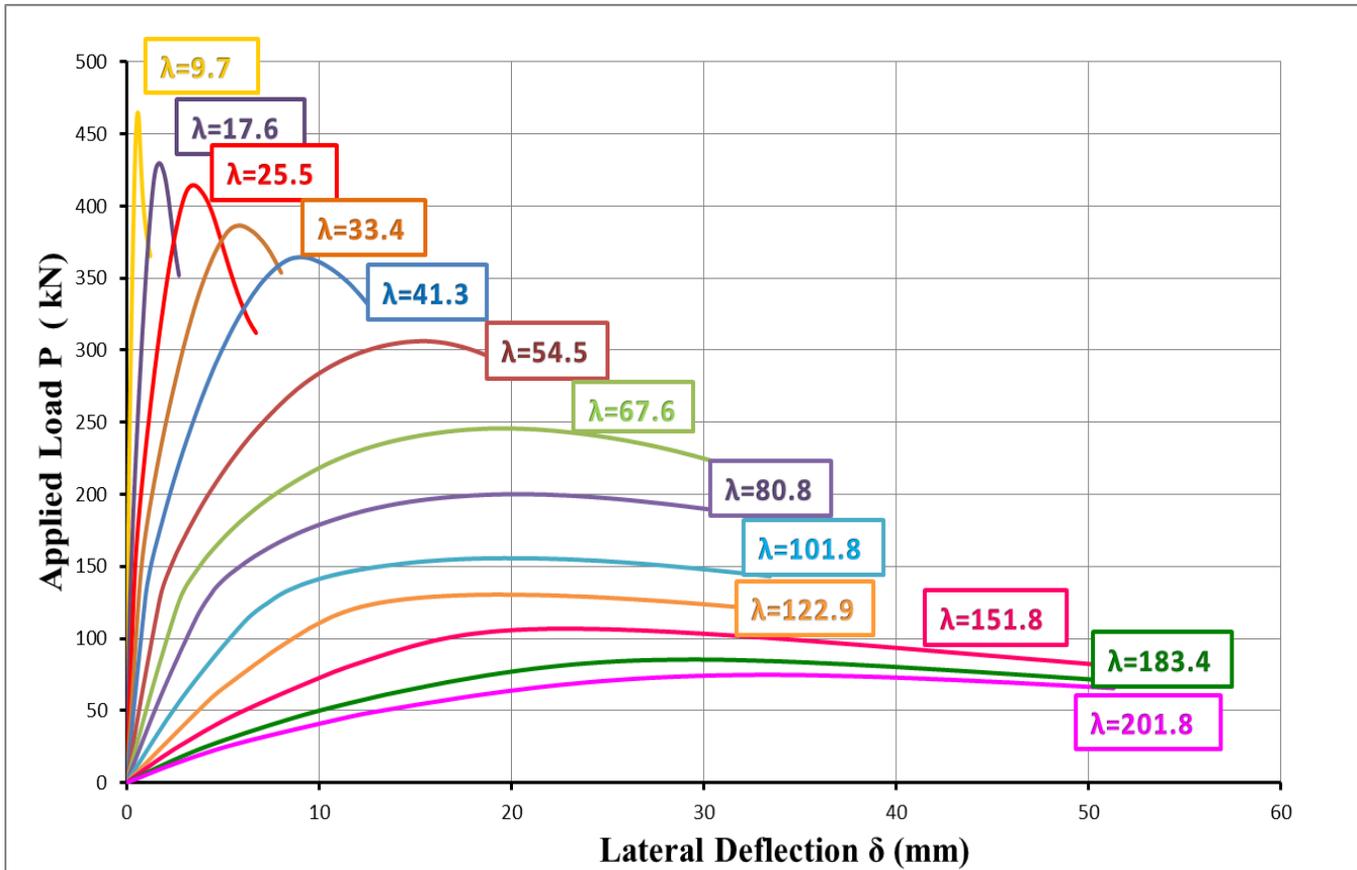
باعتبار أن الأعمدة متمفصلة من الطرفين فيؤخذ الطول المكافئ هو نفس طول العمود. وبما أن جميع الأعمدة لها نفس المقطع العرضي بالتالي تكون قيمة نصف قطر العطالة i ثابتة لجميع الأعمدة وتساوي $i=38$ mm .

يبين الجدول /1-4/ قيم الحمولة الأعظمية للأعمدة التي حصلنا عليها من الدراسة التحليلية لكل قيمة من قيم نسبة النحافة λ .

الجدول /1-4/ قيم الحمولة الأعظمية للأعمدة وفق الدراسة التحليلية

L (mm)	r (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	i (mm)	$\lambda=L_0/i$	U _{Pmax} (mm)	P max (kN)
300	76	18145.84	26202592	38	9.74	0.59	464
400	76	18145.84	26202592	38	12.37	0.96	442.7
500	76	18145.84	26202592	38	15.00	1.20	435.7
600	76	18145.84	26202592	38	17.63	1.71	429.78
900	76	18145.84	26202592	38	25.53	3.44	414.496
1200	76	18145.84	26202592	38	33.42	5.84	386.5
1500	76	18145.84	26202592	38	41.32	9.07	364.6
2000	76	18145.84	26202592	38	54.47	15.23	306.3
2500	76	18145.84	26202592	38	67.63	19.70	245.77
3000	76	18145.84	26202592	38	80.79	20.34	200.2
3800	76	18145.84	26202592	38	101.84	20.09	155.74
4600	76	18145.84	26202592	38	122.89	19.17	130.5
5700	76	18145.84	26202592	38	151.84	22.61	106.84
6900	76	18145.84	26202592	38	183.42	29.36	85.44
7600	76	18145.84	26202592	38	201.84	33.07	74.81

يبين الشكل /1-4/ منحنيات القوة-الانتقال الجانبي لجميع الأعمدة حيث يمثل المحور الشاقولي القوة المطبقة P (kN) والمحور الأفقي الانتقال الجانبي عند منتصف ارتفاع العمود δ (mm).

