

تصميم العناصر الخرسانية باستخدام طريقة دعائم الضغط وعناصر الربط (Strut-Tie Method)

■ أ. سالمة على أبوكيل *

● تاريخ استلام البحث 2023/11/25م ● تاريخ قبول البحث 2024/01/25م

■ المستخلص:

التصميم باستخدام طريقة دعائم الضغط وعناصر الربط (STM)، يعتبر أداة هندسية فعالة، فمع قدر كافٍ من الخبرة، يمكن أن يوفر لمهندسي التصميم حلولاً هندسية بسيطة للمشكلات الهيكلية المعقدة.

وتعتبر طريقة بسيطة وتعتبر بشكل فعال عن أنماط الإجهاد المعقدة، والتي يتم تمثيلها كنماذج جمالون مثلثية معتمدة على طريقة الجمالونات. حيث يمثل النموذج نظاماً يشبه الجمالون في الهيكل وينقل القوى من نقاط التحميل إلى الركائز. وتتكون أعضاؤه المعرضة للضغط من الخرسانة، في حين إن أعضائه المعرضة للشد تتكون من حديد التسليح. يمكن تطبيق طريقة STM على العديد من عناصر الهياكل الخرسانية، كما هو الحال في المفاصل، والأظفار الخرسانية، والكمرات العميقة، وكذلك في المناطق القريبة من القوى المركزة والفتحات أو أي اضطراب آخر في الانفعالات.

الكلمات الرئيسية: التصميم الهندسي، الخرسانة، الجمالون، دعائم الضغط.

■ Abstract:

Designing by Strut-and-Tie Method (STM) is a powerful engineering tool where the engineer stays in control. With a reasonable amount of experience, it can help design engineers provide simple engineering solutions to complex structural problems.

Strut and tie modelling (STM) is a simple method which effectively expresses complex stress patterns as triangulated models. The model visualizes

* محاضر مساعد بقسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس. E- mail:s.abukil@uot.edu.ly

a truss-like system in a structure and transmits forces from loading points to the supports. Truss members that are in compression are made up of concrete, while truss members that are in tension consist of steel reinforcement.

STM can be applied to many elements of concrete structures, such as in joints, corbels, and deep beams, as well as in regions near a concentrated force and openings or another discontinuity.

● **Keywords:** STM, Strut, Tie, Concrete Structures.

■ المقدمة:

عند مواجهة حالات الاجهاد المعقدة في الخرسانة المسلحة والخرسانة سابقة الإجهاد والتي تظهر سلوكا غير خطي للانفعالات، يصبح من الصعب اتباع طرق التصميم العادية. والتي تفترض توزيع الانفعال الخطي لجميع مراحل التحميل على كامل القطاع، إلا إن هذه الفرضية غير صحيحة في بعض أجزاء المنشأ الخرساني كالكمرات العميقة. حيث إن الانفعالات فيها تتبع التوزيع غير الخطي، ولتصميم هذه الأجزاء يتم التنبؤ بمسارات الضغط والشد فيها وتحويلها إلى عناصر جمالون ذات قوى إجهاد محورية وهذه الطريقة تسمى (Strut and Tie method)، والتي تأخذ في الاعتبار تأثيرات جميع القوى المحورية والقصر والعزوم في وقت واحد. وتعتبر واحدة من أكثر طرق التصميم المفيدة للقطاعات الحرجة للقصر.

■ مشكلة البحث:

إلقاء الضوء على التحديات في تطبيق طريقة (STM) وكيفية بناء نموذج الجمالون. وإذا كان من الممكن انشاؤه، فهل عناصره كافية أم نحتاج لإضافة أو تقليل للعناصر؟ وإذا كان هناك نموذجان أو أكثر لنفس المنشأ، أيهما أفضل؟

■ أهداف البحث:

نظرا لندرة المراجع والدراسات حول هذه الطريقة باللغة العربية، فإن هدف البحث الرئيسي هو تقديم الطريقة باللغة العربية وشرح خطواتها وأساسيات التصميم الصحيح بها من حيث بناء نموذج الجمالون، والتعريف بعناصره وبعض القواعد والارشادات لتصميم

الحالات الحرجة للعناصر الخرسانية، وفقا لمعايير المواصفة الأمريكية (14-ACI-318).

■ أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في إبراز أهمية طريقة دعائم الضغط وعناصر الربط، ومعرفة الكيفية التي يتم بها تصميم الأجزاء المعقدة من المنشآت والتي لا تتبع النظرية المرنة في التحليل والتصميم، بحيث يتم اللجوء إلى طريقة أخرى لفهم سلوكها وتصميمها بشكل آمن واقتصادي. وهذه الطريقة المهمة في التصميم هي التي يتمحور حولها هذا البحث.

■ منهجية البحث:

يعتمد البحث على الجانب التحليلي النظري للمعلومات والبيانات الواردة في المواصفة الأمريكية وبعض الكتب الأخرى حول طريقة التصميم (STM).

● تاريخ ظهور طريقة دعائم الضغط وعناصر الربط (STM):

لم تكن طريقة (STM) شائعة الاستخدام حتى أواخر القرن الماضي، بسبب عدم وجود معايير تصميم واضحة، وكان استخدامها محدودا بشكل عام. ومع ذلك، في أوائل السبعينات من القرن الماضي تم استخدام نمذجة الجمالون لحل بعض الحالات الخاصة من قبل (1971) (Lambert & Thurlimann) ثم بدأت تتبين كطريقة حل من قبل (1985) (Marti) و (1987) (Schlaich). ثم ظهرت في نصوص ((Collins & Mitchel (1991)) و (1992) (MacGregor) ومن ثم أصبحت هذه الطريقة أكثر قبولا وانتشارا حتى تم تضمينها في مواصفات (AASHTO LRFD) في سنة (1994)، بينما كان أول ظهور لها في مواصفات التصميم الأمريكية في (02-ACI 318) الملحق A.

