Journal of Al-Azhar University Engineering Sector

Vol. 19, No. 70, January 2024, 354 - 368

THE EFFECT OF STRUCTURAL SYSTEMS EFFICIENCY ON FORM AND FUNCTION IN ARCHITECTURE

Mahmoud Abd El-Rahiem Sayed*, Mohamed Zakaria El-Dars, Mohamed Hassan Khalil

Architectural Department, Faculty of Engineering, Al-Azhar University, Nasr City, 11884, Cairo, Egypt,

***Correspondence:** Mrahiem87@gmail.com

Citation:

M.A. Sayed, M. Z. El-Dars and M.H. Khalil," The Effect of structural systems efficiency on form and function in architecture", Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, vol. 19, pp. 354-368, 2024.

Received: 7 September 2023

Revised: 11 November 2023

Accepted: 30 November 2023

DOI: 10.21608/auej.2023.234931.1418

Copyright © 2024 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International Public License (CC BY-SA 4.0)

ABSTRACT

The current research addresses the issue of the effect of structural efficiency of structural systems on form and function by identifying and understanding the relationship between structure, form, and function. Clarifying the concept of structural efficiency and the basic considerations for achieving it in structural systems to ensure the harmonization of structure, form and function in architecture is the research challenge at hand. Therefore, the research classifies structural systems according to their efficiency into (highly efficient structural systems - mid-efficient structural systems - low efficient structural systems). In order to explore the characteristics of each type, the research studies some buildings, each of which illustrates an example of the level of efficiency and how to achieve it through (efficiency of structural form and efficiency of materials usage) and the effect of each of them on the form and function of the building. Finally, the research discusses its most important conclusions.

KEYWORDS: Structural efficiency, Form, Function.

تأثير كفاءة الأنظمة الإنشائية على الشكل والوظيفة في العمارة

محمود عبد الرحيم سيد*، محمد زكريا الدرس، محمد حسن خليل

قسم الهندسة المعمارية، كلية الهندسة، جامعة الأزهر، مدينة نصر، 11884، القاهرة، مصر.

***البريد الاليكتروني للباحث الرئيسي :** Mrahiem87@gmail.com

الملخص

تناول البحث دراسة تأثير الكفاءة الهيكلية للأنظمة الإنشائية على الشكل والوظيفة من خلال تحديد وفهم العلاقة بين الهيكل والشكل والوظيفة. إن توضيح مفهوم الكفاءة الهيكلية والإعتبارات الأساسية لتحقيقها في الأنظمة الإنشائية لضمان تناغم الهيكل والشكل والوظيفة في الهندسة المعمارية هو التحدي البحثي المطروح. ولذلك قام البحث بتصنيف الأنظمة الإنشائية حسب كفاءتها إلى (أنظمة إنشائية عالية الكفاءة – أنظمة إنشائية متوسطة الكفاءة – أنظمة إنشائية منخفضة الكفاءة). وللتعرف على خصائص كل نوع قام البحث بدراسة بعض المباني، حيث يوضح كل منها مثالاً على مستوى الكفاءة وكيفية تحقيقها من خلال (كفاءة الشكل الإنشائي وكفاءة استخدام المواد) وتأثير كل منها على شكل ووظيفة المبنى. وأخيراً يناقش البحث أهم النتائج التي توصل إليها.

الكلمات المفتاحية: الكفاءة الهيكلية، الشكل، الوظيفة.

1. مقدمة

الهندسة المعمارية هي نظام متعدد الأبعاد يجمع بين الشكل والوظيفة والهيكل لإنشاء مساحات جذابة بصريًا وهادفة وسليمة من الناحية الهيكلية. كما يعد التكامل بين هذه العناصر أمرًا بالغ الأهمية في إنتاج تصميمات معمارية ليست فقط مبهجة من الناحية الجمالية ولكنها أيضًا

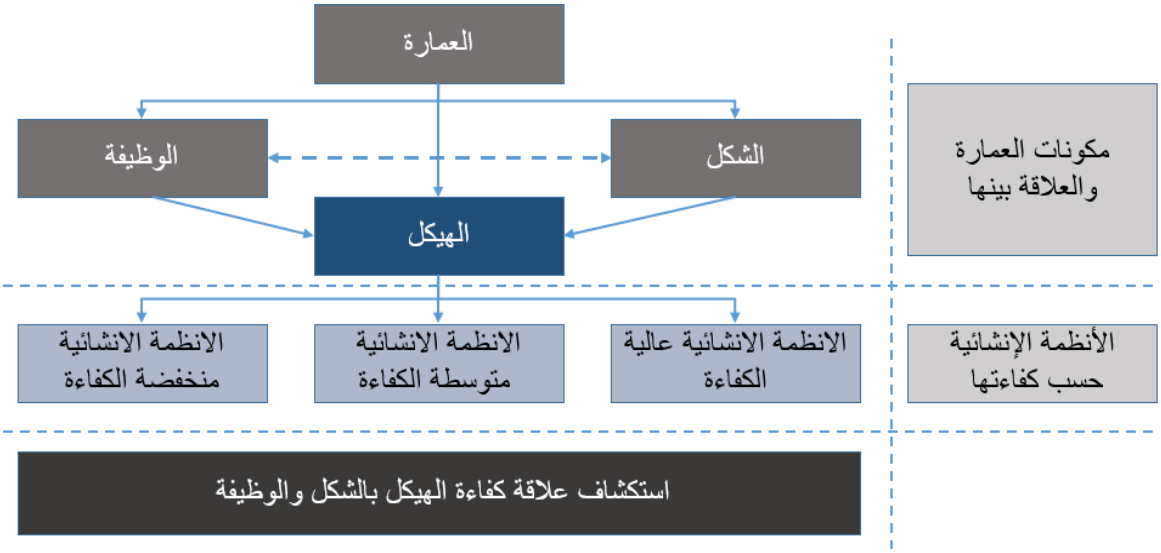
تتسم بالكفاءة والإستجابة لإحتياجات المستخدمين. ويتم ذلك من خلال تحقيق علاقة متناغمة بين هذه العناصر، حيث يكملون ويعززون بعضهم البعض. ولذلك يجب أن يعزز الشكل الوظيفة، ويجب أن يدعم الهيكل كلاً من الشكل والوظيفة. فعلى سبيل المثال، عند تصميم متحف قد يقوم المهندس المعماري بإنشاء شكل ملفت للنظر وديناميكي لإثارة الفضول وإشراك الزوار. ومع ذلك، يجب تخطيط صالات العرض ومساحات العرض داخل المتحف بكفاءة لتسهيل عرض الأعمال الفنية، وتوفير الإضاءة المناسبة، وخلق تجربة مشاهدة ممتعة. وعلى نحو اخريجب أن يضمن هيكل المبنى ثبات واستقرار الشكل المعماري مع إستيعاب المساحات المطلوبة [1].

ومن الضرورى الأخذ في الإعتبار كفاءة الأنظمة الإنشائية في الهندسة المعمارية والتى لها تأثير كبير على كل من شكل ووظيفة المباني من حيث تطوير وتعزيز التصاميم الجريئة والمذهلة بصريًا إلى تحسين إستخدام المساحة وتعزيز الإستدامة وضمان القدرة على التكيف، فعندما يتعلق الأمر **بشكل المبنى** فإن تفاوت كفاءة النظام الهيكلي يمكن أن يكون لها تأثير عميق حيث تمكن الأنظمة الهيكلية الفعالة المهندسين المعماريين من تجاوز حدود التصميم التقليدي واستكشاف الحلول المبتكرة التي تؤدي إلى إنشاء هياكل مميزة ومذهلة بصريًا من خلال تحسين وضع وتكوين العناصر الحاملة، كما يمكن للمهندسين المعماريين إنشاء أشكال فريدة تجذب الإنتباه وتصبح رموزًا للهوية الثقافية أو البراعة المعمارية [2].

