

## التخطيط والبناء بالمواد الطبيعية: البناء بالتربة المدكوكة

خالد بن سكايت السكايت

أستاذ، قسم التخطيط العمراني، كلية العمارة والتخطيط، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة

العربية السعودية.

معماري ومخطط

kalskait@ksu.edu.sa

قدم للنشر في ١٣/٨/١٤٤١ هـ؛ وقبل للنشر في ٢٢/١/١٤٤٢ هـ.

ملخص البحث. البناء بالتربة المدكوكة Rammed Earth من التقنيات المناسبة في الأماكن الصحراوية؛ لما تتميز به حوائطها من سماكة تساهم في جعل البيئة الداخلية للفراغ العمراني مريحة للإنسان. تم بناء مبنى بمساحة حوالي ٩٠ متراً مربعاً في منطقة بنبان شمال مدينة الرياض. لم يتم استخدام الأسمنت كمادة مثبتة للحوائط. تم بناء الحوائط بطريقة طبيعية وتم دكها يدوياً وتم التثبيت باستخدام نسب قليلة من الجبس والجير. تراوحت قوة الضغط للحائط حول الـ ١ ميغا باسكال. تم توصيل أنبوب لمبنى التربة المدكوكة بطول ٤٠ م وعمق ٦,٦ م تحت الأرض Earth Tube وقطر ٥٢,٠ م لتبريد المبنى باستخدام برودة التربة على ذلك العمق. كانت درجة حرارة الهواء الخارجة من الأنبوب تقل بحوالي عشر درجات عن الهواء الخارجي الداخل للأنبوب من مسافة ٤٠ م.

الكلمات المفتاحية: التربة المدكوكة، التربة المضغوطة، قوة ضغط الحائط الترابي، الأنابيب الأرضية للتبريد، المباني الصحراوية، الكتلة الحرارية، العزل الحراري.

## ١. التمهييد والمقدمات البحثية للدراسة

تعتبر المباني من المكونات الرئيسية في مركبات التخطيط العمراني، ومن ثم فإن نوعية المباني وطريقة إنشائها تنعكس على البيئة العمرانية المحيطة وتشكلها. هذا البحث سيتطرق لاستخدام المواد الطبيعية (التربة المدكوكة) في المباني؛ بوصفها أحد الخيارات الجديرة بالاهتمام للتعيش مع البيئة المحيطة.

والمواد الطبيعية من أفضل المواد البنائية التي تنتج من البيئة المحلية وتعود لها بعد انقضاء العمر الافتراضي للمبنى دون الإضرار بالمنطقة المحيطة. وتعتبر أنواع التربة المختلفة من أفضل أنواع البناء بالمواد الطبيعية. فهي مواد يمكن من خلالها إنتاج حوائط تتنفس طبيعياً وتساهم في توازن الرطوبة داخل المبنى. وهذه المواد متوفرة بكثرة في بيئتنا المحلية وقادرة على تحمل الظروف المناخية. وإذا تم البناء بها بشكل احترافي فإنها يمكن أن تكون أيضاً مناسبة للبيئة الصحراوية. وعلى الرغم من كون الحوائط الترابية ليست عازلاً جيداً للحرارة إلا أنها تتميز بكتلة تخزينية عالية Thermal Mass وقادرة على تبطئ انتقال الحرارة من خلالها. لكن على الرغم من كل تلك الميزات فإن استخدام المواد الطبيعية في الجزيرة العربية يكاد يندثر ويقتصر فقط على المباني التراثية في الملكيات الخاصة من مزارع وبيوت. أما البناء بتقنية التربة المدكوكة المثبتة طبيعياً فلا يوجد تجارب موثقة في بلادنا حسب علم الباحث.

ومن ضمن أهداف هذا البحث دراسة إمكانية البناء بالمواد الطبيعية خاصة التربة الطبيعية، وكيفية تطبيقها في المناخ المحلي للمدن الصحراوية والتي تمثل البيئة الصحراوية السائدة في بلادنا، وهل من المناسب بناء أحياء متكاملة أو مدن صغيرة بهذه المواد إذا توفرت الظروف المناسبة اجتماعياً واقتصادياً.

وسيوضح البحث الخطوات التالية:

١. الأماكن المناسبة تخطيطياً للبناء بالمواد الطبيعية.
٢. كيفية اختيار مادة البناء الطبيعية (على سبيل المثال: التربة المحلية).
٣. كيفية معالجتها لتكون قابلة للبناء.
٤. كيفية تجهيز مواد البناء المساعدة في تلك العملية.
٥. كيفية البناء وإنشاء الجدران.

## ٢. الأماكن المناسبة للبناء بالتربة الطبيعية

يمكن البناء بالمواد الطبيعية في المدن والأرياف على حد سواء، لكن من المهم إدراك أن جمال هذه المواد وخصائصها يحققان تكاملاً أكثر في المواقع الأكثر محافظة على طبيعتها الأصلية. ومن أفضل المواد وأكثرها ملاءمة للبناء الطبيعي هي التربة. وإذا تم استخدام التربة كمادة للبناء في منطقة طبيعية فإنها تتماشى وتتناسق بشكل مميز مع الطبيعة التي حولها. فعلى سبيل المثال: يمكن

بناء المساكن والنزل بأنواعها في الريف وبين التلال والجبال، وإذا تم استخدام التربة المحلية نفسها في البناء فإن المباني ستظهر وكأنها جزء مما حولها من جبال وتلال وصحاري. كما أن تكلفة استهلاك الطاقة في بنائها ستكون أقل من تلك التي تستخدم المواد التقليدية.

وتختلف المواقع بحسب طبيعتها وتركيباتها الجيولوجية، فالمناطق المعرضة للزلازل يمكن البناء فيها بالتربة الطبيعية لكنها تتطلب معالجات مختلفة عن غيرها. وبعض الدول لديها كود بناء خاص بالتربة الطبيعية يشمل المعالجة الخاصة بالمناطق المعرضة للهزات الأرضية.

والمباني الترابية حساسة للمياه وتجمعاتها ويفضل دوماً حمايتها خاصة حول الأجزاء السفلى من الحوائط... ويفضل دوماً حمايتها بقبعة (سقف أو رواق يغطي الجدران) وحذاء قاعدة من مادة مقاومة للمياه مرتفعة عن مستوى الأرض) من الأمطار والسيول. لكن إذا عولجت جيداً فإن الحوائط الترابية تتحمل المياه والأمطار بشكل جيد، وليس هناك ما يدعو للقلق منها. وهناك أمثلة عديدة على مستوى العالم توضح كيف أن تلك المباني عاشت عدة قرون وبعضها ما يزال قائماً.

وفي حالة البناء بالمواد الترابية وخاصة طريقة التربة المدكوكة من خلال القوالب Ramped Earth فإن الحوائط غالباً ما تكون سميكة، وهو ما يوفر كتلة حرارية تخزينية كبيرة

Thermal Mass تجعل انتقال الحرارة من خلال الحائط بطيئة، وهذا يساهم بشكل كبير في الحفاظ على درجة الحرارة الداخلية للمبنى ويوازنها حتى لو كانت درجة الحرارة الخارجية مرتفعة. وحسب منكه فإن الحوائط الترابية بحد ذاتها ليست عازلاً جيداً للحرارة، حيث إن U-value لجدار ترابي مدكوك بسمك ٣٠ سم تتراوح من ١,٩ إلى ٢,٠  $W/m^2K$  (منكه، ٢٠١٣: ٥٨). وهذه القيمة عالية وتتجاوز بعدة أضعاف الحد الأقصى للتوصيل الحراري في العديد من الدول خاصة في المناطق الباردة. وحسب ايستون فإن قيمة الـ R-value لجدار ترابي بعرض ١٨ بوصة (٤٥ سم) فهي تقريباً حوالي ٥,٤ وهي أقل بكثير من المواصفات الحديثة للعزل الحراري للحوائط، والتي تتطلب قيمة في حدود ١١ (Easton, 2007: 43). والـ R-Value هي مواصفة لقياس التدفق / التوصيل الحراري للمادة المعنية - مثل حائط طيني او حائط بلوك خرساني الخ... - وارتفاع قيمتها يشير إلى ارتفاع مقاومة التوصيل الحراري، وعلى العكس منها الـ U-Value والتي يشير انخفاضها إلى انخفاض القدرة على التوصيل الحراري. لكن وفي المناطق الحارة وبسماكة حوائط أكبر فإنها تساهم في تبطئة انتقال الحرارة ومن ثم تجعل الحياة داخلها مريحة؛ حيث إنها توازن الرطوبة وتكون فعالة أكثر كلما ازداد عرض الجدار. وقد ابدع العرب المسلمين في الاندلس، وقبل قرون عديدة، بإنشاء مباني رائعة مثل قصر الحمراء في غرناطة، إسبانيا، والتي بنيت أجزاء منه بالتربة

وتختلف المواقع بحسب طبيعتها وتركيباتها الجيولوجية، فالمناطق المعرضة للزلازل يمكن البناء فيها بالتربة الطبيعية لكنها تتطلب معالجات مختلفة عن غيرها. وبعض الدول لديها كود بناء خاص بالتربة الطبيعية يشمل المعالجة الخاصة بالمناطق المعرضة للهزات الأرضية.