● استعمالات الطريقة:

- تصميم الكمرات العميقة (Deep Beams). والأعمدة الساندة (Pile Caps) والظفر الخرساني (Corbels).

- تصميم مناطق الانفعالات غير الخطية (D- region): كمناطق فتحات الكمرات أو بالقرب من الأحمال المركزة.

● أساسيات وفرضيات الطريقة:

- يجب تطبيق الأحمال الخارجية عند العقد. وإذا كان الحمل موزعا فيجب تحويله إلى تحميل مركز في عدة نقاط على امتداد طول الكمرة. وينبغي الحفاظ على توازن القوى داخليا وخارجيا.
- يجب أن يصل التسليح للخضوع قبل وصول الخرسانة للفشل (ممتولية كافية).
- يتم إهمال الشد في الخرسانة. والقطاع متشقق بالكامل.
- يجب أن تكون القوى في عناصر الضغط والشد، محورية.
- الإجهاد المسبق عبارة عن حمل خارجي.
- تصميم دعائم الضغط وعناصر الربط والعقد يجب أن يؤسس على أن المقاومة الاسمية المخفضة لعناصر النموذج أكبر من القوى الداخلية الناجمة عن الأحمال الخارجية المكبرة كالتالي:

$$\phi F_n \geq F_u \quad (1)$$

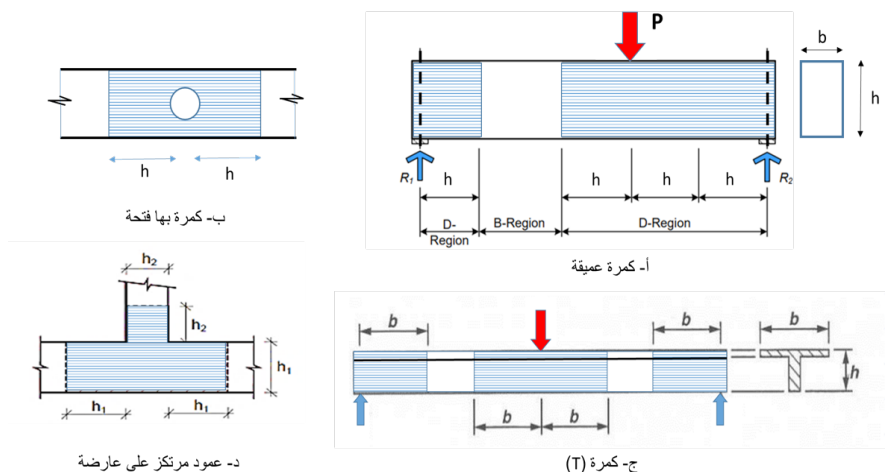
حيث إن: (F_n) المقاومة الاسمية لعناصر الضغط والشد ونطاق العقدة.
ومعامل التخفيض ($\phi = 0.75$).

(F_u) هي القوة في دعامة الضغط او عناصر الربط أو وجه العقدة والتي تكون ناتجة عن الأحمال المكبرة.

مناطق الانفعالات الخطية (B) وغير الخطية (D):

- تمثل المناطق B (Beam أو Bernoulli) أجزاء من العنصر حيث يمكن تطبيق فرضية برنولي "المقطع يظل مستوياً قبل وبعد الانحناء". لذا يمكن تطبيق النظرية المرنة عند تصميم هذا الجزء من القطاع. فسلوك المنطقة B يعتبر واضحاً وبشكل جيد ويمكن التنبؤ بسلوك الانحناء خلال هذه المنطقة بأكملها من خلال عمليات حسابية بسيطة. ويتم تصميم المناطق B باستخدام الطرق التقليدية المنصوص عليها في المواصفات.

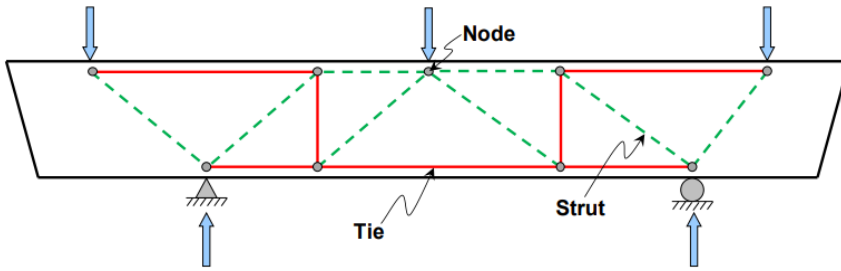
- المناطق (D) (Disturbed or Discontinuity region) هي جميع المناطق الواقعة خارج المناطق B حيث لا يظل المقطع العرضي مستويا بعد التحميل، ويكون توزيع الانفعال غير خطي خلال عمق القطاع. ويفترض عادة وجود مناطق (D) في أجزاء من العنصر الإنشائي، حيث تحدث انقطاعات (أو اضطرابات) في توزيع الإجهاد بسبب القوى المركزة (الأحمال أو ردود الأفعال)، أو التغيرات المفاجئة في الأبعاد أو في اتجاه العنصر، وبالقرب من الفتحات في الكمرات أو الحوائط. ويشير مبدأ سانت فينانت (St. Venant) إلى أن الإجهادات الناتجة عن الحمل المحوري والانحناء تقترب من التوزيع الخطي على مسافة معينة من الانقطاع. وتعتبر هذه المسافة بشكل عام هي بعد المقطع العرضي الأكبر للعضو، أي العمق (h) أو العرض (b). حيث تحدد المواصفة الأمريكية (ACI) المنطقة (D) بأنها جزء العنصر الموجود على مسافة تساوي ارتفاعات القطاع (h) أو العمق (d) من مركز القوة أو رد الفعل كما تنص عليه المواصفة (AASHTOO LRFD). حيث أن (d) هو العمق الفعال للكمرة، وإذا تداخلت منطقتان (D) أو التقتيا، فيمكن اعتبارهما منطقة (D) واحدة. ويوضح الشكل (1) المناطق (B&D) لبعض أنواع العناصر الإنشائية المختلفة.