وعلي الجانب الاخر، يمكن أن تؤثر كفاءة الأنظمة الانشائية بشكل كبير على وظيفة المبنى من خلال توزيع الأحمال بكفاءة وتوفير الإستقرار، حيث يسمح النظام الهيكلي المصمم جيدًا بإنشاء مساحات مفتوحة ومرنة يمكنها التكيف مع الاستخدامات المختلفة حيث تعد القدرة على إعادة تشكيل المساحات لإستيعاب الإحتياجات المتغيرة أمرًا ضروريًا. علاوة على ذلك، ترتبط الكفاءة الهيكلية بإستخدام المكونة للهيكل والذي يزيد من تعزيز الإستدامة الشاملة للمبنى [3].

هدف البحث: إستكشاف مفهوم الكفاءة الهيكلية للأنظمة الإنشائية وتأثيرها على الشكل والوظيفة فى العمارة.

منهجية البحث: اتبع البحث لتحقيق أهدافه المنهج الإستقرائي من خلال عرض مفهوم الشكل المعماري والشكل الهيكلي والعلاقة بين الوظيفة والشكل والهيكل ، ثم التعرف على مفهوم الكفاءة الهيكلية للأنظمة الإنشائية وتصنيفها. ثم يأتي المنهج التحليلي **الوصفى** والذي يكون من خلال تحليل نماذج من مشروعات معمارية عالمية من خلال دراسة الأنظمة الهيكلية المستخدمة فيها ودراسة تأثير كفاءة الهيكل على الشكل والوظيفة فى كل منها. انظر شكل (1)



شكل (1) استكشاف العلاقة بين الهيكل والشكل والوظيفة من خلال الكفاءة

2. وحدة الهيكل مع الشكل والوظيفة

أولاً: الشكل الهيكلي والشكل المعماري

تعتبر العلاقة بين الشكل المعماري والهيكل الإنشائي جانبا أساسيا فى تصميم وتشييد المباني فهي تعني التفاعل بين الشكل الذي يعبر عن القيم الجمالية والمتطلبات الوظيفية لمستخدمي المباني وبين الهيكل الذي يدعم الشكل المعماري ويوزع الأحمال علي عناصره لتحقيق سلامة وإستقرار المبنى. فالعلاقة بين الشكل والهيكل علاقة ديناميكية بين الجوانب المعمارية والمتطلبات الإنشائية لتحقيق توازن متناغم وإنشاء مباني جذابة وملفتة نظريا وسليمة من النواحي الإنشائية.

الشكل المعماري: يتأثر الشكل المعماري بالجوانب العملية والتنظيم المكاني والتحكم في تدفق المستخدمين، كما يأخذ في الإعتبار الشعور بالمساحة والرمزية والعلاقة بالمكان. أيضا يمكن للأشكال المعمارية أن تميل نحو الأشكال النحتية، لكنها لابد أن تكون وظيفية وموجهة نحو المستخدم كما يجب أن تلبي إحتياجات العميل والشاغلين مع تحقيق الأهداف الفنية والإبداعية للمهندس المعماري. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تكون الأشكال المعمارية آمنة لأنها سيتم إستخدامها [4].

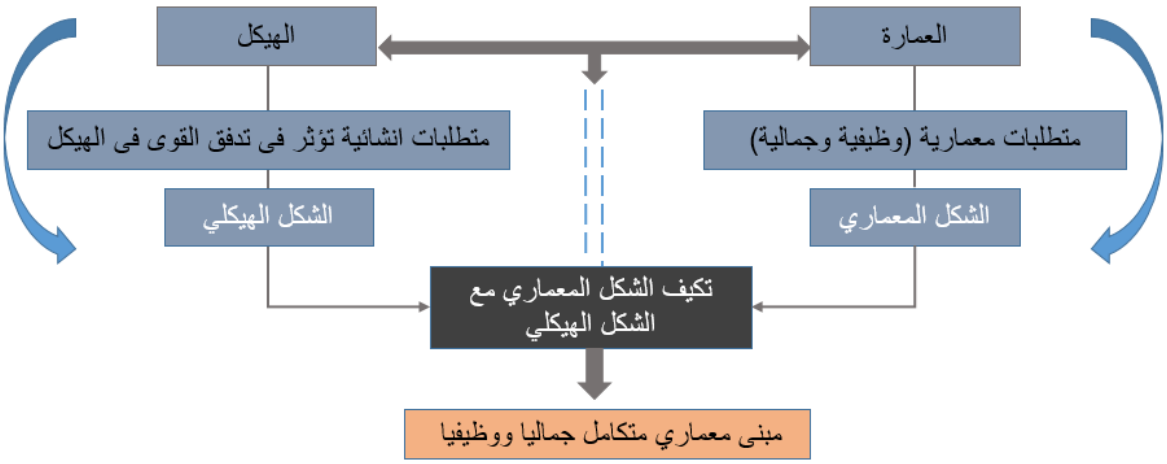
الشكل الهيكلي: يُعد الشكل الهيكلي جانبًا حاسمًا في تشييد المباني ويهدف في المقام الأول إلى دعم الجاذبية والأحمال الجانبية وتوفير غلاف المبنى. بالإضافة إلى أنه يمكن للهياكل المصممة بعناية أن تعرض قوة يمكن التحكم فيها وتؤثر بصريًا على المبنى، فمثلا تشير الأعمدة الكبيرة المكشوفة إلى القوة والصلابة، بينما تخلق الأعمدة الطويلة النحيلة تأثيرًا أنيقًا. ويهدف الشكل الهيكلي إلى الكفاءة والاقتصاد والأناقة، فهو ليس عشوائيا أوعرضة لتغير الذوق أو الموضة [4].

أ- هندسة الشكل فى التصميم المعماري والتصميم الإنشائي

هندسة الشكل هي النقطة المشتركة التي تخلق لغة مشتركة بين المهندسين المعماريين والمهندسين الإنشائيين، فإذا كان المصممون قادرين على إنشاء تصميم مناسب ، فسيتم إنشاء العمل الفني ليكون محميًا من الأبعاد المعمارية والإنشائية. انظرشكل (2)

في **التصميم المعماري** يواجه المهندسون المعماريون الكثير من خيارات التصميم والتى تشمل العوامل الجغرافية والمناخية والاجتماعية، فضلا عن المتطلبات الوظيفية والتى كلها هى مكون أساسي للشكل المعماري [5].

وفي **التصميم الإنشائي** يركز التصميم الإنشائي على التحليل الإنشائي بناءً على الأحمال المطبقة بما في ذلك الأحمال الميتة والحية، حيث يتم نقل الأحمال الخارجية بواسطة العناصر الهيكلية مما يؤدي إلى تدفق القوى عبر النظام الهيكلي وهندسة الشكل العام للهيكل [6]. وبشكل أكثر دقة فإن المعرفة الحسية للقوى وأنواع الضغوط و والتغييرات الشكلية في كل نظام ناقل للأحمال تكون بسبب القوى والأحمال عليه [7]. لذلك الهدف الأساسي من هندسة شكل الهيكل هو ايجاد الهيكل الأمثل للسلوك المتكامل للقوى والأحمال ، والحفاظ على علاقات الاستقرار، والتفاعل مع خصائص الهندسة المعمارية [8].