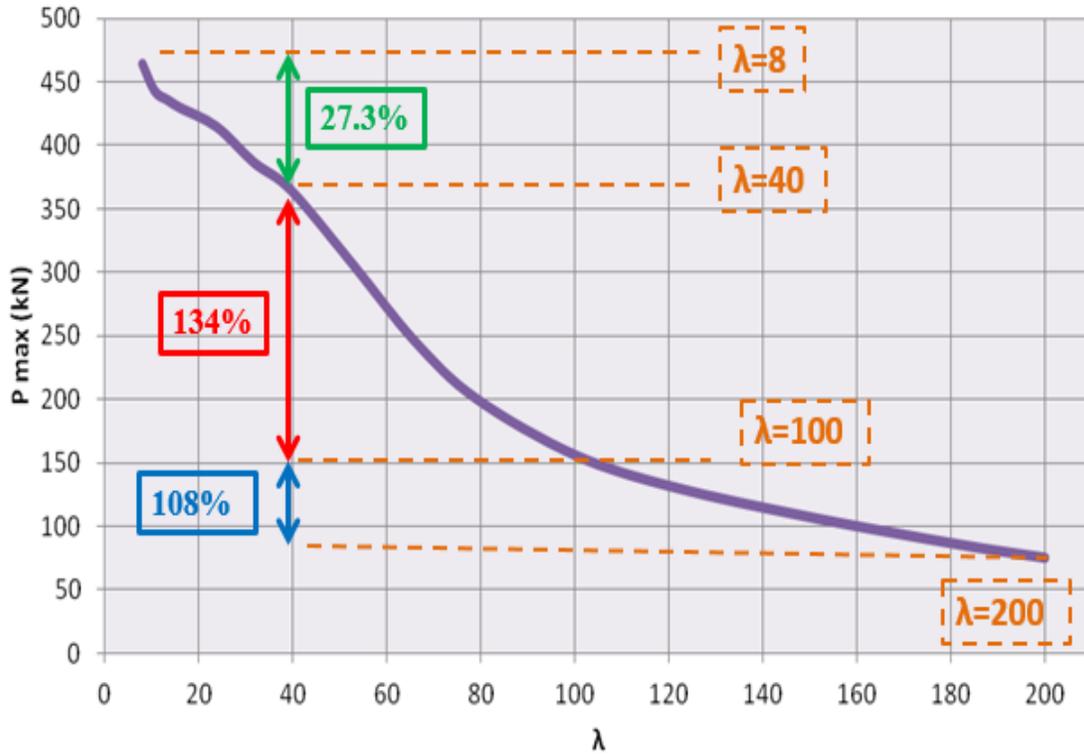


الشكل 4-1: منحنيات الحمولة – الانتقال الجانبي للأعمدة المدروسة وفق الدراسة التحليلية

نلاحظ من المنحنيات انخفاض قدرة تحمل العمود وزيادة الانتقال الجانبي عند منتصف الارتفاع مع زيادة نسبة النحافة λ . كما نلاحظ زيادة في سلوك المطاوعة للأعمدة مع زيادة نسبة النحافة بينما يكون السلوك ذو انهيار سريع (مفاجئ) عند قيم صغيرة لنسبة النحافة λ .

يبين الشكل 4-2/ الحمولة الأعظمية للأعمدة مع تغير نسبة النحافة، حيث يمثل المحور الأفقي نسبة النحافة λ والمحور الشاقولي الحمولة الأعظمية P_{max} .

نلاحظ من المنحني أن الفرق في الحمولة الأعظمية بين $\lambda=9.7$ و $\lambda=40$ لم يتجاوز 30% وهو فرق صغير نسبياً، ويزداد الفرق في الحمولة الأعظمية بين $\lambda=40$ و $\lambda=100$ ليصل إلى 134%، بينما يعود وينخفض بين $\lambda=100$ و $\lambda=200$ ليصل إلى 108%، أي أن أكبر انخفاض كان بين نسبة نحافة 40 و 100.



الشكل /2-4/ الحمولة الأعظمية للأعمدة مع تغير نسبة النحافة وفق الدراسة التحليلية

ويمكن أن نفسر ذلك بأنه في حال الأعمدة الطويلة بنسب نحافة كبيرة نسبياً تصبح هندسة الشكل هي المسيطرة في الانهيار بعكس الأعمدة الأقل نحافة حيث تكون مقاومة المادة هي المسيطرة في الانهيار، ولذلك يقل الفرق في الأعمدة بين نسب النحافة 100 و 200 لأن المادة لم يعد لها تأثير كبير في الانهيار، ويمكن توثيق ذلك أكثر في الفقرة 4-4.

3-4 دراسة سلوك الأعمدة البيتونية بعدة نسب نحافة مع تغير مقاومة البيتون على الضغط:

Behavior of Concrete Columns with Different Slenderness Ratios and Strength of Concrete:

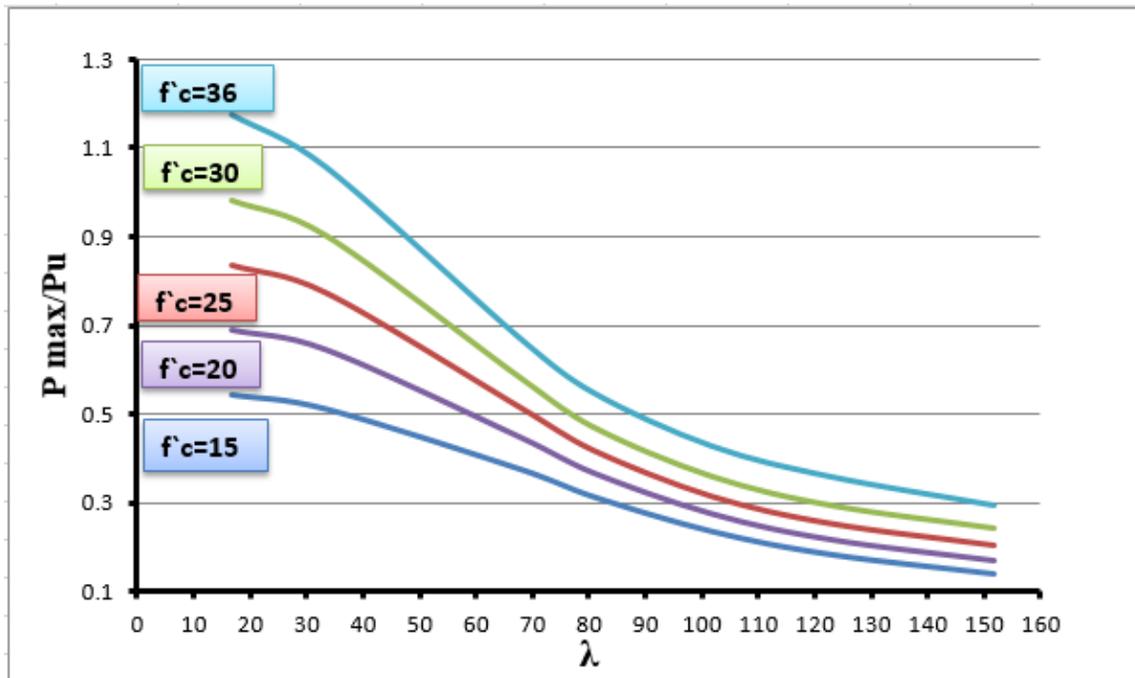
لمعرفة تأثير مقاومة البيتون على الضغط (f_c) على التحنيب في الأعمدة، قمنا بدراسة عدة قيم وهي $f_c = 15-20-25-30-36$ MPa: ومن أجل كل قيمة من هذه القيم أجرينا التحليل على عدة أعمدة تتراوح نسبة نحافتها بين 15-150 .

يبين الجدول /2-4/ قيم الحمولة الأعظمية التي حصلنا عليها من الدراسة التحليلية لكل قيمة من قيم f_c المدروسة ولنسب نحافة مختلفة.