شكل (1) توضيح المناطق (B&D) لبعض حالات العناصر الإنشائية.

● عناصر نموذج الجمالون:

يتكون الجمالون من دعائم الضغط (Struts) والتي تمثل الخرسانة وترسم بخط متقطع، وعناصر الربط (Ties) والتي تمثل التسليح وترسم بخط متصل، وترتبط عناصر الجمالون معا بواسطة عقد (Nodes) كما يظهر في الشكل (2).



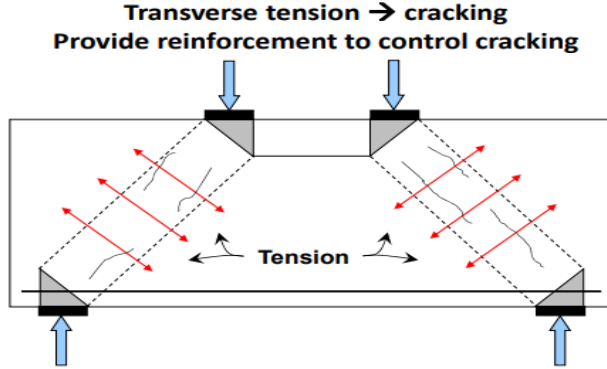
شكل (2) العناصر المكونة لنموذج الجمالون

● أولاً: دعائم الضغط (struts):

هي عناصر الضغط والتي تمثل مجال إجهادات الضغط في العنصر. حيث تكون دعائم الضغط قطرية وبشكل عام موازية لإجهادات الضغط ولمحور التشقق المتوقع، ونتيجة لهذا الضغط، تنشأ إجهادات شد في وسط دعامة الضغط كما في الشكل (3). والذي يستوجب وضع تسليح مائل في هذه المنطقة، ولتعذر ذلك عملياً، يستبدل بوضع شبكة تسليح رأسي وأفقي لتغطية تأثير التسليح المائل المراد إضافته لمنع التشققات. لذا فدعامة الضغط مكونة في المقام الأول من الخرسانة أو مزيج من الخرسانة وتسليح الضغط والذي يكون مهماً لمنع الانهيار في هذا الجزء. وتعتمد منطقة الضغط على ثلاثة عناصر هي مقاومة الخرسانة، وقيمة الأحمال، وزاوية ميل دعامة الضغط اعتماداً على بعدها عن نقطة التحميل، حيث ينص مبدأ سانت فينانت (St. Venant) على أن: "التأثيرات الموضعية الناجمة عن أي حمل يعمل على الجسم سوف تتبدد أو تهدأ داخل المناطق التي تكون بعيدة بما فيه الكفاية عن موقع الحمل."

STM FUNDAMENTALS

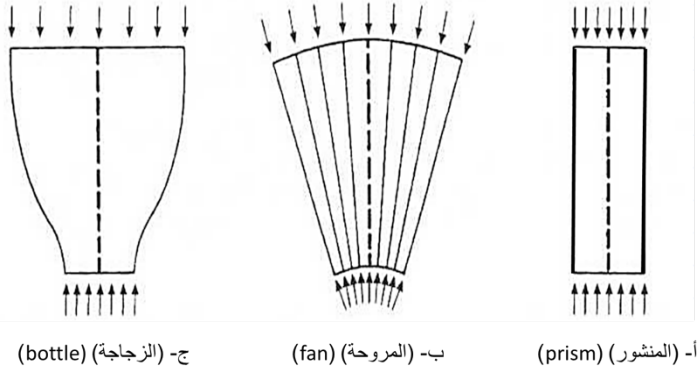
Diagonal Tension \perp to Interior Struts



شكل (3) توضيح اتجاه دعامة الضغط الموازية للتشققات الناجمة من الشد القطري.

● أنواع دعائم الضغط:

- النوع الأول هو المنتظم (prism) الذي له عرض ثابت على امتداد القطاع، وهو شكل عملي أكثر منه واقعي لسلوك الضغط في العنصر. فعندما تكون الأحمال منتظمة، يفترض توزيع إجهادات منتظم وبالتالي مساحة دعامة الضغط واحدة على امتداد القطاع. كما في الشكل (4 - أ).
- الشكل الثاني هو الزجاجاة (bottle) التي تتمدد فيها إجهادات الضغط من الوسط وتتكمش عند الأطراف. وهو سلوك واقعي للإجهادات عبر العنصر، ويتم تحويله إلى النوع الأول لتبسيط الحل. كما يمكن إنشاء نموذج (STM) مصغر داخل دعامة الضغط نفسها وتصميمها بشكل أكثر دقة. ويوضح الشكل (4 - ج) دعامة الضغط (الزجاجاة).
- النوع الثالث هو المروحة (fan) حيث تلتقي مجموعة من دعائم الضغط ذات الميول المتفاوتة عند عقدة واحدة. وعادة ما تظهر عند وجود الأحمال الموزعة على العنصر والتي تنتقل إلى ركيزة واحدة. كما في الشكل (4 - ب).