شكل (2) العلاقة بين الشكل المعمارى والشكل الهيكلي

ب- أنواع العلاقة بين الهيكل الإنشائي والشكل المعمارى

هناك ثلاث أنواع أساسية لإرتباط الشكل المعماري مع الهيكل الانشائي ويضفي كل من هذه الأساليب طابعه الفريد على تصميم المبنى. ولا تشكل هذه الإستراتيجيات المظهر المرئي للمبنى فحسب، بل تؤثر أيضًا على تجربة المستخدم وإدراكه بالإضافة إلى أن الإختيار بين كشف الهيكل أو إخفائه أو الإحتفاء به يؤثر بشكل كبير على مدى التفاعل مع المساحات المعمارية [9]. هذا وتنقسم هذه الأنواع الثلاثة كالتالي: انظر جدول (1)

- كشف النظام الهيكلي
- إخفاء الهيكل
- الإحتفاء بالهيكل

ثانيا: الشكل الهيكلي والوظيفة

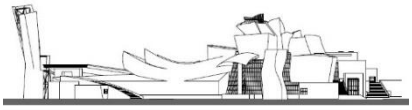
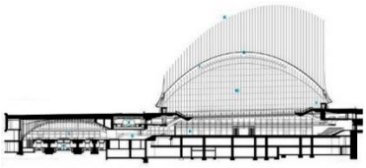
بالنظر إلى الوظيفة الهيكلية والشكل المعماري، يؤكد كرير (Krier) على الحاجة إلى التكامل بينهما حيث " يرتبط البناء ارتباطًا وثيقًا بالوظيفة "،وكلما كانت هذه الوحدة أكثر إنسجاما، كلما اقترب الوصول إلى المنتج النهائي المعماري [10]. وهناك علاقة وثيقة بين شكل ونمط النظام الهيكلي والترتيب المكاني للمساحات الداخلية أي (ترتيب المساحات وتقسيمها) انظر جدول (2)، وهذه العلاقة يمكن أن تكون علي نوعين:

- التوافق بين شكل الهيكل والترتيب المكاني.

- التباين بين شكل الهيكل والترتيب المكاني.

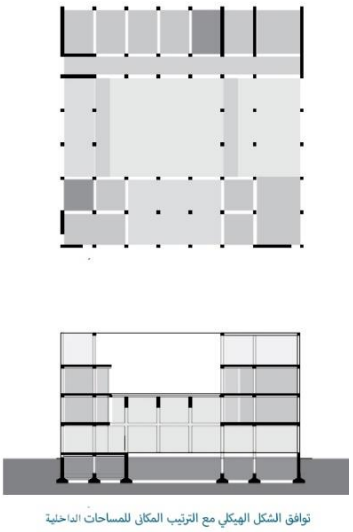
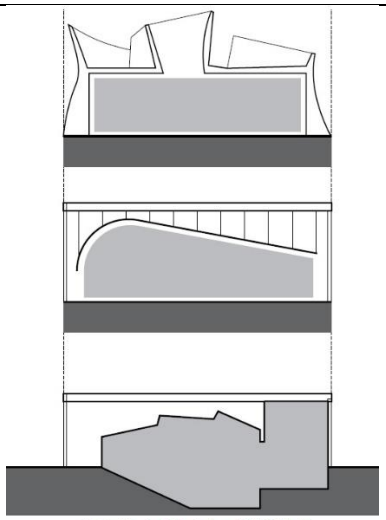
جدول (1) أنواع العلاقة بين الشكل الهيكلي والشكل المعمارى

المصدر: الباحث بتصرف من (Ching, F., et al., 2014)

كشف الهيكل	إخفاء الهيكل	الاحتفاء بالهيكل
كشف النظام الهيكلي يعني جعل العناصر الهيكلية للمبنى مرئية ودمجها كأجزاء لا يتجزأ من التصميم، ويتبنى هذا النهج فكرة أن هيكل المبنى ليس مجرد نظام دعم خفي، بل هو عنصر معبر وممتع من الناحية الجمالية في حد ذاته.	يركز إخفاء الهيكل على إخفاء العناصر الهيكلية أو تمويهها لخلق مظهر اوضح وأكثر بساطة، وغالبًا ما تتضمن هذه الإستراتيجية إستخدام مواد مثل تكسيات المباني، التي تغطي أو تغلف العناصر الهيكلي ، مما يسمح للعناصر المعمارية الأخرى أن تأخذ مركز الصدارة.	في هذه الحالة يتم إستغلال النظام الهيكل كميزة تصميمة فيتم إظهاره للإحتفاء بشكله وأهميته المادية والتي تظهر فى قدرتها علي حل القوى وتعتير الهياكل القشرية والمشدودة أوضح مثالا على هذه الفئة.
		

جدول(2) العلاقة بين الهيكل والترتيب المكاني للمساحات الداخلية

المصدر: الباحث بتصرف من (Ching, F., et al., 2014)

التوافق بين شكل الهيكل والترتيب المكاني	التباين بين شكل الهيكل والترتيب المكاني
عندما يكون الشكل الهيكلي والتركيب المكاني مرتبطين يمكن أن يملي نمط الدعامات وأنظمة الإمتداد الهيكلية ترتيب المساحات داخل المبنى وفقًا لإحتياجات ورغبات المستخدمين، وأحيانا قد لا تسمح الأنظمة الهيكلية التي تحدد أحجام مساحة معينة أو أنماط محددة مرونة في استخدام المساحات أو التكيف في المستقبل.	في الحالات التي لا يكون فيها الشكل الهيكلي والتركيب المكاني متناغمين قد يكون الهيكل إما كبيرًا بما يكفي ليشمل مساحات متعددة أو قد يهيمن التكوين المكاني على هيكل مخفي. يمكن أن يكون هذا التمييز مفيدًا للمرونة أو النمو أو الهوية أو التعبير عن الإختلافات بين الاحتياجات الداخلية والخارجية.
 توافق الشكل الهيكلي مع الترتيب المكاني للمساحات الداخلية	 تباين الشكل الهيكلي مع الترتيب المكاني للمساحات الداخلية

3. مفهوم الكفاءة الهيكلية للأنظمة الإنشائية

تعتبر الكفاءة الهيكلية أحد أهم الإعتبارات الحاسمة فى تصميم الهيكل الإنشائي والتي تنعكس إنعكاسا مباشرا على شكل الهيكل الإنشائي وبالتالي تؤثر على شكل المبنى. ويمكن تقييم كفاءة الهيكل الإنشائي من خلال محورين، أحدهما: هو أداء الهيكل الإنشائي، والثاني: هو تحقيق المتطلبات المعمارية مثل (تقسم المساحات، وتوفير بيئة مريحة، مظهر أنيق للمبنى،..إلخ). إضافة إلى ما سبق إن كفاءة الهيكل ترتبط إرتباط وثيق بالمواد المستخدمة فى الهيكل حيث يعتقد أن تكلفة المواد والتي تمثل من 60-70% من اجمالي تكلفة البناء وفى بعض البلدان النامية من 25-30% في بعض البلدان المتقدمة ترتبط ارتباطًا مباشرًا بالبنية الهيكلية [11].

ولفهم أكثر لمفهوم الكفاءة الهيكلية يستعرض البحث بعض المحاولات التي قام بها الباحثين لتعريف ماهي الكفاءة الهيكلية مثل:

- تعريف (Hanaor, A., 1998 and 2002; Macdonald, A.J., 2001) الكفاءة الهيكلية هى" **نسبة قدرة التحمل إلى وزن الهيكل".**
- تعريف (Addis, B., 2001) هى "إن **الهياكل التي تحقق الأداء الهيكلي المطلوب مع إستهلاك أقل للمواد تكون أكثر كفاءة"** [11].