الجدول/2-4/: قيم الحمولة الأعظمية للأعمدة لكل قيم f_c المدروسة وفق الدراسة التحليلية

L (mm)	$\lambda=Lo/i$	$f_c=15$	$f_c=20$	$f_c=25$	$f_c=30$	$f_c=36$
600	16.7	198.7	252.178	306	359	429.78
1200	33.4	186.95	235.92	283.244	330.1	386.5
2500	67.6	137.4	163.92	188.98	213.658	245.77
3000	80.7	114.36	134.1	153.07	172.38	200.2
3800	101.8	85.4	99.95	114.7	131.45	155.74
4600	122.9	66.27	78.62	92.2	107.62	130.5
5700	151.8	50.22	61.28	74.23	88.82	106.84

يبين الشكل /3-4/ عدة منحنيات لكل قيمة من قيم f_c المدروسة حيث يمثل المحور الشاقولي نسبة الحمولة العظمى P_{max} إلى قدرة تحمل المقطع العرضي للعمود (أي قدرة تحمل العمود القصير) P_u ويمثل المحور الأفقي نسبة نحافة λ .



الشكل/3-4/: منحنيات تغير قدرة التحمل بتغير معامل النحافة للأعمدة المدروسة لعدة قيم لمقاومة الببتون على الضغط وفق الدراسة التحليلية

إن التغير في قيمة الحمولة العظمى بين $\lambda=15$ و $\lambda=150$ لكل قيمة من قيم f_c المدروسة كانت كما يلي:

من أجل $f^c=15$ MPa كان الفرق في الحمولة الأعظمية % 295

من أجل $f^c=20$ MPa كان الفرق في الحمولة الأعظمية % 312

من أجل $f^c=25$ MPa كان الفرق في الحمولة الأعظمية % 312

من أجل $f^c=30$ MPa كان الفرق في الحمولة الأعظمية % 304

من أجل $f^c=36$ MPa كان الفرق في الحمولة الأعظمية % 302

أي أن الفرق كان تقريبا متساوي حوالي % 300 بين $\lambda=15$ و $\lambda=150$ لجميع قيم f^c المدروسة أي انخفضت الحمولة عندما أصبحت $\lambda=150$ إلى الربع مقارنة بالحمولة عند $\lambda=15$.

تم دراسة التغير في قيمة الحمولة الأعظمية مع تغير قيمة مقاومة البيتون على الضغط عند قيمة معينة لنسبة النحافة λ .

فمن أجل $\lambda=30$ زادت قدرة التحمل من $f^c=15$ إلى $f^c=36$ بنسبة % 107.

أما من أجل $\lambda=100$ زادت قدرة التحمل من $f^c=15$ إلى $f^c=36$ بنسبة % 82.

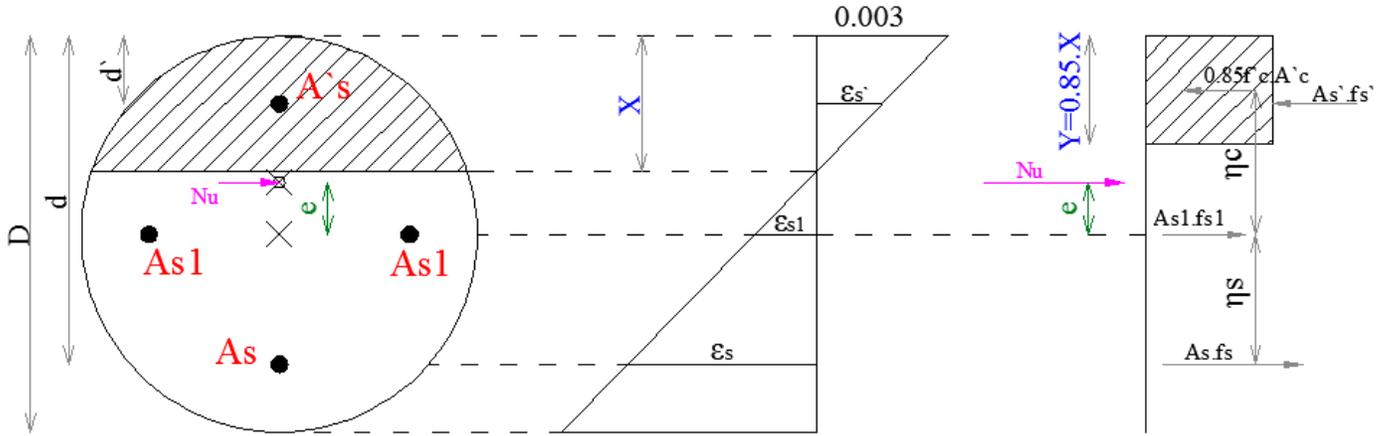
أي أن تحسين مقاومة العمود برفع قيمة مقاومة البيتون على الضغط يكون فعالا أكثر عند قيم صغيرة لنسبة النحافة.

4-4 دراسة حالات انهيار الأعمدة بتغير معامل النحافة:

Failure Modes of Columns with Different Slenderness Ratios:

ستتم دراسة حالات انهيار الأعمدة من خلال رسم منحنيات الحمولة-العزم للأعمدة ورسم مخطط الترابط للمقطع العرضي وفق ما ورد في الفقرة 2-4.

إن المقطع العرضي لجميع الأعمدة ثابت وهو عبارة عن مقطع دائري بقطر 152 mm مسلح بأربع قضبان من الفولاذ بقطر 6.4 mm (وهي نفس مواصفات الأعمدة المعتمدة في التجربة المرجعية) كما هو مبين في الشكل /4-4/ وبعتماد قيمة مقاومة البيتون على الضغط مساوية إلى $f^c=36$ MPa.



الشكل/4-4: المقطع العرضي للأعمدة المدروسة ومخطط الإجهادات والتشوهات

يتم رسم مخطط الترابط للمقطع العرضي وفق الكود العربي السوري بالخطوات التالية:

- فرض عدة قيم لارتفاع منطقة الضغط X
- حساب مساحة المنطقة المضغوطة A^c
- حساب الإجهادات الناشئة في قضبان الفولاذ من مخطط التشوهات المبين في الشكل /4-4/.
- من أجل التسليح A^s :

$$\frac{\varepsilon_s}{0.003} = \frac{x-d'}{x} \dots (3-4)$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \left(\frac{x-d'}{x} \right) \dots (4-4)$$

d' : بعد مركز ثقل التسليح المضغوط A^s عن أقصى ليف مضغوط.