شكل (4) أنواع دعائم الضغط. (C.C.FU, 2001)

فشل دعائم الضغط: لكونها تسلك سلوك الاعمدة في المنشآت الخرسانية فهي تنهار بسبب التالي:

- انهيار مقاومة الضغط في الخرسانة.
 - نتيجة الشد القطري.
 - نتيجة التشققات الحاصلة في دعامة الضغط (Strut).
 - حدوث الانبعاج في دعامة الضغط (Strut).
- ولتلافي ذلك: يتم تقليل إجهادات الضغط ونسبة النحافة وإضافة تسليح في مناطق الضغط.

تصميم دعائم الضغط: يتم تحديد قدرتها من خلال القوة الفعالة مضروبة في مساحة مقطعها العرضي. ويتم التحكم في عرضها من خلال عرض المنطقة العقدية أو صفيحة التحميل. ويتأثر هذا العرض بموقع وتفاصيل التسليح وأطوال التماسك وبالغطاء الخرساني أيضا.

(f_{ce}) مقاومة الضغط الفعالة لدعامة الضغط:

$$f_{ce} = 0.85\beta_s f'_c \quad (2)$$

- وتم تخفيض مقاومة ضغط الخرسانة (f'_c) بمعامل تخفيض يساوي (0.85). وذلك مراعاة لمدة التحميل القصير في الاختبار، وكذلك لعملية النضح، واختلاف شكل الكمرات والأعمدة عن أسطوانة الاختبار.

- أما العامل الآخر فهو معامل الشكل (β_s) والذي يختلف باختلاف شكل دعامة الضغط كما في الجدول التالي:

جدول (1) قيم (β_s) اعتمادا على أبعاد وموقع دعامة الضغط (ACI Code table 23.4.3).

قيمة (β_s)	أبعاد وموقع دعامة الضغط
1	عنصر الضغط ذو العرض المنتظم (prismatic strut)
0.75	دعامة الضغط (bottle strut) مع تسليح كاف لمقاومة ضغوط الشد العرضية.
0.6	دعامة الضغط (bottle strut) بدون تسليح كاف لمقاومة إجهادات الشد العرضية.
0.4	دعامة الضغط الواقعة في العناصر المعرضة للشد.
0.6 λ	كل الحالات الأخرى.

▪ قيم (λ) تظهر في المواصفة (ACI) الفقرة (8.6.1) وتساوي واحد للخرسانة العادية.

(2) مقاومة الضغط الاسمية لدعامة الضغط (Strut):

(a) دعامة الضغط بدون تسليح:

$$F_{ns} = f_{ce}A_c \quad (3)$$

(b) دعامة الضغط مع وجود التسليح:

$$F_{ns} = f_{ce}A_c + A'_s f'_s \quad (4)$$

حيث إن: (A_c) مساحة المقطع العرضي في أحد طرفي دعامة الضغط.

(f_{ce}) اقل مقاومة ضغط فعالة للخرسانة في دعائم الضغط والمنطقة العقدية.

(A'_s) مساحة تسليح الضغط في دعامة الضغط. و (f'_s) إجهاد الفولاذ .

• تسليح مناطق دعامة الضغط:

يمكن حساب قيمة التسليح للتحكم في التشققات من المعادلة التالية:

$$\Sigma \left(\frac{A_{si}}{bs_i} \right) \sin \gamma_i \geq 0.003 \quad \text{for} \quad f'_c \leq 40 \text{MPa} \quad (5) \quad (5)$$

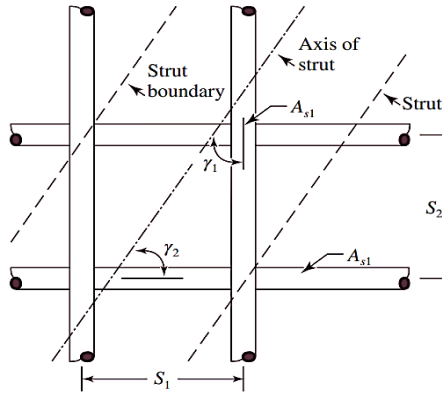
حيث أن (A_{si}) المساحة الإجمالية للتسليح في دعامة الضغط عند الطبقة (i) .

(s_i) تباعد التسليح في الطبقة المجاورة لسطح العنصر.

(b) عرض العنصر.

(γ_i) لزاوية بين محور دعامة الضغط والقضبان المتقاطعة مع الدعامة في نفس الطبقة

كما هو موضح بالشكل (5).



شكل (5) أسياخ التسليح خلال منطقة دعامة الضغط (14-ACI 318).

- يتم وضع التسليح إما في اتجاهين متعامدين ويشكلان الزوايا $(\gamma_1 \& \gamma_2)$ مع محور

دعامة الضغط، أو في اتجاه واحد، بحيث لا تقل الزاوية (γ_1) عن (40°) .

والتسليح يجب أن يحاط بالكانات.

● ثانياً: عناصر الربط (Ties):

هي عناصر الشد في النموذج وهي مكونة من مزيج من التسليح والخرسانة. بحيث تتكون من طبقة أو عدة طبقات من التسليح (الكانات والتسليح الطولي)، أو الفولاذ مسبق الإجهاد، أو كليهما، بالإضافة إلى جزء من الخرسانة المحيطة التي تكون متحدة المركز مع محور الروابط، بالرغم من أنه لا تعتبر الخرسانة المحيطة مقاومة لقوة الشد المحورية. ومع ذلك، فإنها تقلل من استطالة عنصر الربط، كما أنها تحدد المنطقة التي سيتم فيها تثبيت القوى الموجودة في عناصر الربط.

● فشل عناصر الربط:

يكون بسبب قلة مساحة أسياخ التسليح. وقلة طول التماسك، لأنه إذا لم يتم توفير الطول المناسب، فمن المحتمل حدوث فشل قصف عند حمل أقل من القدرة القصوى المتوقعة.