من التعريفات السابقة يمكن إستنتاج أن الكفاءة الهيكلية هى "قدرة الهياكل علي تحمل الأحمال بطريقة لا تؤثر علي سلامة وإستقرار فقط و إنما تنعكس أيضا على كفاءة الشكل الهيكلى وكفاءة إستخدام المواد ". شكل (3)

شكل (3) اعتبارات الكفاءة الهيكلية للأنظمة الإنشائية

4. إعتبارات تحقيق الكفاءة الهيكلية فى الأنظمة الإنشائية

يتم تحقيق كفاءة الانظمة الانشائية من خلال إعتبارين أساسيين هما:

أولا: كفاءة الشكل الهيكلى:

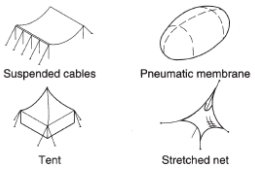
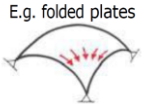
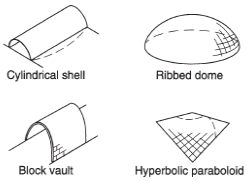
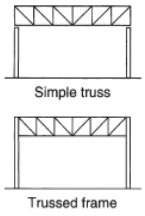
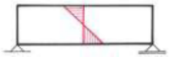
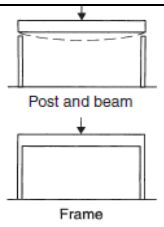
إن الشكل هو أحد الإعتبارات الأساسية للكفاءة حيث يتحدد أداء العنصر الهيكلي من خلال شكله ويتم ذلك من خلال ضبط هندسة شكل الهيكل مما يؤدي إلى زيادة قوته وصلابته دون الحاجة إلى إضافة مواد وبالتالي يكون أكثر كفاءة. كما يمكن إجراء تحسين على الأشكال الهيكلية أحيانا فى المقطع العرضي (مثل قطاعات (I-beam) والألواح ذات الاسطح المموجة) واحيانا في المقطع الطولي (مثل الجسور المعلقة بكابلات الشد) واحيانا اخرى يتم تحسين شكل الهيكل ككل (مثل الهياكل القشرية و الهياكل الاغشية المشدودة). ولكن يجب أن يكون الهدف من هذه التحسينات هوإجراء التعديلات التي تأخذ في الإعتبار القوة والصلابة والثبات والملاءمة والشكل في نفس الوقت [12].

يلعب الشكل الهيكلي دورًا حاسمًا في تحديد مقاومة الإجهاد وإنتقاله خلال عناصره ومكوناته، ويختلف شكل الهيكل حسب ذلك، ومن ثم يمكن تصنيف الأشكال الهيكلية الى أربعه أنواع حسب مقاومة كل منها للقوى والأحمال عليها. انظر جدول (3).

- **الأشكال (Forms):** وفيها يتم مقاومة القوى والأحمال من خلال الشكل حيث يمكن مطابقة شكل الهيكل بشكل مثالي مع الشكل الثابت للمقاومة حيث تعمل الأنظمة المقاومة للشكل على توافق المواد مع القوى مما يوفر المقاومة عن طريق الشد أو الضغط. ومن الأمثلة عليها (الكابلات، والأقواس، والخيام/الأغشية، والهياكل الهوائية).
- **الناقلات او المتجهات (Vectors)**: وفيها يتم مقاومة القوى من خلال نقل ضغوط القوى من خلال عناصر قصيرة ومستقيمة (شبكات أو دعامات) والتي تكون صغيرة مقارنة بالطول الإجمالي للهيكل وتتميز بانها خفيفة الوزن وفعالة فى استخدامها حيث تم استخدامها في أطول الهياكل في العالم وفي المباني النفعية المتواضعة والفعالة من حيث التكلفة على حد سواء، يشهد على فائدتها.ومن الامثلة عليها الجمالونات.
- **الاسطح (Surfaces):** وفيها يتم مقاومة القوى والأحمال الخارجية من خلال خلال أسطحها الصلبة، ونظرًا لكفاءتها يمكنها إحتواء مساحات كبيرة بإستخدام الحد الأدنى من المواد والقليل من الدعامات الهيكلية على عكس الأنظمة الأخرى التي تتطلب عناصر إضافية لتحديد المساحات الداخلية مثل الهياكل القشرية.
- **القطاعات او المقاطع العرضية (Sections)**: وفيها يتم مقاومة القوى الداخلية (الضغط، والشد، والانحناء، والقص) من خلال خصائص مقطعها العرضية لمكوناتها الصلبة وطولها وإرتفاعها ولهذا السبب يطلق عليهم إسم مقاومة القسم الفردية مثل الكمرات والأعمدة [12] و [13].

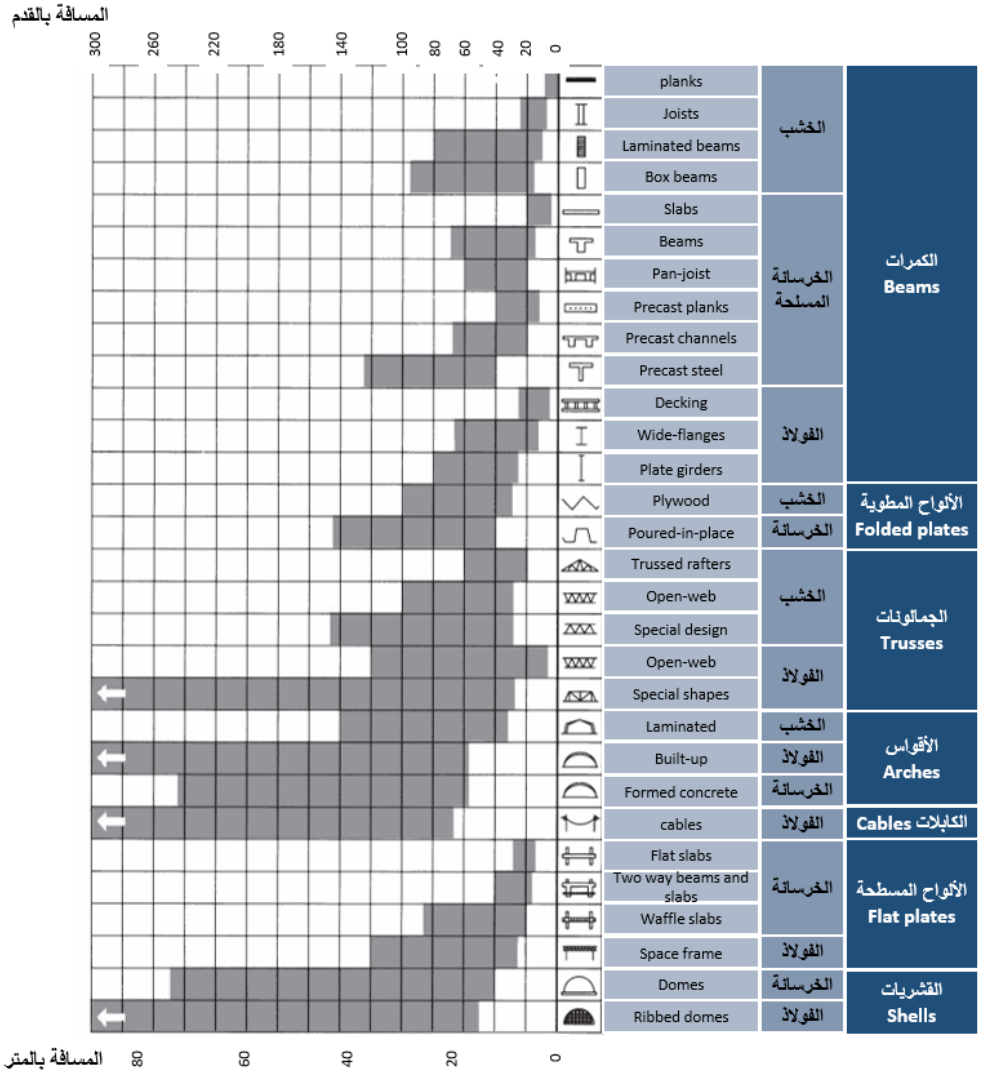
جدول(3) أنواع الأشكال الهيكلية حسب مقاومتها للقوى والأحمال المطبقة عليها