والمباني الترابية حساسة للمياه وتجمعاتها ويفضل دوماً حمايتها خاصة حول الأجزاء السفلى من الحوائط... ويفضل دوماً حمايتها بقبعة (سقف أو رواق يغطي الجدران) وحذاء قاعدة من مادة مقاومة للمياه مرتفعة عن مستوى الأرض) من الأمطار والسيول. لكن إذا عولجت جيداً فإن الحوائط الترابية تتحمل المياه والأمطار بشكل جيد، وليس هناك ما يدعو للقلق منها. وهناك أمثلة عديدة على مستوى العالم توضح كيف أن تلك المباني عاشت عدة قرون وبعضها ما يزال قائماً.

وفي حالة البناء بالمواد الترابية وخاصة طريقة التربة المدكوكة من خلال القوالب Ramped Earth فإن الحوائط غالباً ما تكون سميكة، وهو ما يوفر كتلة حرارية تخزينية كبيرة

وفي حالة البناء بالمواد الترابية وخاصة طريقة التربة المدكوكة من خلال القوالب Ramped Earth فإن الحوائط غالباً ما تكون سميكة، وهو ما يوفر كتلة حرارية تخزينية كبيرة

ومجمع قصر الحمراء في غرناطة في أجزاء عديدة منه بما في ذلك السور تم بناؤه بالتربة المدكوكة، وسور الصين العظيم الذي بني قبل ٥ آلاف سنة تم بناؤه أيضاً بالحجر والتربة المدكوكة (Easton, 2007).

إن البيئة المناسبة للبناء بالقوالب الترابية هي بيئة طبيعية قدر المستطاع، أو بيئة يحكمها كود عمراني يشجع الحفاظ على البيئة الطبيعية في المنطقة المعنية. ومهما تميز جمال التصميم وإتقان البناء بهذه الطريقة فلا شك في أنه سيتأثر كثيراً بما حوله. فعلى سبيل المثال: إن كانت المنطقة المحيطة بالمبنى هي بيئة تغطي فيها الأسطح الصلبة غير النافذة والمخزنة للحرارة مثل الخرسانة والأسفلت ويقل فيها التشجير والغطاء الأخضر؛ فإنها لن تضيف إلى المبنى الترابي الطبيعي.

كما أن هذا النوع من المباني قد يتطلب التعامل مع كودين مختلفين تماماً: كود عمراني يحكم البيئة المحيطة بالمبنى ودور المبنى في تغليف الفراغات المحيطة، وكود معماري/ إنشائي يحكم طريقة التنفيذ وضمان كفاءة جميع الأسطح (سواء الحوائط أو غيرها) التي تم بناؤها من خلال ضغط التربة ودكها ومعالجتها لهذا الغرض. وأنتجت العديد من الدول كوداً خاصاً بهذا النوع من المباني مثل الولايات المتحدة، وأستراليا، والهند ونيوزيلاندا وغيرها من الدول.

المدكوكة. ففي الثلاثينيات من القرن الماضي تبنى المهندس المعماري توماس هيننز فكرة البناء بالتراب المدكوك، واستطاع الحصول على تمويل لبناء سبعة مساكن تجريبية بهذه الطريقة، وكان سكانها يجدونها باردة في الصيف ودافئة في الشتاء وما زالت تلك المساكن مأهولة إلى اليوم... ومثل هيننز فإن فرانك لويدرايت صمم بالتربة المدكوكة (المصدر السابق). ويمكن الاستنتاج مما سبق أن سماكة الحائط وكونه من مادة طبيعية ساهم في تخفيف ضعف عزله الحراري. ويمكن القول: إن المساكن المبنية من أنواع وتقنيات التربة الأخرى مثل: طريقة البناء باللبن أو طريقة البناء بالعروق لها الميزات نفسها. وقد أوضح مميزات الراحة داخل المبنى الطيني المعماري الراحل حسن فتحي رحمه الله بعد منتصف القرن الماضي. لكن حتى إعداد هذه الورقة لم يظهر أحد من المعماريين العرب قد تبنى فكرة البناء بالتربة المدكوكة وتطويرها للمواصفات العصرية منذ ذروة ازدهارها في الأندلس قبل حوالي ٧٠٠ سنة.

إن البناء بالتربة المدكوكة / القوالب الترابية هي من أفضل وسائل البناء الطبيعي في المناطق الصحراوية؛ لما تتميز به التربة من كتلة حرارية مناسبة للطبيعة الصحراوية، لكنها للأسف لم يتم تطويرها في منطقة الجزيرة العربية على مدى القرون الماضية خلاف منطقة الأندلس التي حكمها المسلمون العرب لقرون عديدة ونقلوا تقنية البناء بالتربة المدكوكة لها في مواقع عديدة.

## ٣. كيفية اختيار التربة المناسبة

ليحقق البناء بالقوالب الترابية أهدافه فيفضل دوماً أن يتم استخدام التربة المحلية. ومن أفضل الأمثلة أن يتم حفر الموقع واستخراج التربة ومعالجتها ثم البناء بها. وكما هو معروف فإن التربة السطحية غير مناسبة لهذا النوع من البناء لأنها تكون في العادة تربة عضوية مناسبة للزراعة. والأفضل أن يتم الحفر بعمق يتجاوز عمق التربة العضوية للوصول إلى الطبقة التحتية sub-grade.

وتتكون التربة عادة من الطين Clay والطيني Silt والرمل Sand والحصى Aggregate بنسب مختلفة. ويتم تحديد نوع التربة المناسب للبناء بالدك حسب مكوناتها؛ من خلال أقطار ذرات أنواع تلك التربة. وباستثناء الطين فإن جميع أنواعها محايدة أثناء تعرضها للماء. أما الطين فإن خواصه تتغير حسب مستوى الرطوبة، وما لم يتم حرقه بدرجات حرارة عالية فإنه يتأثر بالعوامل الجوية خاصة المياه.

يتم تصنيف الطين على أنه تلك الذرات الترابية التي يقل قطرها عن ٠,٠٠٢ ملم، أما الطيني فهو ذلك الذي تكون قطر ذراته ما بين ٠,٠٠٢ ملم - ٠,٠٦ ملم، وفيما يتعلق بالرمل فتكون أقطار ذراته ما بين ٠,٠٦ ملم - ٢ ملم، وبالنسبة للحصى فهو الذي تكون أقطاره أكبر من ٢ ملم (Minke, 17: 2012). وعليه يمكن تحديد أنواع التربة بناءً على أقطار ذراتها. وتستخدم

بعض المراجع كلمة "الطفل" بدلاً من كلمة "الطين" لترجمة كلمة "Clay"، أما في هذا البحث سيتم فقط استخدام كلمة الطين لذلك وهو ما يقل قطره عن ٠,٠٠٢ ملم.

ولغرض البناء بالتربة المدكوكة فيفضل استخدام التربة المتدرجة well graded soil والتي يكون فيها تدرج واضح في أحجام الحبيبات. وعند الحفر لاستخراج التربة المناسبة للبناء يتم تجنب التربة السطحية الزراعية، كما يتم استخدام المناخل لاستبعاد القطع الكبيرة من الحصى. وفي حالة البناء بالتربة المدكوكة غير المعالجة Raw Rammed Earth فيفترض أن تكون نسبة الطين ما بين ١٠٪ إلى ٣٠٪؛ حيث تعتمد تلك النسب على عوامل عديدة ومتنوعة. أما إذا تم التثبيت والمعالجة بالجير فيفضل أن لا تزيد النسبة عن ٢٠٪، لكن في حالة استخدام الأسمت كمثبت فالأفضل أن تكون نسبة الطين قليلة جداً حيث يلجأ البعض، ممن يستخدمون الأسمت كمثبت للتربة، إلى جلب التربة من كسارات محددة لضمان عدم وجود الطين.

## ٤. كيفية معالجة التربة لتكون صالحة للبناء بطريقة

## الدك

هناك عدة طرق للبناء بالتربة الطبيعية بطريقة الدك على طبقات محددة Rammed Earth، والغرض من ذلك محاولة إعادة التربة لوضع صخري قدر الإمكان. فإذا كانت التربة هي نتاج لتفتت الصخور فإنه من الممكن دك التربة

لذا يلزم استخدامها مع مثبتات أخرى في حال استخدامها للحوائط الخارجية المعرضة للعوامل الجوية. أما في حالة استخدام الجبس للحوائط الداخلية خاصة كمادة لياسة فإنها مناسبة جداً.