● تصميم عناصر الربط:

والتي تتضمن التسليح والخرسانة حولها. بحيث يتم اختيار مساحة التسليح وتثبيته بشكل صحيح مع ضمان أن يتناسب مع عرض عنصر الربط. وتكون المعادلة العامة لتصميم عناصر الربط كالتالي:

$$\boxed{F_{nt} \geq F_{ut}} \quad (6)$$

(F_{ut}) هي القوة في عناصر الربط والتي تكون ناتجة عن الأحمال المكبرة.

(F_{nt}) المقاومة الاسمية لعناصر الربط. وتكون كالتالي:

$$F_{nt} = A_{st}f_y + A_{ps}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (7)$$

حيث أن: (A_{st}) مساحة التسليح غير المجهد في منطقة الشد.

(A_{ps}) مساحة تسليح مسبق الإجهاد.

(f_{se}) لإجهاد الفعال في التسليح المسبق الإجهاد.

(Δf_p) زيادة في إجهاد في التسليح المسبق الاجهاد الناتج عن الأحمال المكبرة.

ويتم الغاء الشق الثاني من المعادلة عند عدم وجود تسليح مسبق الاجهاد.

- العرض الفعال لعناصر الربط (W_t): والذي يعتمد على توزيع التسليح، فإذا كان في طبقة واحدة فإنه يساوي قطر سيخ التسليح مضافا إليه ضعف (الغطاء الخرساني حتى سطح السيخ) ويكون الحد الأقصى له كالتالي:

$$w_{t,max} = F_{nt} / (f_{ce} b) \quad 8$$

ويمكن إيجاد مساحة التسليح في عنصر الربط من خلال المعادلة التالية:

$$A_{st} = \frac{F_{ut}}{\phi f_y} \quad (9)$$

ثالثا: العقد (Nodes):

هي نقاط تقاطع محاور دعائم الضغط وعناصر الربط والقوى المركزة، والتي تمثل مفاصل نموذج الجمالون. ويفترض في هذه الطريقة أن هذه المفاصل من نوع (Pinned Joints) أي أن العزوم فيها صفر. وللحفاظ على التوازن، يجب أن تؤثر ثلاث قوى على الأقل على كل عقدة من عقد النموذج. وتعتبر هذه العقد هي المناطق الأكثر إجهادا في العنصر، لأنه يجب أن تتحمل الاجهادات المتعددة الناتجة عن الدعائم والروابط المتلاقية فيها، بالرغم من صغر حجم الخرسانة.

المناطق العقدية: هي المناطق المحيطة بالعقد. والتي عادة ما تكون مثلثة الشكل. ووجه هذه المنطقة العقدية متعامد مع محور دعامة الضغط ويتناسب عرضه مع القوى الموجودة في دعامة الضغط. ويتم تحديد أبعاد المناطق العقدية باستخدام:

(1) الأبعاد الحجمية للعنصر ونموذج الجمالون (STM).

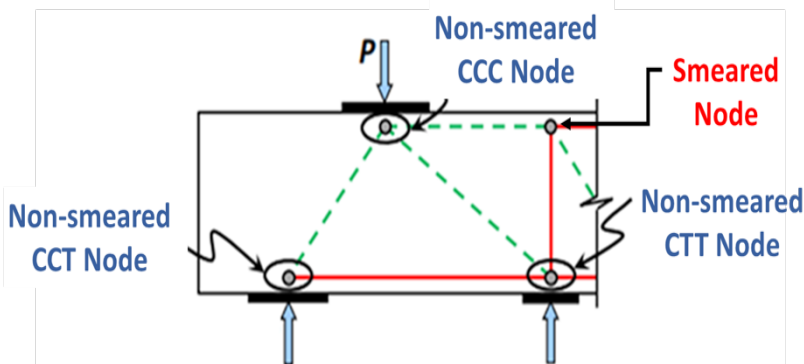
(2) حجم صفيحة التحميل.

(3) موقع وتوزيع التسليح. وأطوال التماسك.

تصنيف العقد حسب أهميتها:

- عقد غير معرفة الأبعاد (Smearred nodes) وهي عقد داخلية ترسم في النموذج ولكن لا تحتاج للتصميم.
 - عقد مفردة معرفة الأبعاد (Non-smearred nodes) وهي عقد مهمة ترسم في النموذج وتحتاج للتصميم وهي العقد التي تحد الركائز والأحمال.
 - هناك نوع آخر من العقد (Curved bar nodes) وتكون في الوصلات.. الزاوية بين الأعمدة والكمرات، أو بين الحوائط والبلاطات، وهذا النوع من العقد تم تفصيله في المواصفة الأمريكية 23.10-19-ACI 318
- تصنيف العقد اعتماداً على إشارة القوى المؤثرة عليها، كما تظهر في الشكل (6):

- عقدة (CCC) تقاوم ثلاث قوى ضغط، وهي اقوى أنواع العقد.
- عقدة (CCT) تقاوم قوتي ضغط وقوة شد. وتعتبر أضعف من النوع الأول.
- عقدة (CTT) تقاوم قوة ضغط واحدة وقوتي شد، وإذا كانت هناك أكثر من قوتي شد فتسمى بنفس الاسم.
- عقدة (TTT) تقاوم ثلاث قوى شد وتعتبر هذه العقدة أضعف أنواع العقد.