المصدر: الباحث

نوع الشكل الهيكلى	الاشكال الفعالة	الاسطح الفعالة	الناقلات الفعالة	القطاعات الفعالة
الاشكال الهيكلية الناتجة من مقاومة القوى	**Form-active** E.g. cables and membranes 	**Surface-active** E.g. folded plates  	**Vector-active** E.g. trusses 	**Section-active** E.g. beams and plates  
أمثلة				
اسم المبنى	**الكابلات المعلقة** Suspended cables	**هياكل قشرية** Shells	**الجمالونات** Simple truss	**الحوائط الحاملة** Load-bearing walls
	the millennium dome,1999	The Centre of New Industries and Technologies,1956	Sainsbury Centre for Visual Arts 1977	Museum of Roman Art, Merida, 1985
أمثلة				
اسم المبنى	**هياكل الشد** Tensile structures	**هياكل قشرية** Shells	**الهياكل المطوية** Folded structure	**الكمرات والاعمدة** Beam and columns
	Al Bayt Stadium,2022	The cantilevering hyper of the Alster, 1967	Riverside Museum,2011	Museum of Anthropology, 1947

ثانيا: كفاءة استخدام المواد

إن إستخدام المواد فى الهياكل هو إعتبار آخر أساسي فى تحقيق الكفاءة - فإن المزيد من المواد لا يضمن السلامة الهيكلية على العكس تماما فهذا قد يستنزف الموادر والوقت والتكلفة ويزيد من الوزن الهيكلي- وغالبا ما تقاس الكفاءة عن طريق كفاءة إستخدام المواد من خلال تقييم وزن الهيكل والاقتصاد النسبي لبناء الهيكل ومدى صعوبة أو سهولة تشغيل المواد. وبصفة عامة إذا كان الهيكل ينقل الأحمال بشكل فعال فستكون الحاجة إلى إستخدام مواد اقل لتوفير المقاومة فى الهيكل، حيث انه من العوامل المهمة لتحقيق الكفاءة للهياكل أن تكون الهياكل اقوى صلابة واخف وزنا وبالتالي أكثر كفاءة[12]. علاوة علي ماسبق، يختلف أداء الهيكل حسب المواد المستخدمة فيه والتي تنعكس على شكل الهيكل فبعض المواد يمكن إستخدامها فى أنواع محددة من الهياكل دون الآخرحسب خصائص ونوع كل مادة[14]. كما يوثر إستخدام المواد فى الهياكل علي الوظيفة من خلال تحقيق مرونة وتكييف فى الإستخدام من خلال توفير نطاقات الإمتداد الكبيرة (Long-span ranges) كما هو موضح بشكل (4) . حيث يستعرض الجدول التنوع بين نطاقات الإمتداد البحور(Spans) لمختلف الأنظمة الإنشائية تبعا لإختلاف المادة المستخدمة فى الهيكل، وهذه بدوره يوفر تنوع وإختلاف وظيفة المساحات الداخلية سواء من ناحية شكل الفراغات أو مساحتها.



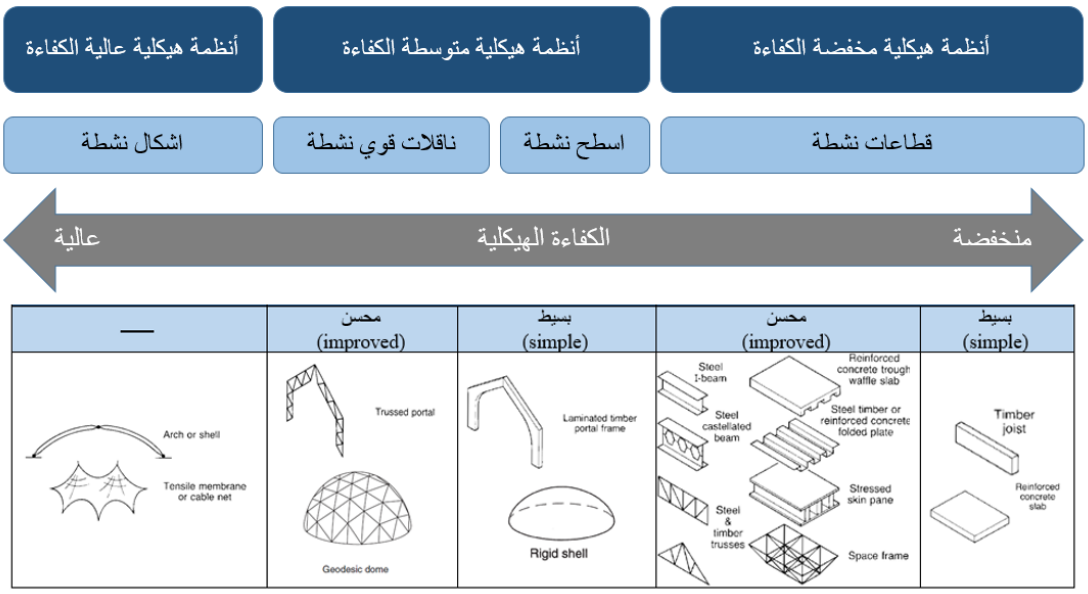
شكل (4) تصنيف الإنظمة الهيكلية حسب كفاءتها

المصدر: الباحث بتصرف من (Schodek, D., Bechthold, M., 2014)

5. تصنيف الانظمة الانشائية تبعا لكفاءتها

إن تحقيق مستوى مناسب من كفاءة الهيكل الإنشائي هو الهدف من التصميم الإنشائي ولكن ليس بالضرورة تحقيق أقصى مستوى ممكن من الكفاءة[15]. شكل (1) يوضح العلاقة بين كفاءة الهيكل الانشائي وأنواع الأنظمة الإنشائية ويقسمها إلى ثلاثة أنواع حسب الكفاءة كالتالي:

- أنظمة هيكلية عالية الكفاءة
- أنظمة هيكلية متوسطة الكفاءة
- أنظمة هيكلية منخفضة نشطة



شكل (5) تصنيف الأنظمة الهيكلية حسب كفاءتها
المصدر: الباحث بتصرف من (Macdonald, A.J., 2001م)

أولا: أنظمة هيكلية عالية الكفاءة

هذا النوع يتم التركيز فيه على الإستفادة من قوة وصلابة العناصر الهيكلية من خلال الاشكال الهيكلية النشطة والتي تحقق أقصى كفاءة من خلال مقاومة الشكل للأحمال والقوى، وتتميز المواد المستخدمة فى هذه النوع بخفة وزنها وكفاءة تشغيلها فى مقاومة الأحمال والقوى ، وهذا النوع يوفر هياكل انشائية تتكامل غالبا مع التكوين المعماري في سياق متناغم وملفت للنظر. ومن أوضح الأمثلة على هذا النوع هياكل الكابلات والهياكل المشدودة والهياكل الهوائية التي تتميز بخفة وزنها وخصائصها الجمالية والوظيفية[16]. انظر شكل (6) و (7)

شكل (6) نظام هيكلي عالى الكفاءة متمثل فى الهيكل ذو الكابلات المشدودة (Millennium, 1999) [18]