$$f^s = \varepsilon_s \cdot E_s = 0.003 \left(\frac{x-d'}{x} \right) \cdot 195800 \dots (5-4)$$

$$f^s = 587.4 \left(\frac{x-d'}{x} \right) \dots (6-4)$$

وبتعويض $y=0.85x$ تصبح العلاقة:

$$f`s = 587.4 \left(\frac{\frac{y}{0.85} - d}{\frac{y}{0.85}} \right) \dots (7-4)$$

$$f`s = 587.4 \left(\frac{y - 0.85d}{y} \right) \dots (8-4)$$

• من أجل التسليح As:

$$\frac{\varepsilon_s}{0.003} = \frac{d-x}{x} \dots (9-4)$$

$$\varepsilon_s = 0.003 \left(\frac{d-x}{x} \right) \dots (10-4)$$

d: بعد مركز ثقل التسليح المشدود As عن أقصا ليف مضغوط.

$$f_s = \varepsilon_s \cdot E_s = 0.003 \left(\frac{d-x}{x} \right) \cdot 195800 \dots (11-4)$$

$$f_s = 587.4 \left(\frac{d-x}{x} \right) \dots (12-4)$$

وبتعويض $y=0.85x$ تصبح العلاقة:

$$f_s = 587.4 \left(\frac{0.85d-y}{y} \right) \dots (13-4)$$

• من أجل التسليح As1:

$$\frac{\varepsilon_{s1}}{0.003} = \frac{r-x}{x} \dots (14-4)$$

$$\varepsilon_{s1} = 0.003 \left(\frac{r-x}{x} \right) \dots (15-4)$$

r: نصف قطر المقطع العرضي.

$$f_{s1} = \varepsilon_{s1} \cdot E_s = 0.003 \left(\frac{r-x}{x} \right) \cdot 195800 \dots (16-4)$$

$$f_s1 = 587.4 \left(\frac{r-x}{x} \right) \dots (17-4)$$

وبتعويض $y=0.85x$ تصبح العلاقة:

$$f_s1 = 587.4 \left(\frac{0.85r-y}{y} \right) \dots (18-4)$$

- حساب Y_{NA} : وهو البعد بين مركز ثقل المنطقة المضغوطة ومركز ثقل المقطع العرضي.
- تطبيق معادلات الضغط اللامركزي الواردة في الكود العربي السوري:
علاقة القوة:

$$Nu = \Omega(0.85f_c.A_c + A_s.f_s + A`s.f`s + A_s1.f_s1) \dots (19-4)$$

علاقة العزم:

$$Mu = \Omega(0.85f_c.A_c.Y_{NA} + A_s.f_s.bs + A`s.f`s.bs` +$$

$$A_s1.f_s1.bs1) \dots (20-4)$$

- bs : بعد مركز ثقل التسليح A_s عن مركز ثقل المقطع العرضي. (ويساوي إلى 50 mm في حالتنا).
- $bs`$: بعد مركز ثقل التسليح $A`s$ عن مركز ثقل المقطع العرضي. (ويساوي 50 mm في حالتنا).
- $bs1$: بعد مركز ثقل التسليح A_s1 عن مركز ثقل المقطع العرضي. (ويساوي 0 في حالتنا).

أما قيمة Ω فتؤخذ لحالة المقاطع المعرضة لقوة ضغط لا مركزية من العلاقة الواردة في الفقرة 3-3-6 في الكود العربي السوري وهي:

$$0.9 \geq \Omega = 0.9 - 0.5 \left(\frac{Nu}{Nc} - 0.1 \right) \geq 0.7 \dots (21-4)$$

Nu : قوة الضغط المطبقة العرضي.

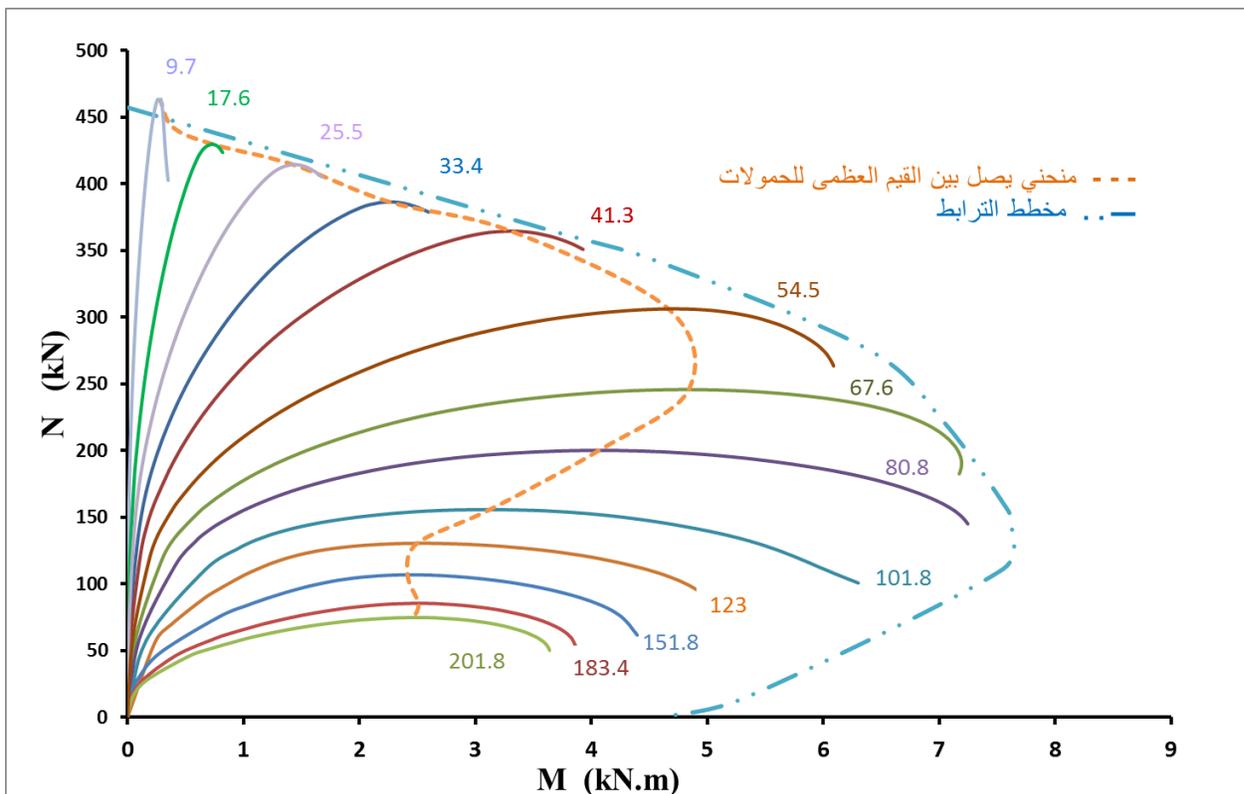
Nc : مقاومة المقطع الخرساني لوحده $(0.85f_c.A_c)$.

يبين الجدول /3-4/ قيم منحنى مخطط الترابط التي حصلنا عليها بتطبيق الخطوات السابقة.