أما الجير فهو من أنسب المواد المثبتة، ويتميز بقدرته على تحمل الرطوبة والمياه، كما أنه مادة مسامية تسمح للجدار الترابي بالتنفس. والجير هو عبارة عن صخور جيرية يتم حرقها ومعالجتها لتتحول إلى بودرة أو عجينة حسب طريقة الإنتاج، ويسمى جيراً مائياً Hydraulic Lime أو غير مائي Non-Hydraulic Lime. وعند خلط الجير بالتربة وترطيبها فإنه، أثناء التجفيف، يبدأ بالعودة لحالته الأصلية المتصلبة (الصخرية) من خلال امتصاص ثاني أكسيد الكربون من الجو... وتلك المراحل تأخذ وقتاً ليس قصيراً، حتى أن بعض الحوائط المعالجة بالجير تستمر بالتحول لأشهر أو حتى سنوات حتى تأخذ وضعها النهائي. ويمكن استخدام مساعداً تثبيتاً متنوعاً Pozzolan لتثبيت الحوائط الترابية مثل الرماد المتطاير Fly Ash وبودرة البلوك الأحمر الناتجة من تصنيعه أو تكسيره.

أما الطين فهو الرابط الطبيعي السائد منذ القدم، ويمكن بناء الحوائط بدون أي إضافات، و فقط من خلال نسبة الطين في التربة خاصة إذا كان الباني ذا خبرة كبيرة ومعرفة بنوعية التربة والكثافة القصوى الناشئة لها، وتم استخدام نسبة أعلى من الحصى. لكن من المهم أن يكون

وإعادتها لحالتها الصخرية مرة أخرى، لكن الفرق أنه في الحالة الطبيعية تستغرق تلك العملية مئات أو آلاف السنين، بينما في طريقة الدك على طبقات يتم محاولة محاكاة ذلك خلال أيام معدودة.

ولتقوية تماسك التربة كحائط فإنه يمكن استخدام روابط ومثبتات أو الاكتفاء بنسبة الطين في التربة لتكون هي الرابط الوحيد. والمواد المثبتة عديدة ومختلفة، من أشهرها الأسمنت، الجير، الجبس، ومشتقات القار. كما أن الرماد المتطاير Fly Ash يساهم في التقليل من نسبة المثبتات خاصة مع الأسمنت. ويعتبر الأسمنت وبإضافة نسبة قليلة (٥٪ إلى ١٠٪ على سبيل المثال) من أقوى المثبتات لإعطاء قوة تحمل عالية للحوائط. إلا أن إنتاج الأسمنت يستهلك موارد طبيعية ضخمة ويزيد نسبة ثاني أكسيد الكربون في الجو (حوالي ٨٪ من ثاني أكسيد الكربون في الجو تسبب إلى صناعة الأسمنت). بالإضافة إلى أن الأسمنت مادة غير طبيعية وتضعف قدرة الحوائط على التنفس وموازنة الرطوبة وهو ما يتعارض مع فكرة البناء بالمواد الطبيعية. إلا أن هذا لا يمنع من بناء أجزاء من المبنى خاصة تلك التي قد تكون عرضة أكثر للعوامل الطبيعية بتربة مثبتة بالأسمنت. أما مشتقات القار فهي مناسبة للعزل المائي، لكنها ليست مادة مفضلة (من وجهة نظر الباحث) كمادة مثبتة للحوائط الترابية. وفيما يتعلق بالجبس فهي مادة طبيعية لكنها تتشكل وتتصلب بسرعة، كما أنها ضعيفة أمام المياه؛

الرمال إلى أسفل خلال فترة قصيرة جداً، وبعد ذلك بساعات ستتكون طبقة من الطمي فوق الرمل ثم تتكون الطبقة الأخيرة من الطين والتي قد تستغرق أكثر من يوم كامل. ويتضح من الشكل أدناه تجربة عيتين من تربتين مختلفتين، حيث ظهر أن نسبة الطين والطين حوالي ٢٠٪ في الأولى، بينما الأخرى استمرت عكراً على الرغم من مرور يومين عليها، وهو ما يعني أن نسبة الطين والطين أعلى بكثير من الأولى. لكن يجب إدراك أن هذه التجربة ليست كافية علمياً لتحديد نسبة الطين ومكونات التربة الأخرى، فقد أظهرت تجارب معملية عدم موافقتها لذلك (Minke, 2012). لكن يمكن اعتبار هذه الطريقة

نوع الطين مناسباً لهذا الطريقة من البناء، ويجب تجنب أنواع الطين التي تتمدد وتتفخ بشكل كبير إذا تعرضت للمياه أو نسبة كبيرة من الرطوبة. وإذا توفرت تربة مناسبة تكون نسبة الطين فيها ما بين ٢٠٪ إلى ٣٠٪ فإنه يمكن بناء حوائط ترابية جيدة ومتاسكة، مع أهمية مراعاة زيادة نسبة الحصى / البحص في هذه الحالة. ويمكن معرفة النسب الأولية للطين في التربة من خلال أخذ عينة من التربة المعنية ووضعها في علبة زجاجية أو بلاستيكية شفافة، بحيث تمثل التربة تقريباً ثلث حجم العلبة، ثم يضاف لها الماء بحيث يكون مستواه يصل إلى ثلثي حجم العلبة وبعده يتم رج العلبة جيداً حيث سينزل



الشكل رقم (١). في الصورة اليمنى تتضح طبقة الرمل الغامقة في الجزء الأسفل من القارورة اليمنى وفوقها الطمي والطين، بينما في العينة اليسرى لا تتضح الفواصل جيداً. وهذا مؤشر على أن نسبة الطين والطين في العينة اليسرى أكثر بكثير منها في العينة اليمنى. ومن الصعب التمييز بين الطمي والطين بالعين المجردة. لكن بعد أخذ عينة من التربة وتجربتها اتضح أن الطين في العينة اليمنى يوافي الحد الأدنى لنسبته في تثبيت التربة. وفي الصورة اليسرى رسم تقريبي لنسبة تلك المكونات وكما يتضح من الصورة من الصعب التمييز بين الطمي والطين في العينة. لكن وبصفة عامة فإن الطمي هو الطبقة التي تستقر خلال الساعات التالية لعملية الرج بينما الطين قد يظل معلقاً في الماء ليوم أو أكثر.



الشكل رقم (٢). كما يتضح في الصورة طوبتين طينيتين تم لصقهما من خلال تربة محلية بغرض اختبار نسبة الطين فيها حيث إن تلك النسبة جيدة وقادرة على ربط الطوبتين ببعضهما البعض بقوة كافية بحيث يمكن رفع الطوبة العليا لترفع معها السفلى.

اللدونة Plasticity Index مؤشراً جيداً على نوعية التربة. وما يسمى بالدفان يمثل تربة جيدة وهو طبقات ما تحت التربة الزراعية، فالتربة الزراعية والعضوية غير مناسبة إطلاقاً لبناء الحوائط المدكوكة. ومن غير المفضل استخدام الأسمت مع الطين في هذا النوع من البناء حيث إنهما غير مناسبين معاً، بالإضافة إلى أن كليهما سيتنافس على امتصاص الرطوبة فيضعف الآخر. وفي حالة ضرورة استخدام الأسمت مع تربة طينية فلا بد من زيادة نسبة الأسمت بشكل أكبر للتغلب على وجود الطين وهو ما يضعف فكرة البناء الطبيعي. كما أنه إذا تم استخدام الأسمت كمثبت لتلك الحوائط فإن قدرتها على موازنة الرطوبة تنخفض بشكل كبير وهو ما يضعف إحدى مميزاتا. ومن الضروري خلط التربة جيداً بغض النظر عن طريقة التثبيت وفي حالة استخدام

مع اختبارات ميدانية أخرى مؤشراً أولياً في حال عدم توفر المعامل المناسبة لاختبارات التربة.

وقد قام الباحث بأخذ جزء من العينة الأولى وعمل منها مونة طينية لتثبيت طوبتين طينيتين إحداهما فوق الأخرى، وبعد أن جفت المونة كان من الممكن حمل الطوبة العليا وملاحظة أن الطوبة السفلى ملتصقة بها ولم تسقط، وهو ما يعني توفر نسبة كافية من الطين للتصاق الطوبتين. وهذا أيضاً يمكن اعتباره مؤشراً أولياً لتوفر نسبة طين كافية في التربة. لكن هناك طرق ميدانية متعددة لمعرفة توفر الطين بالتربة والعديد من مراجع هذا البحث تغطيها بتفصيل جيد.

ويمكن استخدام الأسمت مع الجير، والجير مع الجبس، والجير مع الطين لمعالجات أي نقص في تركيبة التربة. وغالباً ما يكون معامل



وتدرج حبيبات التربة، وطريقة الدك؛ هي أهم عناصر النجاح في بناء حائط ترابي قوي ومتناسك.