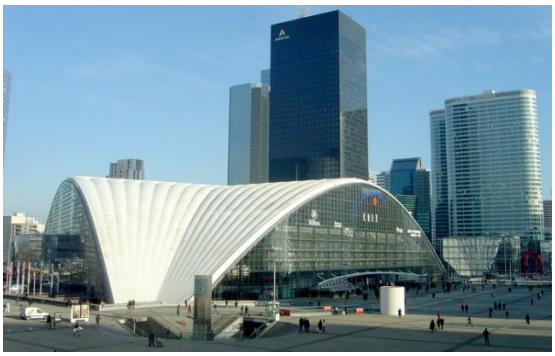
شكل (7) نظام هيكلي عالى الكفاءة متمثل فى هيكل مشدود (مركز داتونج للفنون، 2012م) [19]

ثانيا: أنظمة هيكلية متوسطة الكفاءة

هي أنظمة تعتمد فى نقل الاحمال والقوى الداخلية (القوى المحورية – عزوم الانحناء – وقوى القص) عن طريقيتين:

- إما بإستخدام الناقلات المتجهية (vectors) ويتم نقل الأحمال والقوى فيها من خلال عناصر قصيرة صلبة مقارنة بالنسبة للهيكل العام مثل الجمالونات بانواعها. كما فى شكل (8)
- أو بإستخدام (Surface) ويتم نقل القوى عن طريق مقاومة الأسطح الصلبة - علي عكس الأشكال النشطة - للقوى والأحمال مثل الهياكل القشرية وغيرها [17]. كما فى شكل (9)

وتسمي هذه الأنظمة متوسطة الكفاءة لانها تشبه الأنظمة عالية فى نقل القوى والأحمال ولكنها تختلف فى كفاءة استخدام المواد حيث أن وزن الهيكل فى الأنظمة عالية الكفاءة اخف من الهياكل متوسطة الكفاءة.



شكل (8) نظام هيكلي متوسط الكفاءة متمثل في جمالونات ،(متحف ريفرسايد،2011م) [20]

شكل (9) نظام هيكلي متوسط الكفاءة متمثل فى شكل قشري، (مركز الصناعات والتكنولوجيات الجديدة،1956م) [21]

ثالثا: أنظمة هيكلية منخفضة الكفاءة

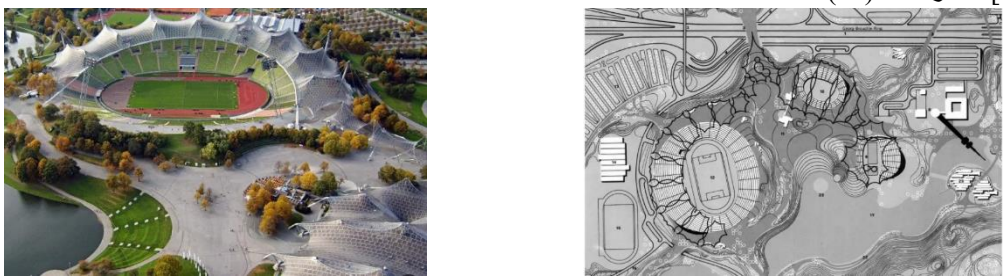
فى هذا النوع من الأنظمة يتم إستخدام الأشكال غير النشطة (section) فى نقل ومقاومة القوى الداخلية – والتى لا تظهر فى شكلها الخارجي ولكنها تنعكس على قوة وخصائص المواد – والتيكلما زادت القوى والأحما عليها فإن ذلك يزيد من مساحة مقطعها العرضي، وأحيانا يتم يتم التغلب علي زيادة المقطع العرضى بإجراء تحسينات على المقطع كما هو الحال مع البلاطات المصمتة والبلاطات المفرغة (solid slab and waffle slab). ومن الأمثلة عليها نظام الحوائط الحاملة وأنظمة الكمرة والعمود[17]. انظر شكل (10)

شكل (10) نظام هيكلي منخفض الكفاءة متمثل فى نظام الكمرة والعمود (متحف الأنثروبولوجيا،1947م) [22]

6. دراسة تاثير الكفاءة الهيكلية للانظمة الانشائية علي شكل ووظيفة المبنى

1.6. الإستاد الأوليمبي بمدينة ميونخ الألمانية

تم تصميم الإستاد الأوليمبي (Olympiastadion München) بمدينة ميونخ الألمانية عام 1972م من قبل المهندس المعماري (فري اوتو Frei Otto) والذي كان شغوفا بالطبيعة ومتفاني في إستخدام المواد الأساسية لبناء هياكل فعالة ومستدامة وهي الخصائص المميزة لمنهجية التصميم الثورية لـ فري أوتو. أستخدمت إستراتيجية أوتو المحاكاة الحيوية وهي فلسفة تصميم تأخذ إشارات من الهياكل العضوية والوظائف والأنظمة. وتميز المشروع بالتغطية القابلة للشد من خلال الكابلات المعدنية وألواح الأكريليك، والتي تمتد فوق الاستاد الأوليمبي مثل خيمة ضخمة. بالإضافة الى تصميم المظلة الشفافة الخاصة الرياضيين والمتفرجين دون حجب خطوط الرؤية أو إلقاء ظلال غير متساوية [23]. انظر شكل (11)



شكل (11) الإستاد الأوليمبي بمدينة ميونخ الالمانية،1972م [24]

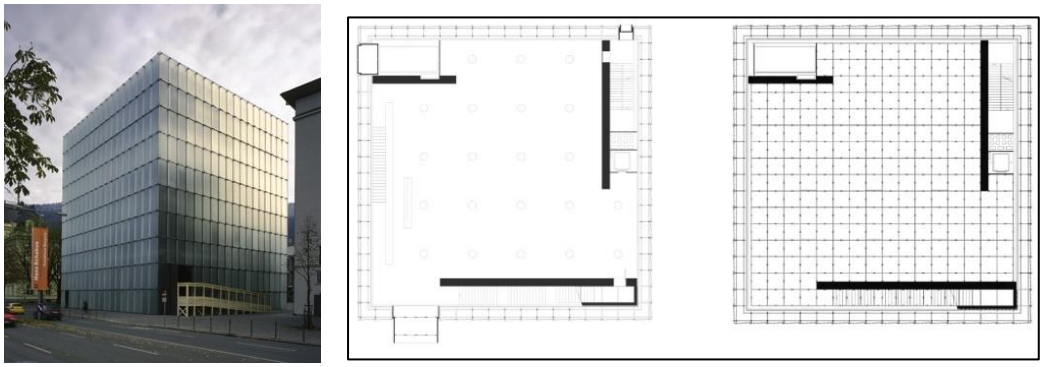
2.6. متحف داتونج للفنون فى الصين

تم تصميم المشروع فى مدينة داتونج (Datong Art Museum) فى الصين عام 2021 م من قبل (فوستر+ شركاءه Foster+Partners) .وتم تصميم الشكل المعماري للمبنى على شكل سلسلة من الأهرامات المترابطة الخارجة من تحت الأرض حيث تقع مساحات المعرض تحت الأرض وتحيط بها ساحات ذات مناظر طبيعية وتبلغ مساحة المشروع 32ألف مترمربع ،ويتكون من قاعات العرض الخاصة بالمتحف بالاضافة إلى مجموعة من الفراغات المخصصة للتعليم والتعلم بما في ذلك معرض للأطفال ومكتبة إعلامية وأرشيف وفراغات تخزين. تم زيادة إرتفاع أهرامات السقف الأربعة المترابطة مما على تدفق الضوء الطبيعي إلى الداخل من خلال الفتحات الموجودة في قمة كل هرم. [25] انظر شكل (12)

شكل (12) متحف داتونج للفنون 2021م [26]