الجدول/3-4: قيم منحنى مخطط الترابط للمقطع العرضي للأعمدة المدروسة

y	Ac	fs	f s	fs1	y.NA	Nu	Mu	φ	φ*Nu	φ*Mu
152	18145.8	693	693	693	0	653.69	0	0.7	457.585	0.000
122.4	15659.1	73.425	481.34	277.38	9.284	522.85	5.179	0.7	365.993	3.625
115	14729.4	40.35	474.52	257.43	12.562	491.36	6.455	0.7	343.950	4.518
95	11930.6	-74.82	450.75	187.97	22.266	395.35	9.110	0.7	276.743	6.377
80	9680.6	-198.98	425.13	113.07	30.105	315.72	10.070	0.7	221.001	7.049
60	6659.0	-461.11	371.04	-45.03	41.059	201.37	9.844	0.772	155.384	7.596
57.8	6333.2	-501.02	362.81	-69.11	42.292	188.13	9.722	0.783	147.377	7.616
49.13	5075.4	-693	323.17	-184.96	47.194	134.10	9.086	0.831	111.467	7.553
30	2535.1	-693	154.68	-677.47	58.229	17.96	5.956	0.9	16.164	5.360
26	2063.8	-693	88.11	-693	60.130	0.16	5.117	0.9	0.143	4.605

يبين الشكل /4-5/ منحنى مخطط الترابط للمقطع العرضي للأعمدة وكذلك منحنيات الحمل-العزم للأعمدة المدروسة والتي حصلنا عليها من الدراسة التحليلية.



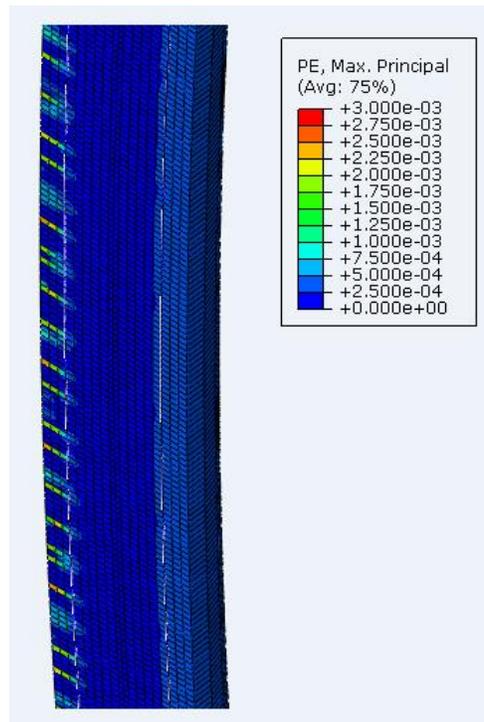
الشكل/4-5: منحنى مخطط الترابط للمقطع العرضي للأعمدة المدروسة ومنحنيات القوة-العزم للأعمدة وفق الدراسة التحليلية

نلاحظ من الشكل /4-5/ أن منحنيات العزم للأعمدة التي نسبة نحافتها أقل من 50 تكون فيها قيمة الحملية الأعظمية قريبة جداً من منحنى مخطط الترابط وهذا يعني أن المادة تصل إلى طاقة تحملها القصوى وتنهيار بعد ذلك، وانخفاض قيمة الحملية الأعظمية في هذه الأعمدة مع زيادة نسبة النحافة فهو كما تم ذكره سابقاً في الفقرة (4-2) – بسبب تأثير النحافة أو ما يسمى Slenderness Effect.

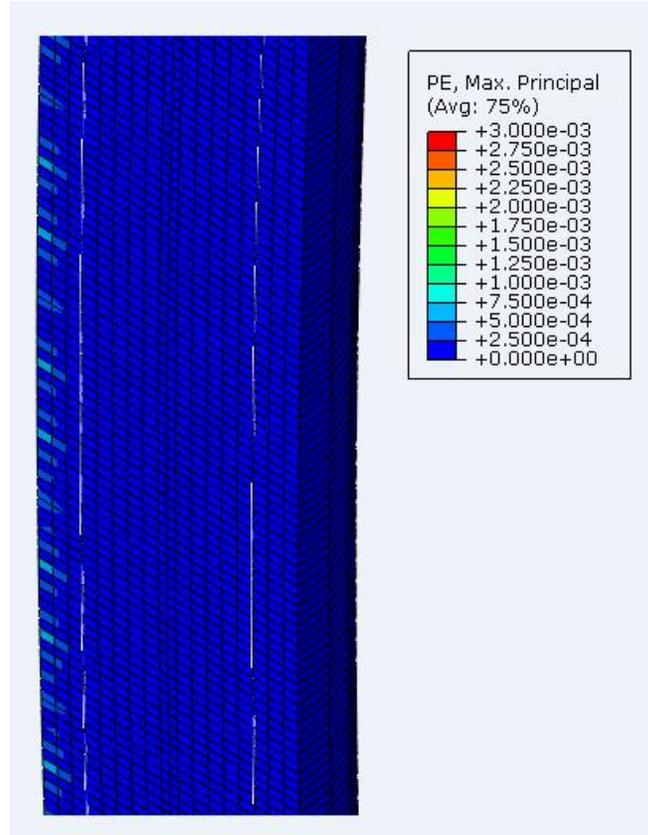
أما منحنيات العزم للأعمدة التي نسبة نحافتها تزيد عن 50 فتبين أن نقطة الحملية الأعظمية تتباعد عن منحنى مخطط الترابط باتجاه الداخل وهذا يعني وجود أثر للتخريب في هذه الأعمدة ويزداد وضوح هذا الأثر مع زيادة نسبة النحافة ويصبح انهيار هذه الأعمدة أقرب إلى فقدان الاتزان.

يبين الشكل /4-6/ والشكل /4-7/ التشوهات اللدنة الأعظمية في العمود ذو نسبة نحافة $\lambda=101.8$ و $\lambda=123$ على الترتيب عند منتصف ارتفاع العمود وعند قيمة الحملية العظمى.

حيث نلاحظ عدم وجود تشوهات لدنة كبيرة وتكاد تنعدم في العمود ذو نسبة النحافة 123 وهذا يعني انهيار العمود بوقت مبكر وعدم دخوله في المرحلة اللدنة بشكل كبير.



الشكل /4-6/: التشوهات اللدنة الأعظمية عند منتصف ارتفاع العمود $\lambda=101.8$ عند الحملية العظمى وفق الدراسة التحليلية



الشكل /4-7/: التشوهات اللدنة الأعظمية عند منتصف ارتفاع العمود $\lambda=123$ عند الحمل العظمى وفق الدراسة التحليلية

وبالتالي كلما زادت نسبة نحافة العمود يصبح عامل الشكل هو المسيطر على نمط الانهيار بينما تكون المادة هي العامل المؤثر على نمط الانهيار عند نسب نحافة صغيرة.

5-4 مقارنة النتائج التحليلية مع قيم علاقة أويلر:

Comparing the Analytical Results with Euler Formula:

تم حساب حمولة أويلر للأعمدة المدروسة تحليلياً بتطبيق العلاقة /2-14/ الواردة في الفقرة /2-5/ ومع أخذ قيمة القساوة EI وفق الكود الأمريكي حسب العلاقة /2-18/.