### ٥. طريقة العمل

يتم خلط التربة بنسب يتم تجريبيها أولاً في عينات مستقلة لمعرفة مدى تماسكها وقدرتها على التحمل، وبعد الخروج بالعينة المناسبة يتم خلط التربة على ذلك الأساس. وبعد خلط التربة جيداً يتم وضعها في مكان مناسب بعيداً عن أي شوائب قد تؤثر على تركيبها بما في ذلك أوراق الأشجار المتساقطة وغير ذلك خاصة من المواد العضوية.

وبعد ذلك يتم إعداد القوالب الخشبية أو البلاستيكية المناسبة، ويتم تثبيتها جيداً حيث إن الدك سينتج عنه قوة تفتت كبيرة ستؤدي إلى انبعاج القوالب خاصة في أسفل القالب وجوانبه البعيدة عن الدعم. ويتم ذلك التربة السائبة على طبقات في حدود الـ ٢٠ سم إذا كانت التربة معالجة بمشبات (مثل الأسمنت) وباستخدام الضواغط الهوائية، بحيث تكون بعد الدك في حدود ١٥ سم. وفي حالة استخدام الدك اليدوي فيفضل تقليل سماكة التربة السائبة. وإن كانت التربة مثبتة بالجير فطبقات بسماكة ١٥ سم مناسبة ويتم دكها إلى حوالي ثلثي سماكتها وهي سائبة. أما إذا كانت المادة الرابطة هي الطين فقط فالأفضل أن لا تزيد الطبقات عن ١٠ إلى ١٢ سم، وتلك لتقليل سماكتها إلى أقل من الثلثين.

الاسمنت فإن وجود تكتلات من التربة تزيد في حجمها عن ٥ ملم قد تضعف قوة الانضغاط بنسبة ٥٠٪ (Houben & Guillaud: 2014).

والتربة المناسبة للبناء بطريقة الدك باستخدام الطين فقط كرابط يفضل أن تدرج في أقطار ذراتها من الكبير إلى الصغير، بحيث يكون حوالي نصفها أو أكثر من البحص وحبيبات تربة كبيرة ورمل النهر ذي الجوانب الحادة، والباقي من الطين Clay والطيني Silt والرمل الناعم Fine Sand. ويشكل الحصى والبحص الهيكل القوي لتحمل الضغط في الجدار، بينما المواد الأخرى لملاء الفراغات والطين هو الرابط بينها جميعاً. وأثناء الدك وبنسبة رطوبة مناسبة فإنه يمكن التخلص من الفراغات الهوائية والوصول إلى أعلى كثافة ناشفة ممكنة. ويمكن لذوي الخبرة في هذا المجال معرفة متى يتم الوصول إلى الحد الأقصى من الدك من خلال الصوت الناتج عنه. مع العلم أن الدك أكثر من المطلوب سيضعف التربة ويساهم في تخلخلها.

وفي حالة استخدام الجير مع التربة فالأفضل أن تكون نسبة الطين ما بين ١٠٪ إلى ٢٠٪، وأن لا تزيد عن ٢٠٪، وفي حالة استخدام الجبس مع الجير فيفضل أن تكون نسبة الطين في حدود ١٠٪. أما في حالة استخدام الأسمنت كمثبت فالأفضل ألا يكون هنالك طين أو أوا تكون نسبته في التربة قليلة. وفي جميع الأحوال فإن طريقة خلط التربة ونسبة الرطوبة فيها (والتي تحقق أعلى كثافة ناشفة بعد الدك)،



الشكل رقم (٣). تم عمل العديد من العينات لمعرفة قدرة التربة على التماسك واتضح من ذلك ميزاتهما وعيوبها .

للرطوبة أو المياه الأرضية. ويمكن بعد جفاف العينة وضع أوزان ثقيلة فوقها لمعرفة قدرة تحملها للضغط والتي يتم حسابها على أساس أوزان تلك الأحمال مقسوماً على مساحة سطح العينة.

#### ٦. تجربة بنبان

تقع بنبان في شمال مدينة الرياض وجوها قريب جداً من المدينة، وعادة تقل درجة الحرارة

وإذا كان الحائط الترابي سيقام على التربة أو فوق مواد لا تحقق العزل المائي المطلوب وقد تمر الرطوبة من خلالها إلى الحائط الترابي؛ فلا ينصح بالطين كرابط وحيد، بل يفضل الأسمنت أو على الأقل الجير في الطبقات السفلى من الحائط. والأفضل استخدام عازل للرطوبة بين القاعدة والحائط الترابي. وقد أظهرت العينات أن تلك التي تكون تحت مستوى سطح التربة تتأثر وتضعف وينهار أجزاء منها بسبب تعرضها



الشكل رقم (٤). يتضح في الصورة الجزء الجنوبي من الضاحية، والذي كان حسب رؤية المصمم (مؤلف هذه الورقة) أن يكون مجاورة سكنية طبيعية حيث إنها تتميز باستقلاليتها الكاملة فيحدها من الشمال حى مسار الغاز (يظهر كخطين منقطين متوازيين)، ومن الغرب وادي بنبان ومطار الملك خالد الدولي، ومن الشرق من الشرق أملاك خاصة.

التجربة تم البدء بخلطة تربة متنوعة في الحجم، وتتدرج في حجم الحبيبات من ذرات الطين الصغيرة جداً إلى الحصى الصغير. وتم عمل أول جزء من الحائط حسب النسب التقريبية التالية:

● +١٠٪ طين Clay

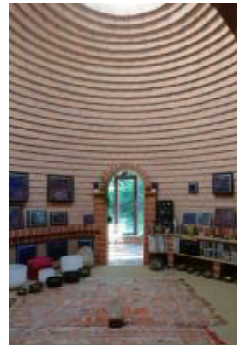
● ± ٣٠٪ رمل Sand

● ± ٥٠٪ دفان Sub-Base

وقد تم استخدام خليط ماء الجبس والجير لترطيب التربة قبل دكها، حيث تم خلط الجير بالماء أولاً، ثم إضافة الجبس لاحقاً (بسبب سرعة الشك له) وتحريكهم جيداً قبل إضافتهم للتربة، وكانت نسبة الجبس أعلى بكثير من نسبة الجير. لكن هذه النسب كانت قليلة نسبياً مما يجعل الطين يلعب الدور الأكبر في التثبيت. وقد تم خلط المكونات جيداً ونسبة رطوبة مناسبة تسمح بالدك المناسب، وفي الغالب تتأرجح هذه

فيها ب ٢ أو أكثر بسبب طبيعتها الريفية. وقد تم تكليف الباحث كمخطط عمراني بتخطيط ضاحية الشمال بمساحة قدرها ٦٦ مليون متر مربع وهي مجاورة لبنان. وتم الانتهاء من المخطط العام وكان رؤية الباحث أن يكون الجزء الجنوبي من الضاحية مخصصاً للبناء والتخطيط الطبيعي. وعلى الرغم من انتهاء المخطط العام وقبول المستثمرين به إلا أن الظروف تغيرت ولم يتم تنفيذ المشروع. وهذه حال المشاريع العقارية، فالكثير منها يتوقف بعد انتهاء الفكرة. وعلى الرغم من أن بناء مبنى طبيعي بالتربة الطبيعية ضمن ضاحية طبيعية سيكون أكثر ملاءمة، إلا انه يمكن البناء في مواقع أخرى للخروج بتجربة حقيقية يمكن معايتها على ارض الواقع.

وقد تم اختيار مكان مناسب لإقامة مبنى بالتربة المدكوكة في موقع خاص ليتم إنشاؤه بالتربة المدكوكة في خريف ٢٠١٧. وفي هذه



الشكل رقم (٥). الصورة من اليمين: الباحث مع خلطة تربة محلية في الريف التركي. الصورتان من اليسار: بيت بروفيسور «مينكة» المبني من الطوب الطيني من الداخل والخارج. ويلاحظ كيف تمت معالجة الحائط الخارجي بمواد طينية متنوعة وتشكيلات مختلفة. وقد زار الباحث البروفيسور قيرمنت مينكه، والذي يعتبر أحد علماء البناء الطبيعي، في مدينة كاسل الألمانية. وقد كان بيته مبنياً من الطوب الطيني، ودرجة الحرارة داخل البيت معتدلة ومريحة في الصيف واتضح ذلك من خلال الزيارة.

مثبتات التربة المختلفة والآليات والمعدات الحديثة (مثل الدكاكات الهوائية -Rammers Pneu-matic) تنتشر في دول العالم الاكثر ممارسة في هذا المجال مثل الدول الغربية واوراليا ونيوزيلاندا وجنوب افريقيا.