3.6. متحف كونستهاوس للفنون فى النمسا

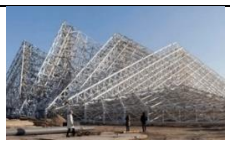
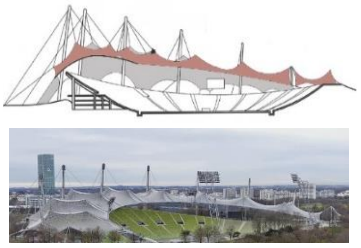
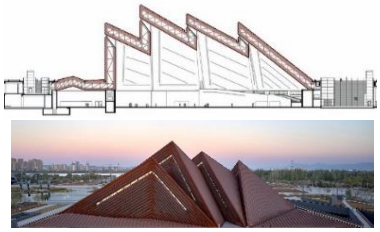
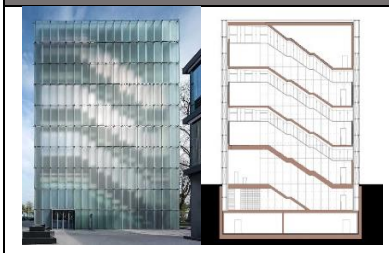
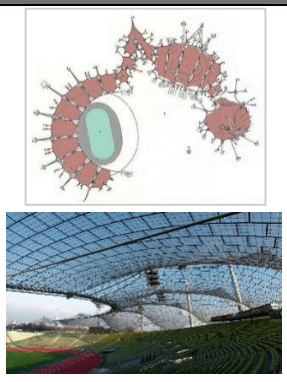
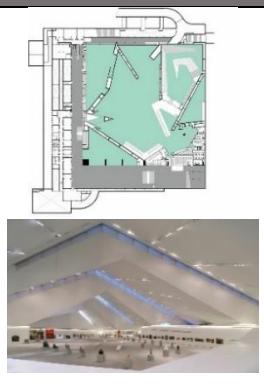
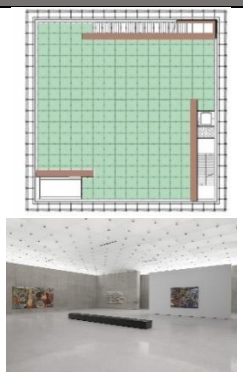
تم تصميم متحف كونستهاوس بريغينز (kunsthaus Bregenz) الذي كان قيد الإنشاء فى النمسا من عام 1994م إلى عام 1997م وأفتتح في عام 1997م من قبل المهندس المعماري السويسري بيتر زومثور (Peter Zumthor). وتم تصميم المتحف كمبنى مضاء بضوء النهار يتخلل فيه الضوء من الألواح الزجاجية ثم يتم توجيهه عبر النوافذ الشريطية إلى الطوابق الثلاثة العليا ويضيء مساحات الداخل بكثافة متفاوتة إعتمادًا على الوقت من اليوم وحسب فصول السنة. تتولى العناصر الهيكلية الداخلية وظائف الحاملة بدلاً من الجدران الخارجية وهي عبارة عن ثلاثة عناصر عمودية من الخرسانة يبلغ سمك كل منها حوالي 72 سم وتمتد عبر جميع الطوابق مما حقق مساحات عرض واسعة وخالية من الأعمدة، كما حقق هذا التصميم إستخدام مواد مختلفة مثل الخرسانة والقطاعات المعدنية وكل هذا مغلف بواجهات زجاجية ذاتية الدعم ومستقلة من الناحية الهيكلية عن المبنى الفعلي[27]. انظر شكل (13). كما أن هيكل المبنى بسيط (غير نشط) فهو ثلاثة عبارة عن ثلاثة حوائط خرسانية فقط تدعم المتحف وجميع بلاطات الطوابق مما حقق كفاءة هيلكية مناسبة للمشروع.



شكل (13) متحف كونستهاوس للفنون، 1997م [28]

وفى الجدول التالي (4) سوف يتم دراسة كل من الأمثلة السابقة من خلال كفاءة الشكل الهيكلى فيها وكفاءة إستخدام المواد فى الهيكل للوقوف على مستوى الكفاءة الهيكلية للنظام الإنشائي لكل مثال منها.

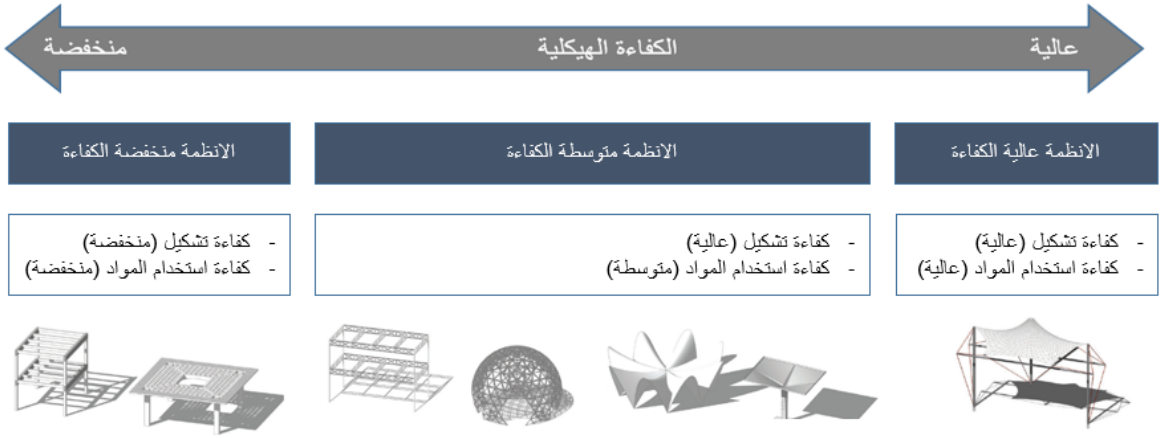
جدول (4) دراسة الكفاءة الهيكلية للأنظمة الإنشائية وتأثيرها على الشكل والوظيفة

اسم المبنى	الإستاد الأوليمبي بمدينة ميونخ	متحف داتونج للفنون	متحف كونستهاوس للفنون
الكفاءة الهيكلية	عالى الكفاءة	متوسط الكفاءة	منخفض الكفاءة
النظام الانشائي	Tensile membrane structure	Trusses	Flat slabs and shear walls
المادة المستخدمة فى الهيكل	اعمدة من الفولاذ - الواح الاكريليك- كابلات معدنية	الفولاذ المكون للجمالونات المائلة 	خرسانة مسلحة
	استخدمت مواد اكثر مرونة وأقل وزنا (الاكريلك) والتي ساعدت على جعل الهيكل اكثر رشاقة	استخدام الفولاذ جعل من الهيكل اكثر صلابة لتحمل الاحمال المطبقة عليه سواء وزن الهيكل نفسه او وزن الكسوات الخارجية	استخدمت اقل مرونة واكبروزنا والذي اتضح فى زيادة القطاعات العرضية لبلاطات الاسقف والحوائط االخرسانية
الكفاءة الهيكلية والشكل			
توافق الهيكل مع الشكل			
	تم دمج الهيكل الإنشائي مع التكوين المعمارى والكشف عنه فى التكوين المعماري فى شكل خيم مشدودة بكابلات مثبية بأعمدة ضخمة مما حقق تناغم سلس بين النظام الهيكلي والشكل	تكامل التصميم مباشرة مع الإمتداد الهيكلي الكبير للمبني من خلال تصميم تغطية المشروع علي شكل اربعة أهرامات مترابطة ومتداخلة مما ساهم فى إثراء الشكل المعماري	اخفاء الهيكل بالكامل بالواجهات الزجاجية الشفافة دون مساهمه للهيكل فى التشكيل الخارجي للمبنى
الكفاءة الهيكلية والوظيفة			
توافق الهيكل مع الوظيفة			
	أتاح النظام ذات نطاق الامتداد الكبيرة سمح بتغطية مساحة كبيرة من المدرجات بعناصر هيكلية خفيفة الوزن مما سمح بمساحات مرنة ومفتوحة مناسبة لإستخدام المشروع	إستخدام الأسطح النشطة المتمثلة فى جمالونات مائلة متقاطعة مما وفر مساحات واسعة ومرنة وظيفيا وخالية من الأعمدة تناسب تدرج وتنوع المساحات من قاعات العرض المتحفية إلى مساحات أصغر فأصغر	أتاح النظام الهيكلي مرونة في إنشاء مساحات داخلية متنوعة بواسطة الإستخدام الإنشائي تنوع وترتيب للمساحات وتدرجها من مساحات مفتوحة وواسعة إلى مساحات أصغر