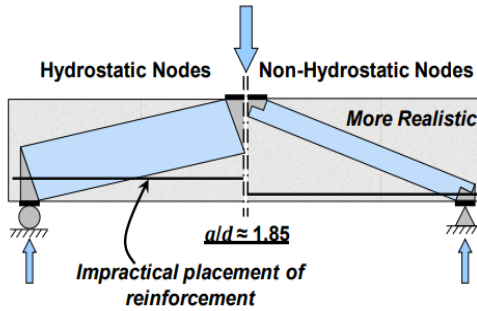


شكل (6) بعض الأنواع المختلفة للعقد.

ويمكن تصنيف مناطق العقد (Nodal Zone) إلى:

- مناطق عقد هيدروستاتيكية: حيث تكون العقدة متساوية الإجهادات على كل الأوجه، ولا يوجد بها إجهاد قص ويؤدي استخدامها إلى تسليح غير عملي كما هو موضح في الشكل (7).

- مناطق عقد غير هيدروستاتيكية: لا يكون الإجهاد متساوي على كل الأوجه، وهو ما يتوافق بشكل وثيق مع الاجهاد الفعلي في العنصر وينشأ بها إجهاد قص. وبالتالي تفضل العقد غير الهيدروستاتيكية في التصميم.



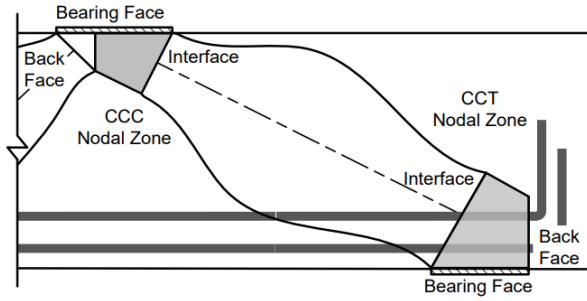
شكل (7) العقد الهيدروستاتيكية والعقد غير الهيدروستاتيكية (Chris Williams, 2012)

فشل العقد: تكون مناطق العقد هي الأعلى إجهادا في العنصر، والتي يجب أن تكون مقاومتها أعلى من القوى المؤثرة عليها وذلك لمنع الانهيار. لذا يجب التأكد من سلامة تصميم العقد عند الأوجه الثلاثة، والتي تظهر في الشكل (8) وهي كالتالي:

- وجه التحميل (Bearing Face) وهو وجه المنطقة العقدية التي يطبق فيها الحمل أو ردود الفعل. وطولها يعتمد على أبعاد صفيحة التحميل.

- واجهة العقدة (Interface) والتي تعتمد على الزاوية بين دعامة الضغط والعقدة.

- الوجه الخلفي (Back Face) وهو وجه المنطقة العقدية التي لا يطبق فيها الحمل ورددود الفعل، وطولها يعتمد على موضع التسليح الطولي.



شكل (8) أوجه المنطقة العقدية المختلفة (14-ACI 318).

● تصميم المناطق العقدية:

المواصفة الامريكية تعرف المقاومة في المنطقة العقدية كالتالي:

$$F_{nn} = f_{ce} A_{nz} \quad (10)$$

حيث أن: (A_{nz}) مساحة وجه العقدة التي تؤثر عليها دعامة الضغط أو عنصر الربط. وتكون عمودية على محورهم.

(f_{ce}) قوة الضغط الفعالة للخرسانة في المنطقة العقدية والتي تحسب كالتالي:

$$f_{ce} = 0.85 \beta_n f'_c \quad (11)$$

جدول (2) قيم (β_n) اعتمادا على نوع العقدة. (ACI Code Table 23.9.2)

قيمة (β_n)	نوع العقد
1	(العقد CCC)
0.8	(العقد CCT)
0.6	(العقد CTT أو TTT)

عرض دعامة الضغط: والذي يتحكم فيه عرض نطاق العقدة، صفيحة التحميل وعرض عنصر الربط والذي بدوره يعتمد على موقع وتوزيع التسليح، وأطوال التماسك، والشكل (9) يوضح عرض دعامة الضغط والذي يمكن حسابه من المعادلة التالية:

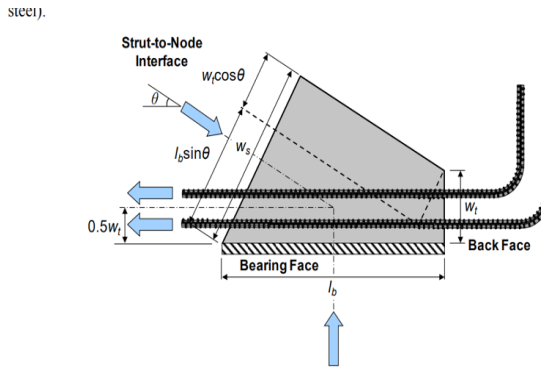
$$w_s = w_t \cos \theta + l_b \sin \theta \quad (12)$$

حيث أن:

(θ) الزاوية بين محور دعامة الضغط والمحور الافقي.

(l_b) طول وجه التحميل للعقدة.

(w_t) طول الوجه الخلفي للعقدة.



شكل (9) عرض أوجه المنطقة العقدية (Chris Williams, 2012).