لكن وعلى أي حال فإن طريقة الجير والجبس لم تنتشر في أوروبا وأستراليا وأمريكا. ففي أوروبا وعلى وجه الخصوص في النمسا تميز مارتن راوخ باستخدام الطين فقط كرابط، لكن هذه الطريقة ظلت أيضاً محدودة الانتشار. وإذا كان الطين هو المثبت الوحيد فإن نسبته تكون ما بين ١٥٪ و ٣٠٪. أما في أستراليا وأمريكا الشمالية ونيوزيلاندا وجنوب إفريقيا والعديد من دول العالم الأخرى فيعتبر الأسمت المثبت السائد والأكثر انتشاراً. وتراوح نسبة الأسمت كمثبت ما بين ٥٪ و ١٠٪ وقد تزيد او تنقص

النسبة حول الـ ١٠٪ حسب عوامل عديدة. وتختلف التجارب العالمية في طرق تثبيت التربة. ففي تركيا يعتبر استخدام الجبس والجير لتثبيت الحوائط الترابية من الطرق السائدة. وحسب بلجي وما تم عمله في جامعة إستنبول فإن نسب المواد المثبتة تكون: ٢ جزء جير، ١٠ جزء جبس، و ٢٠-٢٤ جزء ماء (Bilge, 2008). لكن في الريف التركي ومن خلال متابعة الباحث لما يقوم به البناؤون هناك فإن النسب المستخدمة مختلفة تماماً. حيث يكون الجير أعلى من نسبة الجبس وتشكل هذه المثبتات نسبة محددة من مكونات الخليط الترابي. وفي المغرب العربي مازال البناء بالتربة المدكوكة يستخدم في بعض المناطق الريفية وباستخدام طرق محلية وكذلك الحال في بعض الدول الافريقية المجاورة. لكن الطرق الحديثة للبناء بالتربة المدكوكة وباستخدام



الشكل رقم (٦). في الأشكال أعلاه تم تجربة زيادة نسبة الجير وتقليص نسبة الجبس مع تثبيت نسبة الطين في التربة، حيث تم عمل شكل عمود ترابي حوالي ٦٠ سم \* ٦٠ سم، كما تم عمل قاعدة على شكل حرف U بالطريقة نفسها وتم تركها يتعرضان للعوامل الطبيعية دون أي حماية، وحتى الآن النتائج جيدة ولم يحدث تهاك لكليهما.

الصخري. ويمكن بالممارسة والخبرة معرفة ذلك أو باللجوء إلى المعامل المختصة لفحص التربة المعنية وتحديد نسبة الرطوبة التي ستحقق أعلى كثافة ناشفة Highest Dry Density.

هذا مع العلم أنه تم زيادة نسبة الجير في تجارب لاحقة وتقليص نسبة الجبس لتكون نسبة الجير أكبر، (ويمكن الاستغناء عن الجبس أيضاً) بحيث يكون الخلط ناشفاً لجميع المكونات، ثم يرش الخليط المتمازج جيداً بنسبة محددة من الماء، وكانت النتائج أفضل بكثير مما تم عمله في التجربة الحالية. وعلى الرغم من عدم الاهتمام كثيراً في الوقت الحالي بالجير كمادة مثبتة للحوائط الترابية، إلا أنه - وبناء على تجربة الباحث - يعتبر من المواد المفضلة لبناء الحوائط الطبيعية. وحسب هولمز ووينغيت فإن خصائص الشك والمسامية للجير تعتبر مثالية لتقوية الحوائط الترابية (Holmes S. & Wingate M. 2002: 142).

قليلاً حسب عوامل عديدة.

وبصفة عامة فإن أكثر الأعداد من مباني التربة المدكوكة الحديثة خاصة في الدول المتقدمة تكون مثبتة بالأسمنت. لقد ساهم الأسمنت في جعل تلك المباني متماسكة وقوية، وأبدع المعماريون في تصميمها وظهرت منها أمثلة رائعة وجميلة... مع العلم انه يمكن الاكتفاء بالطين او الجير كمثبتات طبيعية وإنتاج مباني أيضاً جميلة وجذابة.

#### ٧. نسبة الرطوبة والكثافة الناشفة

إن نسبة الرطوبة في غاية الأهمية، ويمكن الوصول إليها بدقة من خلال حساب أعلى مستويات الكثافة الناشفة Dry Density للخليط. وتكمن أهمية الرطوبة المناسبة للتربة في كونها تساعد على دك التربة والتخلص من الفراغات الهوائية، وكأن الغرض هو إعادة التربة لوضعها



الشكل رقم (٧). يتم خلط التربة جيداً بحيث تكون الرطوبة متماثلة في جميع أجزائها، وبعدها يتم تفرغها في القوالب المناسبة على طبقات، ويتم دكها لتخفيض سماكتها بنسبة الربع على الأقل، والثلث أفضل مع نسبة الرطوبة المثلى لتحقيق أعلى كثافة ناشفة.

### ٨. القوالب المستخدمة في تجربة بنبان

تم عمل قوالب خشبية Plywood مثبتة بإطارات وقوائم معدنية. وكانت القوالب عبارة عن مستطيل ٦٠٠ ملم عرض، و ١٢٠٠ ملم طول، و ٦٠٠ ملم عمق قابلة للتكرار بحيث يمكن مضاعفتها بالاتجاه الأفقي أو العمودي. وقد تم عمل قاعدة خرسانية شريطية لبناء الجدار فوقها، والأفضل دوماً ألا يقل عرض تلك القاعدة عن عرض الحائط الذي ستحملة. وتم تصميم تلك القاعدة حسب الأحمال المتوقعة عليها.

وفي الشكل أعلاه فإن أبعاد القالب هي ٦٠ سم \* ٦٠ سم \* ١٢٠ سم، ويمكن إضافة

قالب آخر أفقياً ليكون الطول ٢٤٠ سم، وبهذه الطريقة يمكن عمل المدماك الأول للحوائط جميعها في الوقت نفسه إذا توفر العدد الكافي من القوالب. وبالطريقة نفسها يمكن تركيب قالب فوق قالب لعمل المدماك الثاني وهكذا، وقد تم تصميم القوالب بحيث تكون قابلة للتمدد الأفقي والرأسي.

وفي الحائط الأول تم عمل القالب بالأبعاد أعلاه، وقد استهلك حوالي ١٢ عريبة من التربة السائبة المعدة لذلك. وفي حالة المداميك الأولى كانت المكونات كما يلي:

١٢ عريبة = ٦ عربيات دفان + ٤ عربيات رمل أحمر + عريبة واحدة طين + عريبة واحدة



الشكل رقم (٨). يتم الدك على طبقات ويستمر حتى إنهاء الحائط خلال أقصر مدة تجنّباً لأن تجف أي طبقة قبل إضافة ما فوقها.

من ١٧٠٠ كغم / م<sup>٣</sup> وبعد الدك ازدادت لتكون في حدود الـ ٢٠٠٠ كغم / م<sup>٣</sup>، وتكون التربة متماسكة وقوية في حالة الوصول إلى أقصى كثافة ناشفة ممكنة. والوصول إلى تلك الحالة يعني أن الرطوبة كانت في المستوى الأمثل وأن الفراغات الهوائية بين جزيئات التربة انخفضت إلى حد كبير جداً. ويمكن حساب الكثافة الناشفة المثلى من خلال أخذ خليط ناشف من التربة المعدة للدك، وإضافة ماء بنسبة قليلة، ثم دك التربة في قالب محدد الأبعاد (مكعب ضلعه ١٥ سم على سبيل المثال)، ويمكن أن يكون مشابهاً لقالب العينات التي ستأخذ للاختبار، وبعد الدك يتم وزنه مباشرة بميزان دقيق، ويتم تسجيل الوزن ثم يتم تجفيف العينة حتى يثبت الوزن حتى مع زيادة التجفيف، ويتم تسجيل معلومات هذه العينة ولتكن: عينة رقم (١) ويتم تسجيل الوزن قبل التجفيف وبعده، حيث إن الفرق هو نسبة الرطوبة. ويتم إعادة الخطوات نفسها مع إضافة كمية من الماء أكبر قليلاً من السابق، فعلى سبيل المثال: يقترح keable أن تكون الزيادة في حدود ٢٪ لكل عينة إضافية بهذه الطريقة (keable, 2011: 26). ويمكن عمل عدة عينات وقياس الأوزان حتى نصل لأعلى كثافة ناشفة، والتي تمثل أعلى وزن تم تسجيله للقالب المعني، ومن خلالها يتم معرفة نسبة الرطوبة المناسبة للوصول إلى ذلك، مع ضرورة استخدام القالب نفسه والأبعاد نفسها للحفاظ على الحجم نفسه.

لكن الكثير ممن يعملون في هذا المجال

بحصص صغير. ويختلف وزن العربية باختلاف الأنواع التي تم استخدامها من تلك العربيات كما تحتوي عادةً عربيات الدفان على نسبة إضافية من الطين.