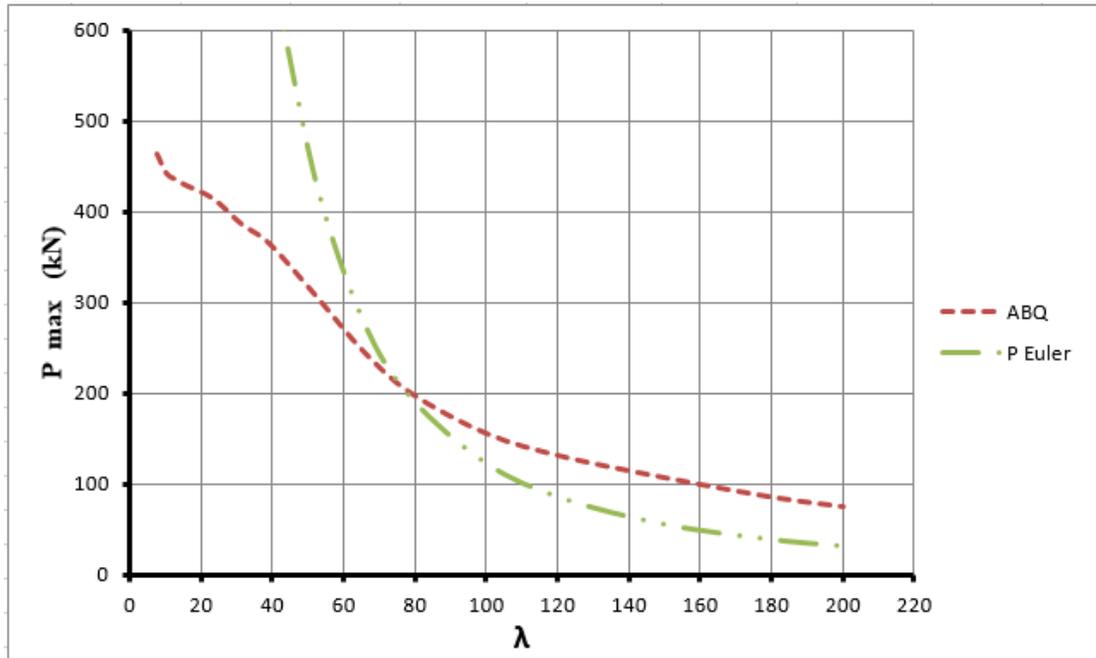
مع الأخذ بعين الاعتبار أن الطول المكافئ للأعمدة هو نفسه الطول الفعلي لأن الأعمدة متمفصلة من الطرفين $L_{eff}=L$.

يبين الجدول /4-4/ قيم الحمولة العظمية للأعمدة المدروسة وفق علاقة أويلر.

الجدول/4-4/: قيم الحمولة العظمية للأعمدة المدروسة وفق علاقة أويلر

L (mm)	λ	P (Euler) (kN)
300	7.9	13428.2357
400	10.5	8321.98041
500	13.2	5658.12703
600	15.8	4095.17815
900	23.7	1953.79474
1200	31.6	1139.76407
1500	39.5	745.801239
2000	52.6	429.024125
2500	65.8	278.327526
3000	78.9	195.049865
3800	100	122.744057
4600	121.053	84.2924436
5700	150	55.2167421
6840	180	38.5004947
7600	200	31.24868

يبين الشكل /8-4/ مقارنة بين المنحني الناتج من الدراسة التحليلية والمنحني الناتج من تطبيق علاقة أويلر حيث يمثل المحور الأفقي نسبة النحافة λ والمحور الشاقولي الحمولة الأعظمية Pmax.



الشكل/8-4/: منحني يمثل علاقة أويلر مع تغير نسبة النحافة ومقارنته مع المنحني الناتج عن الدراسة التحليلية

نلاحظ من الشكل وجود نقطة تقاطع بين المنحنيين عند قيمة $\lambda=80$ ، بينما عندما تكون $\lambda < 80$ فنلاحظ أن قيم علاقة أويلر أكبر بكثير من قيم الدراسة التحليلية أن قدرة تحمل المقطع لا تتأثر بعملية التحنيب الحاصلة في العمود.

أما عندما تكون $\lambda > 80$ فنلاحظ وجود تقارب بين المنحنيين ولكن قيم علاقة أويلر أقل من قيم الدراسة التحليلية حيث يصل الفرق إلى 40% عند قيمة $\lambda=200$ وبالتالي تكون هي العامل الحاسم في تحديد قدرة تحمل العمود.

أي أن علاقة أويلر تكون قابلة للتطبيق في حال قيم كبيرة لنسبة النحافة λ (في حالتنا أكبر من 80) أي عندما يكون انهيار الأعمدة أقرب إلى فقدان الاتزان.

6-4 مقارنة النتائج التحليلية مع علاقات الكود السوري:

Comparing the Analytical Results with Syrian Code Formula:

تم حساب الحمولة الأعظمية للأعمدة المدروسة وفق الكود العربي السوري وذلك حسب الحالتين التاليتين:

1- للأعمدة التي نسب نحافتها $\lambda \leq 40$:

تم حساب الحمولة الأعظمية وفق العلاقة /23-2/ الواردة في الفقرة /6-2/ وذلك مع أخذ عوامل التخفيض بعين الاعتبار وأخذ قيمة عامل تخفيض المقاومة $\Omega=0.7$ كون الأعمدة عناصر معرضة للضغط.

$$f_y=693 \text{ MPa} \quad \text{حيث}$$

$$f_c=36.6 \text{ MPa}$$

$$A_c=18145.8 \text{ mm}^2$$

$$A_s=128.68 \text{ mm}^2$$

وبالحساب نجد أن الحمولة الأعظمية تساوي:

$$P_u=366 \text{ kN}$$

وهي ثابتة لجميع الأعمدة التي نسبة نحافتها أقل من 40 لأن الكود السوري لا يأخذ أثر التحنيب في هذا المجال.