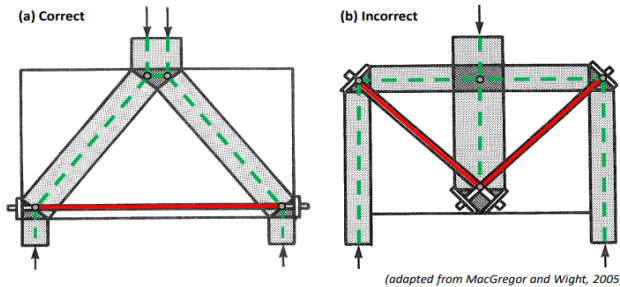
● إيجاد نموذج جمالون (STM) المناسب:

إن نموذج (STM) مهم جدا للحصول على تصميم اقتصادي وآمن للعنصر الخرساني. ويحتاج اختيار النموذج الصحيح بعض الخبرة من مهندسي التصميم لإيجاد النموذج الملائم من بين عدة خيارات ممكنة للحل. وهناك بعض الاشتراطات التي تساعد في إنشاء نموذج جيد منها ما يلي:

- يجب أن يكون نموذج الجمالون مثلثيا متزنا ومحددا استاتيكيًا داخليا وخارجيا.
- يجب أن يكون هناك مسار تحميل محدد بوضوح. بحيث يجب أن يتبع مسار الإجهادات المرنة بدقة. لأنه يؤثر على موضع التسليح وربما يؤدي إلى وجود تشققات خطيرة. لذا يجب أن يمثل النموذج خلال المنطقة (D) مسار تحميل

واقعي للقوى من الأحمال وصولاً إلى ردود الأفعال. بحيث تكون دعامة الضغط في مسار إجهاد الضغط وتكون بزاوية حوالي ($15^\circ \pm$) من مسار تدفق إجهاد الضغط. أما عناصر الربط التي تتكون من قضبان التسليح والتي يتم وضعها عادة بشكل متعامد في العضو، ينبغي أن تكون في الاتجاه العام لمسارات إجهادات الشد ولكن بقيود أقل على توافقها مع تلك المسارات. ويوضح الشكل (10) نموذجين لكمرة عميقة، الشكل (10-a) يوضح نموذج صحيح حيث إن مسار تدفق الأحمال منطقي وعدد عناصر الربط أقل ما يمكن (أما الشكل (10-b) فهو نموذج خاطئ لأنه لا يتبع مسار تدفق القوة الواقعي نحو الركائز، بل يفترض مسارا غير منطقي وعدد عناصر الربط فيه أكبر من النموذج (a).

- في حالة الكمرة البسيطة المحملة بأحمال مركزة متماثلة أو غير متماثلة، يمكن أن ينشأ نموذج ذو شكل مشابه لمخطط العزوم في الكمرة أو شكل الكابل المعلق. باستثناء المخططات التي تشابه القطع المكافئ.
- إذا كان بالإمكان عمل اختبار معلمي على العنصر فقد يساعد نمط التشقق في اختيار أفضل نموذج للعنصر. فمنطقة التشقق (الشد) في عينة الاختبار، تعتبر موقعا غير محتمل لدعامة الضغط.



شكل (10) نموذج الجمالون الصحيح والخاطئ (MacGregor, 2012).

- لا يمكن للدعائم أن تتقاطع أو تتداخل، لأن عرض دعامة الضغط قد تم حسابه على افتراض أنها وصلت إلى أقصى إجهاد. ويمكن أن تتقاطع أو تتداخل فقط

- عند العقد، ومع عناصر الربط والتي بدورها يمكن أن تتداخل مع بعضها البعض أو مع دعائم الضغط.
- في بعض الأحيان يتم الحصول على تمثيل أفضل لتدفق الإجهاد الحقيقي عن طريق إضافة نموذجين بسيطين محتملين، كل منهما في حالة توازن مع جزء من الحمل المطبق، بشرط ألا تتداخل أو تتقاطع الدعائم.
- النموذج الذي يكون به أقل وأقصر روابط (Ties)، سيكون الحل الذي يمثل أفضل نموذج لسلوك العنصر الخرساني.
- يتطلب النموذج السيئ تشوها كبيرا في الخرسانة قبل أن يتمكن التسليح من الخضوع، والذي ينتهك القاعدة التي مفادها بأن الخرسانة لديها قدرة محدودة على تحمل التشوه اللدن.
- مع التصميم الجيد يمكن للمهندسين ومكاتب التصميم الحصول على نماذج قياسية لبعض المنشآت الشائعة، ومن ثم يمكن تطوير تفاصيل التسليح القياسية، ومراجعتها في حالة تغيير أي من البيانات.
- الزوايا، بين الدعائم والأربطة عند العقدة، يجب أن تكون كبيرة (في حدود 45 درجة) ولا تقل أبدا عن 25 درجة لأن حجم دعائم الضغط حساس للزاوية بين الدعامة والتسليح. كما توضحه النقاط التالية:
- الزاوية أقل من 35 درجة مئوية: تقلل من مقاومة دعامة الضغط وتزيد من طولها، والتسليح يكون أكثر عمقا في القطاع ولن يكون التصميم اقتصاديا، وسيصبح وضع طول التماسك أكثر صعوبة.
- الزاوية تتراوح بين (45° - 35°) يعطي التصميم الأفضل والأكثر اقتصادية.
- الزاوية أكبر من 50 درجة. التسليح سيكون سطوحيا والتصميم يتطلب عددا أكبر من الكانات.

● مراحل عملية التصميم:

يمكن تلخيص عملية تصميم نماذج الدعائم والربط في مراحل رئيسية وهي:

- تحديد وعزل المناطق (D) & (B) في العنصر الإنشائي.
- تعريف حالات التحميل، وتحديد الأحمال المسلطة والتي يجب أن تكون مركزة في نقاط محددة.
- تقدير حجم العنصر. باستعمال القواعد المنصوص عليها في المواصفات بتحديد أقل سمك للعنصر والذي سيكون هو نفسه سمك عناصر الجمالون، وذلك اعتمادا على المعطيات وعلى خبرة المهندس في التصميم.
- إيجاد ردود الأفعال عند الركائز باستخدام الطرق التقليدية في الحسابات.
- إنشاء نموذج جمالون (STM) والذي يجب أن يكون في حالة توازن مع الأحمال المطبقة ورددود الأفعال، وذلك بتحديد مواقع العقد، عند مواضع الأحمال والركائز، وعند تغيير الأبعاد في العنصر، وعند زوايا الفتحات. ومن ثم تعيين مسار تدفق القوى عبر المنطقة (D) وتحديد موضع دعائم الضغط وعناصر الربط وفقا لذلك المسار.
- حساب القوى في عناصر الجمالون، وتحقيق الاتزان الرأسي والأفقي للقوى عند كل عقدة. باستخدام الحسابات اليدوية أو جداول التحليل المساعدة أو برامج التحليل الهيكلي بناء على مدى تعقيد نموذج الجمالون المحدد.
- تصميم أعضاء الجمالون من حيث الأبعاد لمقاومة قوى التصميم. وتحديد العرض الفعال لدعائم الضغط والمناطق العقدية، مع الأخذ في الاعتبار القوى من الخطوات السابقة، ومقاومة الضغط للخرسانة، وإجهاد الفولاذ، ونموذج الجمالون المختار.
- تحديد التسليح الذي سيقاوم القوى الناشئة في عناصر الربط.
- التأكد من مقاومة العقد: بتحديد أبعاد العقد الحرجة والتأكد من مقاومة كل وجه من أوجه العقدة للقوى المسلطة عليها.

- التحقق من الحد الأدنى من متطلبات التسليح وفقا لـ (318-ACI-14)، الفقرات (9.9.3.1) و(9.9.3.2)، ويجب فحص الأعضاء الهيكلية للتأكد من متطلبات قابلية الخدمة، وفحص الترخيم، والتحقق من التحكم في التشققات، ومن ثم تحسين تصميم الجمالون لتقليل الانفعالات، إذا لزم الأمر.
- تصميم أطوال التماسك، يجب التأكد من تثبيت التسليح بشكل جيد في المنطقة العقدية.

■ الخلاصة:

يتطلب الاستخدام الناجح لطريقة (STM) فهما للسلوك الأساسي للعناصر، والحكم الهندسي الجيد على الوضع الإنشائي، ومعرفة مسار تدفق الأحمال باتجاه الركائز، إذا فهي ليست طريقة سهلة واتباعا لمعادلات واضحة كحالات التوزيع الخطي للانفعالات. ولكنها طريقة تحتاج إلى دقة ومهارة في الاستخدام.

يتم تمثيل مسارات الإجهاد في مناطق الانفعالات غير الخطية الناشئة في العنصر الخرساني، بنموذج جمالون مناسب، حيث تمثل الأجزاء المعرضة للضغط (Struts) بينما عناصر الشد تمثل (Ties). ويتم حساب القوى داخل عناصر الجمالون وتحويلها إلى أبعاد تلائم التصميم المطلوب من حيث مساحة التسليح في مناطق الشد والضغط، مع مراعاة أهمية أطوال التماسك والتحقق من التحكم في التشققات. وذلك للوصول إلى تصميم آمن واقتصادي.

■ References:

1. Aaron B. Colorito, (2017), "Strut-and-Tie Modeling (STM) for Concrete Structures, Design Examples", Federal Highway Administration, National high way institute, NHI Course No. 130126, Publication No. FHWA-NHI-17071-.
2. AASHTO LRFD, "Bridge Design Specifications", (2017), Eighth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA.
3. ACI Committee 318 (2014): "Building Code Requirements for Structural Concrete". ACI Code 31814-. American Concrete Institute, Detroit, MI.
4. ACI Committee 318 (2019): Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI

Code 31819-. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

5. Adolfo B. Matamoros and K. H. Wong, (2003), "Design of Simply Supported Deep Beams Using Strut-and-Tie Models", ACI Structural Journal, November-Dec., pp (704712-).
6. Chris Williams, Dean Deschenes & Oguzhan Bayrak,(2012), "Strut-and-Tie Model Design Examples for Bridges": Final Report, Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin.
7. Chung, C.Fu.,(2001), "The Strut-and-tie model of concrete structure", The BEST Center, University of Maryland, Presented to The Maryland State Highway Administration.
8. Vicksman, A. S., Williams, C. S., & Howarth, M. A., (2020), "Implementing the strut-and-tie method for the design of bridge components" Joint Transportation Research Program Publication No. FHWA/IN/JTRP. West Lafayette, IN: Purdue University.
9. Emad Ibrahim,(2005), "Analysis & Design of deep reinforcement concrete beams using strut and tie method", M.Sc thesis, faculty of engineering & architecture, university of Khartoum.
10. Jack C. McCormac, Russell H. Brown, (2014), "Design of Reinforced Concrete",9th, John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 070305774- , Appendix C.
11. James K. Wight, (2016), "Reinforced Concrete; Mechanics and Design", 7th, Global Edition, Pearson Education, Inc., Edinburgh Gate, Essex CM20 2JE, England, Chapter 17.
12. F.K.Kong,(2003), "Reinforced Concrete: Deep Beams", Blackie and Son Ltd, Van Nostrand Reinhold, New York 10003.
13. M. Nadim Hassoun, (2015), "Structural Concrete, Theory and Design", 6th, John Wiley & Sons, River Street, Hoboken, NJ 07030,2015, Chapter 8.
14. MacGregor, J. G, and Wight, J. K., (2012), "Reinforced Concrete: Mechanics and Design", 6th, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ 07030, pp879908-.
15. Rui Jose, (2014), "Deep Beams Reinforcement", National and Eurocode 2, Design Provisions, Faculty of Engineering, University of Politehnica Timisoara, Hunedoara, ISSN 1584 – 2665.
16. Tijs Vancoillie,(2018), "Improvements on Design and Analysis of Deep Beams Based on the Strut-and-Tie Method", M.Sc thesis, Faculty of engineering technology, KU Leuven University.