وفي المداميك التي تلت تم تغيير محتوى العربيات للقالب نفسها كما يلي:

١٢ عربية = ٧ عربيات دفان + عربية رمل  
طرطشة + عربية واحدة طين + ٣ عربيات بحصص صغير. وقد كان الهدف من التغييرات محاولة التدرج في أحجام حبيبات التربة لمعرفة النسبة الأفضل، حيث يبدو أن الإكثار من الرمل الأحمر لا يحقق الغرض المطلوب. ويبدو أن السبب في ذلك هو أن الرمل الأحمر أو الأصفر العادي ذو حبيبات دائرية، بينما يتميز رمل النهر والوديان بأنه حاد الزوايا ومن ثم فهو أفضل للتماسك أثناء الدك. ومن الصعب التحقق من مدى ذلك التماسك لأن الخلط كان يدوياً وليس هناك ما يضمن إحاطة المواد الرابطة (الطين والجير والجبس) بجميع ذرات التربة.

وقد تم استخدام قوالب محدودة العدد للبناء وهو ما اضطر الباحث لتحريكها عمودياً وأفقياً طوال فترة العمل. فعلى سبيل المثال: بعد الانتهاء من دك المدماك الأول ثم الثاني يتم فك قالب المدماك الأول بحيث يتم تركيبه فوق المدماك الثاني للبدء بالمدماك الثالث، وهكذا يتم الارتفاع بالحائط بهذه الطريقة.

وقد كانت كثافة التربة قبل الدك أقل



الشكل رقم (٩). يتضح في الصورة العليا كيف تم تركيب القوالب على مستوى الأرض وتثبيتها جيداً. وفي الصورة الوسطى كيف تم الارتفاع بتلك القوالب حتى الوصول إلى أعلى الحائط. وفي الصورة السفلى تتضح الحوائط بعد الانتهاء. وقد تم الدك يدوياً لجميع مراحل هذا العمل.

حيث إنه يواجه الشمال الشرقي، ويتجنب في جميع فتحاته الشمس المزعجة طوال اليوم، فالجهتان الغربية والجنوبية مغلقتان تماماً أمام الشمس. وبعد إضافة السقف أصبحت الحوائط في ظل طوال اليوم، وهو ما ساهم في تبطيء عملية تنشيفها، وساعد على منع حدوث تشققات. كما أن من يجلس داخل المبنى يستمتع

وخاصة في المشاريع الصغيرة يعتمدون على خبرتهم الخاصة في تقدير الكثافة الناشفة، فمن يتعامل باستمرار مع التربة الطبيعية يستطيع أن يفهمها، لكن هذا لا يعني عدم استخدام الطرق العلمية في اختبارات التربة.

لقد تم اختيار موقع مبنى بنبان بعناية





الشكل رقم (١٠). بيت كوينتن برانش في أريزونا الذي زاره الباحث في صيف عام ٢٠١٦، وقد تم بناء البيت بالتربة المدكوكة المثبتة بالأسمنت وإلى اليسار يظهر ملحق البيت ويتضح الجسر الخرساني بلونه الأسمتي.

العينات في معامل كلية الهندسة بجامعة الملك سعود، وتراوحت قوة الضغط Compressive Strength لها ما بين ٠,٦ و ٢,٠٠ نيوتن / ملم ٢ ( 2.00 - 0.6MPa)، وقد كانت أقوى عينة (٢,٠٠ نيوتن / ملم ٢) هي التي كانت نسبة الجير فيها أعلى من نسبة الجبس، بينما البقية - كما ذكر

بالمنظر الطبيعي الذي أمامه فالتوجيه نحو الشمال الشرقي محبب بصفة عامة في مدينة الرياض.

وقد تم أخذ عينات عديدة من التربة المعالجة ودكها على شكل أسطوانات صغيرة بقطر ١٠ سم وطول ٢٠ سم، وتم اختبار تلك



الشكل رقم (١١). توضح الصورة بيتاً معالجاً طبيعياً في ضاحية نارارا بالقرب من سيدني في أستراليا أثناء زيارة الباحث لها .



الشكل رقم (١٢). توضح الصور مبنى سكنياً من التربة المدكوكة في حي إيرث سونغ في أوكلاند نيوزيلاند، والذي زاره الباحث في خريف ٢٠١٩. ويتضح في الصور شكل الحائط المدكوك من خارج البيت وداخله. حيث إن هذه الحوائط لا تحتاج إلى لياسة أو دهان أو معالجات أخرى.



الشكل رقم (١٣). الباحث أثناء زيارته لـ «مارتن راوخ» في النمسا ويظهر بيت السيد راوخ من عدة زوايا

كويبتن برانش من رواد البناء بالتربة المدكوكة في الولايات الجنوبية الغربية الأمريكية وبالتحديد في ولاية أريزونا حيث زاره الباحث هناك..

وفي أستراليا ونيوزيلاند يتم استخدام الأسمت كمثبت للحوائط الترابية، وقد زار الباحث كلا البلدين حيث يوجد فيهما العديد من المباني التي تم بناؤها بطرق طبيعية سواء بالتربة المدكوكة أو بالمعالجات الطبيعية الأخرى، مثل: ضاحية نارارا بالقرب من سيدني في أستراليا، وحي إيرث سونغ في أوكلاند في نيوزيلاند.

وفي أوروبا وبالتحديد في النمسا يعتبر مارتن راوخ من الرواد على مستوى العالم في البناء بالتربة المدكوكة المثبتة طبيعياً مثل التثبيت بالطين. وله اعمال مشهوره في هذا السياق. لكن التثبيت بالطين فقط هي طريقة ليست سهلة وتتطلب مهارات عالية و معرفة دقيقة بمكونات التربة المستخدمة.

وقد زار الباحث السيد راوخ في النمسا واطلع على بيته المبنى من مواد طبيعية مثبتة بالطين ولم يتأثر البيت بالاجواء المطيرة في النمسا حيث تمت معالجة التربة بخطوط افقية من مواد طبيعية مقاومة للمياه وتمنع تدفق المياه المستمر على واجهة المبنى الخارجية ... وهذه الفكرة ايضاً مستخدمة في المباني القديمة في مناطق جنوب المملكة التي تهطل فيها الامطار كثيراً مثل مرتفعات عسير وماحولها.

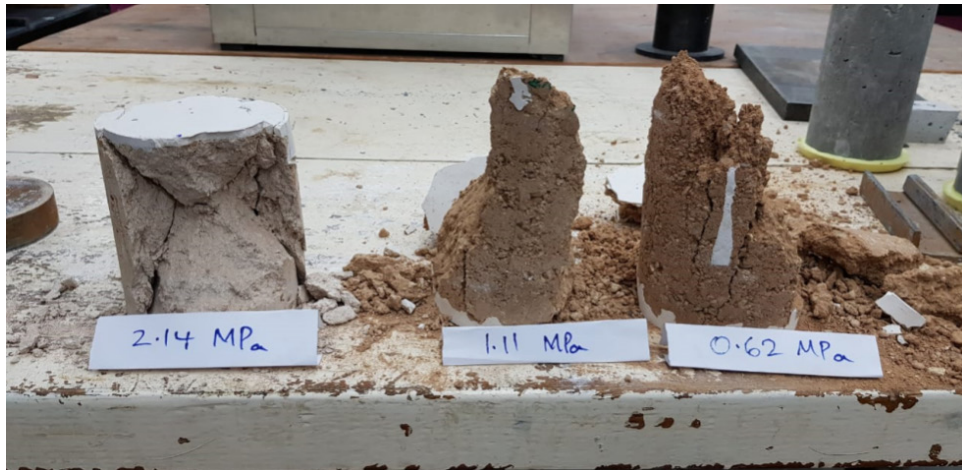
سابقاً - كانت نسبة الجبس فيها أعلى بكثير من نسبة الجير. وحسب بعض المهتمين بهذا المجال فإن المواصفات المهنية تتطلب أن تكون تلك القوة ٤, ٢ نيوتن / ملم (Kapfinger O. & Sauer, 2015: 125). وفي تركيا قام البروفيسور روجي كافيسج أوغلو وآخرون في العقود الأخيرة من القرن الماضي باستخدام الجبس كمثبت للحوائط الترابية، وحسب بلجي فإن استخدام الجبس كمثبت رئيسي يعطي قوة انضغاط تتراوح بين ٢, ٠ و ٤, ٠ نيوتن/م (Bilge, 2008). وتتميز تركيا باستخدام الجبس والجير في التثبيت، وتعتبر من أوائل الدول في ذلك. وتتميز معظم الدول الغربية الناطقة بالإنجليزية مثل أمريكا وأستراليا ونيوزيلاندا باستخدام الأسمت كمثبت. ويعتبر



الشكل رقم (١٤). توضح الصورة حائطين ترابين بينهما مادة عازلة، في نيوزيلاندا، ويستخدم العزل في الحوائط الترابية في المواقع الباردة.



الشكل رقم (١٥). يتضح في الصورة المقابلة طريقة حساب كثافة التربة بعد الدك والتي تمثل الوزن مقسوماً على الحجم.



الشكل رقم (١٦). يتضح في الصورة نتائج اختبارات الضغط Compression Test.