2- للأعمدة التي نسبة نحافتها $40 < \lambda \leq 80$:

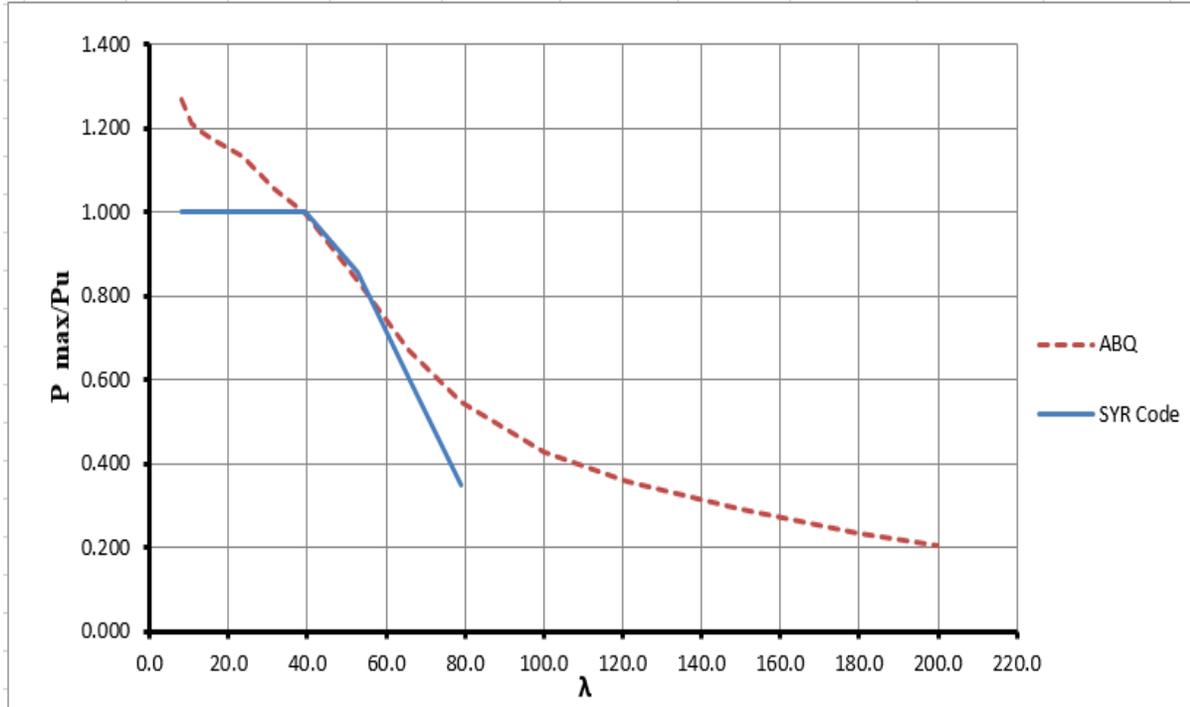
تم حساب المعامل K_b لكل عمود حسب نسبة نحافته λ وفق الجدول (10-3) الوارد في الكود العربي السوري.

ويبين الجدول /4-5/ قيم K_b والحمولة الأعظمية وفق الكود العربي السوري للأعمدة المدروسة.

الجدول/4-5/: قيم المعامل K_b والحمولة الأعظمية للأعمدة وفق الكود العربي السوري

L (mm)	λ	K_b	Pu (kN)
300	7.9	-	366.068
400	10.5	-	366.068
500	13.2	-	366.068
600	15.8	-	366.068
900	23.7	-	366.068
1200	31.6	-	366.068
1500	39.5	-	366.068
2000	52.6	1.17	312.878
2500	65.8	1.655	221.189
3000	78.9	2.874	127.372

يبين الشكل/4-9/ مقارنة بين المنحني الناتج من الدراسة التحليلية والمنحني الناتج من الكود العربي السوري حيث يمثل المحور الأفقي نسبة النحافة λ والمحور الشاقولي الحمولة الأعظمية P_{max} منسوبة إلى قدرة تحمل العمود القصير P_u .



الشكل/4-9: مقارنة بين منحنى الدراسة التحليلية والمنحنى الناتج من علاقة الكود العربي السوري

نلاحظ أن قدرة التحمل ثابتة عندما تكون $\lambda < 40$ وفق الكود السوري حيث يعتبر الكود أن العمود قصير ولا داعي لأخذ أثر التحنّب بعين الاعتبار، أي يزداد عامل الأمان وفق الكود السوري عندما تقل قيمة λ عن 40 حيث يصل إلى 1.27 عندما $\lambda = 9.7$.

عندما تكون $\lambda = 40-60$ نلاحظ تساوي القيم في الحالتين.

عندما تصبح $60 < \lambda < 80$ تصبح قيم الكود السوري أقل من قيم الدراسة التحليلية أي يزداد عامل الأمان وفق الكود السوري حيث يصل إلى 1.57 عندما تصل λ إلى 80.

7-4 خلاصة الفصل الرابع: Chapter 4 Conclusion

في هذا الفصل تم إجراء دراسة تحليلية وفق طريقة العناصر المحدودة على أعمدة بيتونية دائرية بنسب نحافة مختلفة وتبين أن أكبر فرق في قدرة التحمل كان بين نسبة نحافة 40 و 100 حيث وصل إلى 134%، كما تم التوصل إلى أن تحسين مقاومة العمود عند رفع قيمة مقاومة البيتون على الضغط يكون فعالاً أكثر عند قيم صغيرة لنسب النحافة، وتبين أن الأعمدة التي نسبة نحافتها أكبر من 40 يبدأ فيها ظهور أثر التحنيب ويصبح انهيارها أقرب إلى فقدان الاتزان، كما تمت مقارنة النتائج التحليلية مع علاقة أويلر حيث تبين أن المجال الفعال لعلاقة أويلر هو من أجل نسبة نحافة أكبر من 80 (للحالة المدروسة في هذا البحث)، وأخيراً تمت مقارنة النتائج التحليلية مع علاقة الكود العربي السوري حيث تبين وجود عوامل أمان وفق الكود العربي السوري تصل إلى 1.57 من أجل نسبة نحافة تساوي 80. وعليه وفي ضوء هذه الدراسة يمكن تلخيص النتائج التي تم التوصل إليها في الفصل التالي مع بعض التوصيات المتعلقة بموضوع متابعة البحث.

الفصل الخامس

النتائج والتوصيات

Conclusions and Recommendations

1-5 النتائج: Conclusions

تم في هذا البحث دراسة أثر نسبة النحافة على قدرة تحمل الأعمدة البيتونية المسلحة بمقطع دائري، حيث تمت الدراسة باستخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM) واعتماد التحليلي اللاخطي (Non-Linear Analysis) الذي يأخذ بعين الاعتبار لا خطية المادة واللا خطية الهندسية للشكل.

تم دراسة سلوك الأعمدة البيتونية الدائرية المسلحة مع تغير نسبة النحافة ومع تغير مقاومة البيتون على الضغط، وتراوحت نسب النحافة المدروسة بين 9.7 و200، ثم تمت دراسة أنماط انهيار الأعمدة مع تغير معامل النحافة، وأخيراً تم إجراء دراسة مقارنة للنتائج التحليلية مع قيم علاقة أويلر ومع قيم علاقة الكود العربي السوري. مع التنويه إلى أن هذه النتائج تخص الحالة المدروسة وليست نتائج معممة، ويحتاج تعميم هذه النتائج يحتاج إلى دراسة عدد كبير من الأعمدة من حيث أبعاد المقطع العرضي وأشكاله وأطوال الأعمدة ونسب التسليح.