7. النتائج

من خلال مناقشة البحث الوحدة بين الهيكل والشكل والوظيفة من خلال تسليط الضوء على الكفاءة الهيكلية للأنظمة الإنشائية وتأثيرها الشكل والوظيفة واستكشاف خصائص كل مستوى من مستويات الكفاءة (شكل 14)، استخلص البحث مايلي:

- يؤثر الهيكل بقوة على الشكل والوظيفة فى الأنظمة الإنشائية عالية الكفاءة والتي تتحقق من خلال توافق الشكل الهيكلى مع الشكل المعمارى عن طريق الأداء الهيكلى الأمثل لتدفق القوى فى عناصر الهيكل بالإضافة إلى كفاءة إستخدام المواد المكونة للهيكل والتى تتميز بكونها خفيفة الوزن وأكثر مرونة مما يقلل من الوزن الكلي للهيكل. كما تحقق هذه الأنظمة كفاءة وظيفية من حيث توفير مساحات كبيرة مفتوحة بدون عوائق إنشائية تعيق الترتيب المكاني للمساحات يوفرها كلا من نوع المواد المستخدمة فى الهيكل ووالتي بدورها تنعكس على نطاقات الامتداد الكبيرة (Long span range) والتى تناسب المشاريع الكبيرة مثل الملاعب وقاعات المعارض وغيرها من المشاريع واسعة النطاق.
- يحقق الهيكل كفاءة فى الأنظمة الإنشائية متوسطة الكفاءة أحيانا من خلال التوافق بين الهيكل والشكل كما فى الهياكل القشرية من خلال مقاومة القوى للاسطح (Surfaces)، وأحيانا اخرى يكون من خلال مقاومة القوى للعناصر المتجهة (Vectors) – وفى الحالتين تكون العناصر الهيكلية أكثر صلابة عن تلك التى فى الأنظمة عالية الكفاءة - والتى تزيد من وزن الهيكل لزيادة وزن المكونة له مما يجعلها أقل كفاءة من الأنظمة عالية الكفاءة. وبالطبع تحقق هذه الأنظمة الكفاءة الوظيفية نظرا لطول نطاق إمتدادها مما يوفر مساحات كبيرة ومفتوحة تلائم المباني متعددة الإستخدامات مثل المتاحف والمباني متعددة الإستخدامات.
- أخيراً، تنخفض الكفاءة الانظمة الهيكلية حيث تعتمد فى نقل القوى والأحمال على مقطعها العرضي والتى لا تعكس شكل القوى التى تتدفق فيها بالعكس فهذا يؤثر على مساحة مقطعها العرضي، مما قد يزيد من المواد المستخدمة فى الهيكل وبالتالى يزيد وزن الهيكل الكلي.أيضا تحقق هذه الأنظمة كفاءة وظيفية من خلال مشاركة عناصر الهيكل فى تقسيم المساحات وفصل عناصر الإتصال الأفقى (الممرات) والرأسي (السلالم والمصاعد) وهذا يختلف بإختلاف نوع العناصر الهيكلية المستخدمة ومدي نطاق إمتداها والمواد المستخدمة، وهذه الأنظمة تناسب مختلف المشاريع مثل المشروعات السكنية -لاتتطلب نطاقات إمتداد كبيرة- وتناسب ايضا المشروعات الكبيرة كالمباني الادارية والتجارية ، وهذا يتم وفق حسب متطلبات المشروع.



شكل (14) مستويات الكفاءة الهيكلية فى الأنظمة الإنشائية

المراجع

[1] Oleiwi, M., and etal, (2021). Effect of Structural Design Efficiency in Achieving Stability Efficiency of the Architectural Design, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
[2] Alihodzic, R., and etal, (2014). A relation between function and architectural form in the observers perception, Trans Tech Publications, Switzerland.
[3] Mehdinezhad, M., (2013). Functional Design in Structural Engineering and its Influence on Architectural Design. Journal of Basic and Applied Scientific Research.
[4] Saliklis, E., (2007). Evaluating Structural Form: Is it sculpture, architecture or structure?. California Polytechnic State University, American Society for Engineering Education.
[5] Sharbaf, A., Zarkesh, A., (2018).Relationship between Space Frame Structure and Architecture base on Subjective Viewpoint. Tarbiat Modares University.

[6] Mainstone, R. (2013). Developments in structural form: Routledge.
[7] Zarkesh, A. (2010). The role and position of the mystical knowledge of the structure in contemporary western architecture. The Art of the Month, 149, 84-95.
[8] Mardomi, K., etal. (2015). Structural and architectural co-ordination in order to optimally locate the supports by genetic algorithm; (Case study: Free-form covers, designed based on Iranian node geometry). Nagsh Jahan, 5(2), 65-75.
[9] Ching, F., etal, (2014). Building Structures illustrated (patterns, systems and design), 2th edition. John Wiley & Sons.
[10] Papasterevski, D., Arangjelovski, T., (2020). Integration of architectural and structural aspects through the design process: individual residential building. Places and technologies.
[11] Yu, X., (2011 .) Improving the Efficiency of Structures Using Mechanics Concepts, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering.
[12] Whitehead, R., (2020).Structures by Design Thinking, Making, Breaking, Routledge.
[13] Veltkamp, M., (2007). Free Form Structural Design, Delft University Press.
[14] Schodek, D., Bechthold, M., (2014). Structures (7th edition). Pearson Education, Inc.
[15] Macdonald, A.J., (2001).Structure and Architecture, Department of Architecture, University of Edinburgh.
[16] Kozikowska, A., (2018). Efficient Structural Forms as a result of Architect and Engineer collaboration, Bialystok University of Technology, Faculty of Architecture.
[17] Silver, P., McLean, W., Evans, P., (2013). Structural Engineering for Architects: A Handbook, Laurence King Publishing Ltd.

Websites

[18] https://www.webbaviation.co.uk/aerial/picture.php?/30763
[19] https://www.archdaily.com/286718/dadong-art-center-cie-mayu-architects
[20] https://mcateerphoto.com/story-behind/riverside-museum/
[21] https://www.showsbee.com/company-2506-CNIT-Paris-la-D%C3%A9fense.html
[22] https://www.tourbytransit.com/vancouver/things-to-do/museumofanthropology
[23] Wikipedia. (2023, May. 17) Olympiastadion. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Olympiastadion_(Munich).
[24] https://architectuul.com/architecture/olympiapark
[25] Datong art museum. (2022, Jan. 07). [Online].Available: https://worldarchitecture.org/.
[26] https://www.archdaily.com/974628/datong-art-museum-foster-plus-partners
[27] Wikipedia. (2022,Aug.13). Kunsthaus Bregenz [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Kunsthaus_Bregenz.
[28] Peter Zumthor (2023). Kunsthaus bregenz [Online].Available:https://www.kunsthaus-bregenz.at/en/architecture