الخام Raw Earth يمكن أن تكون مناسبة بقوة ضغط قدرها 1.0 MPa (Krahn T., 2019: 64) كما أن المواصفة النيوزيلاندية NZS 4297 بعنوان Engineering Design of Earth Buildings وضعت ٥, ٠ ميغاباسكال كرقم مقبول لقوة الضغط Raw Rammed Earth للمعالجة غير المعالجة (Morris, H. et al, 1998: 23).

وبصفة عامة فإن البناء بالحوائط الترابية في المناطق الباردة جداً قد يتطلب عزلاً حرارياً، حيث إن الكتلة الجدارية رغم سماكتها قد تتحول إلى مخزن للبرودة. لكن هذا قد لا يبدو ضرورياً في المناطق الحارة الجافة مثل الجزيرة العربية.

وعلى كل حال فإن الحوائط الطبيعية

في حدود الـ ١٠٠ ملم / السنة.

وقد تم الاحتفاظ بحوالي نصف متر مكعب من تلك التربة وتخزينها كاحتياطي لأي معالجات مستقبلية قد يتم الحاجة إليها. إن البناء بهذه الطريقة يجب أن يكون تحت مستوى ضبط وإشراف عال جداً، حيث إنه يمكن وبسهولة أن تتفتت التربة ويتهالك الجدار خلال وقت قصير إذا اختلت النسب المثلى فيه. وإذا حدث أي تفتت ولم يكن من الممكن إعادة بناء الجدار فالأفضل أن يتم تليسه بمواد طبيعية (بدون أسمنت) مثل الطين والجير وما شابه للحفاظ عليه. حيث إن استخدام الأسمنت كمادة لياقة للحوائط الترابية سيساهم في احتباس الرطوبة داخل الحائط وتدهوره خلال فترة وجيزة.

وفي حالة الرغبة في تسليح الحائط الترابي لأي غرض كان (على سبيل المثال في مناطق الزلازل)؛ فيجب أن تكون قوة الانضغاط أعلى مما سبق، ويجب أن يتم تحديدها من خلال المهندس المختص، والأفضل أن لا تقل عن ١٤ ميغاباسكال أو ٢٠٠٠ رطل / البوصة المربعة، ولتحقيق ذلك قد يكون هناك حاجة لاستخدام الأسمنت كمثبت لتحقيق تلك القوة. كما يمكن أن يكون التسليح من خلال أنابيب بلاستيكية إذا كان الغرض ربط القواعد بالجسور التي فوق الحوائط بقوة محددة.

وليس من الضروري أن تكون الحوائط بسماكة ٦٠ سم كما هي الحال في التجربة الحالية،

وقد كانت أضعف عينة تم قياسها في تجربة بنبان الحالية هي بقوة انضغاط قدرها: ٦٢, ٠ ميغاباسكال. ولمعرفة قدرة تحمل الحائط بافتراض أن تلك العينة تمثله يتم الحساب كما يلي:

$$\text{قدرة تحمل } 1 \text{ م طولي من الحائط} = 620,000 \text{ ن/م}^2 \text{ (مساحة الحائط} = 0,60 \text{ م}^2 * 1 \text{ م}) = 372,000 \text{ نيوتن أو } 372 \text{ كيلونيوتن.}$$

وبافتراض أن الكثافة تساوي تقريباً ٢٠٠٠ كغم / م<sup>٣</sup> فإن حائط بعرض ٠,٦٠ م وطول ١ م وارتفاع ٤ أمتار يكون حجمه = ٠,٦٠ \* ١ \* ٤ = ٢,٤ م<sup>٣</sup>، وباستخدام الكثافة التقريبية أعلاه فإن حمل ذلك الحائط = ٢,٤ \* ٢٠٠٠ = ٤,٨٠٠ كغم ولحساب القوة الضاغطة والناجمة من ذلك الحمل:

$$4,800 * 9,807 \text{ ن/م}^2 = 47,074 \text{ نيوتن أو } 47 \text{ كيلونيوتن}$$

وبناء على الحسابات أعلاه فسيكون هناك قدرة تحمل لأوزان إضافية قدرها = ٤٧ - ٣٧٢ = ٣٢٥ كيلونيوتن وهذا الفائض هو لأضعف عينة في الحوائط التي تم إنجازها في المشروع المعني. وحتى بافتراض أن المتر الطولي من الحائط يحمل ما يقرب من طن من الوزن للسقف في تجربة بنبان فإن قدرة التحمل لأوزان إضافية ما زالت كبيرة. لكن من الضروري إدراك أن ذلك مبنى على تجربة في موقع خاص يتم الاعتناء به وفي منطقة لا يوجد فيها زلازل وأمطارها قليلة وهي



الشكل رقم (١٧). يتضح في الصورة الجسر الرابط الذي يربط بين الحوائط الترابية المختلفة وهو ضروري لإضافة السقف للمبنى

١٧٦ (2007). ولتوضيح ذلك فإن حائط بعرض ٣٠ يمكن أن يكون ارتفاعه ٦٠, ٣ م أو ٥٠, ٤ م. لكن يرى الباحث ألا يقل عرض الحائط عن ٤٥ سم في المناطق الصحراوية لإيجاد كتلة معطلة لانتقال الحرارة وبارتفاع ما بين ٤ و ٥, ٤ م كحد أقصى يجب بعده إضافة جسر رابط خاصة للحوائط الطبيعية غير المثبتة بالأسمنت.

بل من الممكن أن تكون بحد أدنى ٣٠ سم، والمهم هو نسبة الارتفاع إلى العرض والتي يجب أن لا تزيد عن ١٤، بافتراض أن الحائط مرتبط من الأعلى والأسفل مع المبنى (المصدر السابق). وبناء على تجارب لمبانٍ قائمة من هذا النوع فإن نسبة الارتفاع إلى العرض ما بين ١٢ و ١٥ هي نسبة آمنة في المناطق التي ليس فيها زلازل (Easton D.,



الشكل رقم (١٨). تبين الصورة الشكل النهائي للمبنى بعد تركيب السقف وإنهاء التشطيبات

كي تتماسك معاً وتوزع حمل السقف فوقها. ويمكن أن يكون الجسر الرابط من أي مادة مناسبة إلا أنه في حالة هذا المشروع تم عمل جسر من الخرسانة المخلوطة مع التربة.

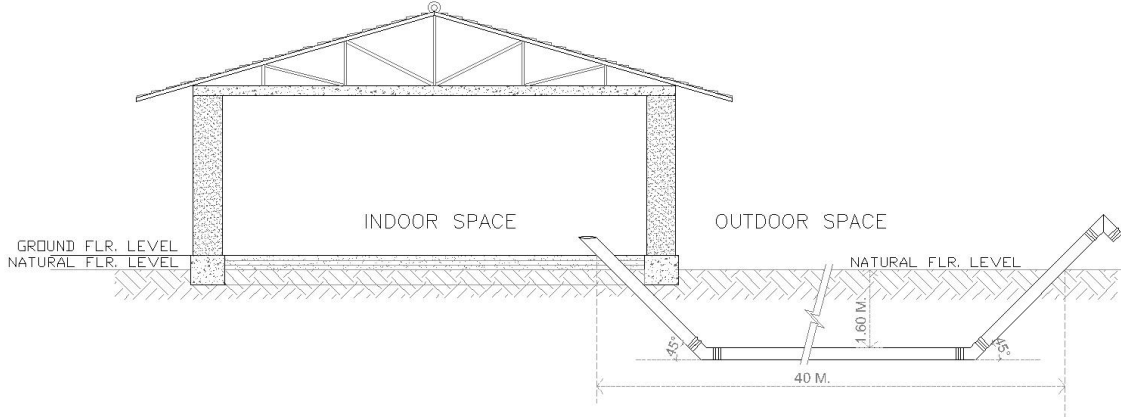
وبعد الانتهاء من الجسر الرابط تمت إضافة السقف للمبنى، والذي يتكون من هيكل معدني يحمل ألواحاً خشبية تم عزلها مائياً، وبعد ذلك تم إضافة طبقة عازل حراري، ثم تم تثبيت بلاط قرميد طيني يمثل الشكل النهائي للسقف. ويتم تثبيت القرميد الطيني بمسامير فوق أنابيب معدنية يتم ربطها بالهيكل المعدني للسقف. وتظهر الصورة التالية شكل المبنى بعد الانتهاء من تركيب السقف والشبايك. وبناء على هذه التجربة وفي غياب مواصفات سعودية للبناء بالتربة المدكوكة فإن الباحث يقترح أن يتم اعتماد ٦, ٠ ميغا باسكال كأقل قوة انضغاطية

وقد تمت جميع عمليات الدك للحوائط بدكاكات حديدية وبطريقة يدوية، كما أن جميع القوالب والدكاكات تم تصنيعها محلياً. وقد استغرقت عملية بناء الحوائط حوالي شهرين، وتمت في وقت اعتدال الجو في خريف ٢٠١٧. وتم فك القوالب بعد الدك بحوالي ٢٤ ساعة وحدثت أمطار قبل فك القوالب وبعده ولم تؤثر كثيراً على الحوائط. وكانت نسبة ليست قليلة من وقت البناء تستهلك في تركيب ووزن القوالب والتحقق من ملاءمتها وتوازنها. وقد تم هدم جزء من حائط وإعادة بنائه بسبب عدم وقوفه عمودياً على القاعدة الشريطية. وتم إلصاق الحائط الجديد بالقديم (بعد ترطيب الأخير) وبنائه وظهر بشكل جيد ومتماسك.