ونبين فيما يلي النتائج التي تم التوصل إليها في نهاية هذا البحث:

1. تتناقص قدرة تحمل الأعمدة البيتونية الدائرية المسلحة مع زيادة نسبة النحافة بنسبة 30% مع تغير نسبة النحافة من 9.7 إلى 40، في حين أن هذه الفروقات تصل إلى 134% عند تغير نسبة النحافة من 40 إلى 100 وتعود لتتخفف هذه الفروقات إلى 108% عند تغير نسب النحافة من 100 إلى 200.
2. يظهر أثر تغير مقاومة البيتون على الضغط f_c بشكل أكبر مع نقصان نسبة النحافة.
3. يظهر تأثير التحنيب على الأعمدة عند نسب نحافة $\lambda \geq 50$ ويزداد هذا الأثر مع زيادة نسبة النحافة ويصبح انهيارها أقرب إلى فقدان الاتزان.

4. يعطي الكود العربي السوري قدرة تحمل ثابتة للأعمدة التي نسب نحافتها $\lambda \leq 40$ وهذا لصالح الأمان , وتصبح قيمه متطابقة مع الدراسة التحليلية من أجل $60 \geq \lambda \geq 40$, وعندما تكون $\lambda > 60$ يعطي عامل أمان يزداد مع زيادة λ حيث يصل إلى 1.57 من أجل $\lambda=80$.
5. تكون قيم علاقة أويلر كبيرة جدا بحال $\lambda < 80$ وبالتالي لا تكون هي القيمة المعتمدة في هذا المجال، بينما من أجل $\lambda > 80$ تكون القيم أقل من قيم الدراسة التحليلية بفارق يصل إلى 40% أي لصالح الأمان، وبالتالي يمكن اعتماد قيم العلاقة في حال نسب نحافة أكبر من 80.

2-5 التوصيات: Recommendation

- 1- دراسة تأثير نسبة النحافة على الأعمدة من أجل أشكال مختلفة للمقطع العرضي (مربع، مستطيل).
- 2- دراسة تأثير تغيير نسبة التسليح على سلوك الأعمدة الطويلة.
- 3- دراسة تأثير تغير اللامركزية الابتدائية على قدرة التحمل في الأعمدة وأثرها على التحنيب.
- 4- دراسة تأثير النحافة في الأعمدة الدائرية بتسليح حلزوني.
- 5- دراسة تأثير التدعيم بالألياف البوليميرية ومدى فعاليتها في الحد من حدوث الانهيار بسبب التحنيب في الأعمدة الطويلة.
- 6- دراسة تأثير الحمولات الأفقية (رياح – زلازل) مع تغير معامل النحافة.

References : المراجع

ABAQUS Version 6.12 (2012). “**ABAQUS/Standard User’s Manual**”. ABAQUS Inc.,USA

ACI 318M-08 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary.

A. Deiveegan, G. Kumaran. (2011). “**A Study of Combined Bending and Axial Load on Concrete Columns Reinforced with Non-Metallic Reinforcements**”. European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.56 No.4 (2011), pp.562-572.

ASSAKAFF.I (2007). “**Combined compression and buckling: Columns**”. Department of civil and Environmental Engineering, University of Maryland, eastern US.

Belouar, A. Laraba , R. Benzaid, and N. Chikh . (2013). “**Structural Performance of Square Concrete Columns Wrapped with CFRP Sheets**”. Procedia Engineering 54 (2013) 232 – 240

Beer F.B , Johnston E.R .JR , Dewolf J.T , Mazurek D.F ,(2012) , “**Mechanics Of Materials**” McGraw-Hill, New York.

BS EN 1992-1 Eurocode 2, “**Design of concrete structures**” , Part 1-1: General rules and rules for buildings.

Case .J , Chilver .L , Ross C T.F .(1999). “**Strength of Materials and Structures**” United Kingdom.

CEB-FEB (2010) , (**Model Code**). First Complete Draft, Volume 1, FIB – International Federation for Structural Concrete, 1-292.

Paul Frost. (2011). “**Second order effects in RC columns: comparative analysis of design approaches**”. Master Thesis, GENT University, Germany.

CHAI H. YOO, SUNG C. LEE. **“STABILITY OF STRUCTURES Principles and Applications”**. Elsevier’s Science & Technology Rights Department in Oxford, UK.

Fitzwilliam.J.M. (2006). **“Slender Eccentrically Loaded Reinforced Concrete Columns”**. Queen’s University, Kingston,Ontario,Canada.

Hyo-Gyoung Kwak , Jin-Kook Kim .(2005). **"Nonlinear Behavior Of Slender RC Columns (2). Introduction of design formula"**. Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea.

Hyo-Gyoung Kwak , Jin-Kook Kim.(2004) . **"Ultimate resisting capacity of slender RC columns"**. Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1Guseong-d ong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Republic of Korea.

J. Saravanan, K. Suguna and P.N. Raghunath. (2012). **“DUCTILITY BEHAVIUOR OF HIGH STRENGTH CONCRETE COLUMNS WITH GFRP WRAPS”**. ASIAN JOURNALOF CIVILENGINEERING (BUILDING ANDHOUSING) VOL. 13, NO. 6 (2012) PAGES 719-728.

KMIECIK.P, KAMIŃSKI.M. **"Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration"**. Wrocław University of Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland.

R.Porras , J.R.Carmona , R.C.Yu , G.Ruiz. (2009).**"Experimental Study On The Fracture Of Lightly Reinforced Concrete Elements Subjected To Eccentric Compression"** . University of Castilla -La Mancha .Spain.

Wang C.M , Wang C.Y , Reddy J.N (2005). **“Exact Solution for Buckling of Structural Members”** CRC Press LLC, Boca Raton, Florida

Z.P.Bazant , Y.W.Kwon.(1994) . "**Failure Of Slender And Stocky Reinforced Concrete Columns: Tests Of Size Effects**" Department of civil engineering , Northwestern University , Evanston ,USA.

الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة –دمشق 2004

ABSTRACT

Columns is one of the more important members in structures. It carry on the loads of slabs and beams and transfer it to the foundations. Therefor the stability of columns is important to ensure the stability of whole structure and protect it from failure.

Loads applied to the columns are either axial compression loads or axial loads with bending moments, and the failure modes of columns differs according to its long , its supports , and type of loads.

Buckling is a very important phenomenon that affects to the columns, it may cause instability and sudden failure.

The objective of this research is study the behavior of short and long reinforced concrete columns with circular cross sections and determine the failure mode. The variables are slenderness ratios and compression strength of concrete.

Finite element method FEM is used in this research and non-linear analysis is taken into account.

This study shows the effect of slenderness ratio on the capacity of concrete columns and its failure modes, and shows the range of corresponding and difference of Euler formula and Syrian code formula when it is compared with analysis results.

Damascus University
Faculty of Civil Engineering
Department of Structural Engineering

“Effect of slenderness on the capacity of concrete columns”

Thesis Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Science in Structural Engineering

By

Salma Al Khateeb

Supervisor

Dr. Haytham Zarzour

Damascus 2015