وبعد الانتهاء من الحوائط فإنه من الضروري إضافة جسر رابط فوق تلك الحوائط



الشكل رقم (١٩). يتضح في الصور مدخل الهواء ثم مروره تحت الأرض ٤٠ متراً وبعمق ١, ٦٠ م؛ ليدخل المبنى في النهاية من تحت الأرض ثم خروجه داخل البيت مع تثبيت أجهزة قياس الحرارة لقياس حرارة الهواء على عمق ١, ٦٠ م وعند خروجه من فوهة الأنبوب. لاحظ أن مدخل الهواء ومخرجه محميان من خلال منخل معدني صغير لمنع دخول الحشرات والحيوانات الصغيرة.



الشكل رقم (٢٠). قطاع يوضح كيفية دخول الأنبوب الترابي إلى المبنى مع مراعاة أن الشكل بدون مقياس رسم.

لقد تم اختبار التبريد لهذه الأنابيب طوال صيف عام ١٤٤١ هجرية (يونيو إلى أغسطس ٢٠٢٠). وقد تم عمل العديد من القياسات لدرجة حرارة الهواء الداخلة والخارجة من الأنبوب، وكانت الفروقات تقريباً في حدود ١٠ درجات. فعلى سبيل المثال: عندما تكون درجة حرارة الهواء الخارجي ٤٤ درجة مئوية فإن الهواء الخارج من الأنبوب (الداخل إلى المبنى) وبعد مروره مسافة ٤٠ م تحت أرض مزروعة وبعمق ١,٦ م تنخفض درجة حرارته بـ ١٠ تقريباً درجات لتصبح ٣٤ درجة مئوية. إلا أن ذلك غير كاف لتبريد فراغ مساحته حوالي ٩٠ م<sup>٢</sup> وارتفاعه أكثر من ٤ أمتار، بالإضافة إلى أن تلك الدرجة ليست ضمن نطاق راحة الإنسان، وتدفق الهواء ليس بالدرجة الكافية لتبريد ذلك الفراغ (على الرغم من استخدام مروحة شفط في فترات متعدده عند مدخل الهواء). وقد تم وضع وعاء فيه ماء أمام مدخل الهواء للأنبوب الترابي

للحوائط الترابية غير المعالجة، مع أهمية إدراك أن ذلك غير مناسب للمناطق التي فيها زلازل ما لم يتم اتخاذ المعالجات الخاصة بذلك. أما بالنسبة للتربة المعالجة بالمشبتات فيفترض ان تكون أعلى من ذلك بكثير.

أما بالنسبة للحوائط المعالجة كالمثبتة بالأسمنت أو الجير أو غيرها من المواد التي خلطها بطريقة مهنية واحترافية مع تربة مناسبة؛ فالأفضل أن لا تقل قوة الانضغاط Compression Strength عن ٢ ميغاباسكال.

#### ٩. التبريد من خلال أنبوب تحت الأرض Earth Tube Cooling

تم حفر خندق بعمق حوالي ١,٦٠ سم من أجل أن يمر فيه أنبوب بقطر ٢٥٠ ملم؛ لغرض تبريد المبنى بطريقة طبيعية. وقد كان طول الجزء المغطى من ذلك الأنبوب بالتراب حوالي ٤٠ متراً.



وبقوالب خشبية ودكاكات حديدية مصنعة محلياً. وقد تمت حماية أسفل الحوائط بإنشائها فوق قاعدة شريطية خرسانية، كما تمت حماية الجدران من الأمطار ببروز سقفي مناسب، وعلى الرغم من كونها تجربة جديدة إلا أن المبنى في وضع جيد ومناسب ومحافظ على تماسكه، على الرغم من عدم استخدام الأسمنت كمثبت في الحوائط. كما اتضح من التجربة أن نوعية التربة وتدرجها وطريقة الخلط وطريقة الدك ونسبة الرطوبة هي أهم العناصر المؤثر في قوة الحائط الترابي وتماسكه. واتضح من تجارب لاحقة أن استخدام الجير بنسبة اعلى من نسبة الجبس كمثبت للحوائط يعطي نتائج أفضل. كما تمت محاولة تبريد المبنى بالأنايب المدفونة تحت الأرض، وكان هنالك فرق في حدود ١٠ درجات لكنه لم يكن كافياً ومناسباً لراحة الإنسان، خاصة إذا كانت درجة الحرارة الخارجية تفوق منتصف الثلاثينيات المتوية.

## ١١. المراجع

### English References

- Easton, D.** The Rammed Earth House, Chelsea Green Publishing Company, 2007
- Holmes S. & Wingate M.** Buidling With Lime: A Practical Introduction, Practical Action Publishing 2003 (Reprinted 2013, 2019).
- Kapfinger O. & Sauer M., Martin Rauch:** Refined Earth Construction & Design With Rammed Earth, Eprel Print GmbH, Immenstadt, 2015
- Keable Julian & Rowland,** Rammed Earth Struc-

لتحفيز دخول الهواء الرطب، والذي يفترض أن يفقد تلك الرطوبة أثناء قطعة مسافة الـ ٤٠ متراً تحت الأرض وهو ما يساهم في برودته بشكل أفضل.

وليس ضرورياً استخدام مروحة الشفط أو أي حلول ميكانيكية تعتمد على الطاقة المولدة. حيث يمكن للهواء أن يتحرك طبيعياً إذا تم تصميم مدخنة شمسية لسحب الهواء الحار من أعلى نقطة داخل الفراغ المراد تبريده، وإغلاق جميع المنافذ داخل ذلك الفراغ، بحيث يساهم ذلك في زيادة قوة سحب الهواء من الأنبوب الأرضي.

ويمكن القول: إن الأنايب الترابية مناسبة للتبريد إذا كانت الحرارة الخارجية لا تزيد عن منتصف الثلاثينات المتوية. أما في حالة درجات الحرارة العالية مثل الحالة في منطقة الرياض وما شابهها فإن الأنايب الترابية يمكن استخدامها لنشاطات عديدة لا تتطلب تخفيضاً عالياً في درجات الحرارة مثل البيوت المحمية وما يشابهها من نشاطات أخرى. ويمكن أيضاً التبريد على مراحل بحيث يتم إعادة تبريد الهواء الخارج من الأرض بوسائل تقنية أخرى لتخفيض حرارته إلى درجات أقل.

## ١٠. الخلاصة

استعرض هذا البحث فكرة البناء بالتربة الطبيعية من خلال الدك بالقوالب Rammed Earth، حيث قام الباحث ببناء مبنى بهذه الطريقة

tures A Code of Practice, Practical Action Publishing Ltd, Uk, Second Edition 2011.

**Krahn, T.** Rammed Earth Construction, New Society Publisher 2019

**Isik, Bilge,** Earthen Architecture: Experiences in Gypsum Stabilization – Alker, I.T.U Mimarlik Facultesi, 2008.

**Minke G.,** Building With Earth, Birkhauser Verlag GmbH, Basel, Switzerland, 2013.

**Morris, H. etal.** Engineering Design of Earth Buildings, NZS 4297, 1998.

**Walker P. , Keable R. , Martin J., Maniatidis V.,** Rammed Earth Design and Construction Guidelines, BRE Bookshop, UK, 2005

**Brief Article (Non-Refereed)****Planning & Building with Natural Materials: Building with  
Rammed Earth****Khalid Alskait***Professor**College of Architecture and planning, King Saud University, Kingdom of Saudi Arabia.**kalskait@ksu.edu.sa*

Received 6/4/2020; accepted for publication 10/9/2020

**Abstract.** Rammed Earth is a suitable technique for building in desert climate. Thick walls regulate the interior space of the building. A building of an area of about 90 square meters was built of rammed earth in Banban, north of Riyadh. Moist soil is rammed manually in wooden forms. Small percentage of gypsum and lime was used as stabilizer. Compressive strength of samples was around 1 Mpa. Earth tube was used to cool the building. The tube is 1.6 m under the ground and runs for 40 m with diameter of 0.25 m. The air coming out of the tube is about 10 degrees less than that of the outside ambient temperature.

**Key words:** Rammed Earth, Earth Wall Compression Strength, Earth Tubes Cooling, Desert Building, Thermal Mass, Thermal Insulation.