

## تحسين قابلية الخرسانة على العزل الحراري في درجات الحرارة العالية بأضافة مواد نانوية

دكتور وائل نور الدين الرفاعي\*، دكتور فياض محمد عبد\*،\*\* م . ر . مهندسين محمد سليمان محمد الجبوري  
\* جامعة تكريت – كلية الهندسة،\*\* وزارة النفط – شركة مصافي الشمال

### الخلاصة

يتضمن هذا البحث دراسة عملية لمدى تأثير اضافة مواد نانوية ( غبار السيلكا النانوي والميتاكاؤولين النانوي) على قابلية الخرسانة للعزل الحراري في درجات الحرارة العالية مع تحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة بأضافة تلك المواد النانوية ، اي الحصول على خرسانة ذات قابلية جيدة في العزل الحراري مع خواص ميكانيكية جيدة وهو نوع جديد من الخرسانة يختلف عن الخرسانة الخفيفة الوزن او الخرسانة التقليدية وبذلك يمكن الاستفادة من التحسينات التي تحدثها المواد النانوية على الخرسانة والمونة السمنية من ناحية العزل الحراري في المنشآت الحرارية والافران والمراجل من أجل الحصول على مواد عازلة جديدة ويمكن للقطاع النفطي والصناعي الاستفادة منها.

تم في هذا البحث اضافة المواد النانوية الى الخرسانة بنسب وزنية مختلفة من وزن السمنت كما تم استخدام ملدن فائق لغرض المحافظة على قابلية تشغيل جيدة مع عدم تغيير المحتوى المائي للخلطات الخرسانية مع اضافة نسبة من الياف الكربون المقطع ، تم إجراء فحص مقاومة الانضغاط ومعايير الكسر لمكعبات ومواسير الخرسانة النانوية قبل وبعد تعرضها لدرجات حرارة مختلفة تراوحت بين ( 25 – 750 درجة مئوية ) ولمدة ساعتين لبيان تأثير درجات الحرارة العالية على الخواص الميكانيكية للخرسانة النانوية .

كما تم ايجاد معامل التوصيل الحراري للخرسانة النانوية المسلحة بمشبك الياف الزجاج (مشبك تسليج) (Fiberglass mesh) حيث اظهرت النتائج بصورة عامة تحسن كبير في قابلية الخرسانة على العزل الحراري .

**الكلمات الدالة :** الخرسانة النانوية ، العزل الحراري ، الميتاكاؤولين النانوي ، غبار السيلكا النانوي ، الموصلية الحرارية ، درجات الحرارة العالية .

### مقدمة

أن أول من قدم تكنولوجيا النانو هو عالم الفيزياء الحائز على جائزة نوبل ( ريتشارد فاينمان ) في محاضراته المعروفة في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في عام 1959 عندما قال ( يوجد الكثير من الأشياء في الأسفل) واقترح أيضا ( ماذا سيحدث لو أننا يمكن أن نرتب الذرات واحدة تلو الأخرى على الطريقة التي نريد لها ؟) ومنذ ذلك الحين بدأت العديد من مجالات العلم اعتماد تكنولوجيا النانو في الاختراعات والتحسينات. أن تكنولوجيا النانو لها آثار كبيرة على نطاق واسع من العلوم والصناعة والسبب الرئيسي وراء انتشار تكنولوجيا النانو هي أنها توفر تحسنا لموثوقية المنتجات وتوسع وتضيف تطبيقات ووظائف خارج التطبيقات والوظائف التقليدية وتقليل التكلفة والحجم واستهلاك الطاقة كما أن دمج تكنولوجيا النانو في مجال المواد يسهل زيادة متانة المواد ويوفر المواد مع أداء فائق لها واستخدام أفضل للموارد الطبيعية والحصول على خصائص

المواد المطلوبة مع الحد الأدنى من الاستخدام [1].

وهذا ما دفع الكثير من المهندسين إلى اعتماد تكنولوجيا النانو التي تمكنهم من تقديم الحل الرائد لمشاكل معقدة في الابنية والمنشآت ومن المعلوم أن المواد هي العناصر الأساسية لصناعة البناء والتشييد وهذه المواد يمكن تطويرها باستخدام تكنولوجيا النانو وعلى الرغم من أن ارتفاع أسعار مواد النانو حالياً والتي يمكن أن تعرقل سعة تطبيقها في الفترة الحالية ومن المتوقع أن هذه الأسعار ستخفض في المستقبل القريب [2].

علم النانو في الخرسانة يعني دراسة توصيف هيكل الخرسانة النانوي والتعرف بشكل أفضل على تأثير ذلك في الخواص الانشائية للخرسانة واستخدام تقنيات جديدة والنمذجة على المستوى الجزيئي والاستفادة من الهيكل في مقياس النانو لتوفير مواد جديدة ذات خصائص تختلف عن الخصائص التقليدية [3].

أن جزيئات النانو لديها مساحة سطحية كبيرة بالنسبة الى حجمها وان الحجم الصغير للمواد النانوية يعطيها خصائص إضافية بالمقارنة مع المواد العادية وهذا هو السبب في جذب الانتباه لاستخدامها في إنتاج مواد جديدة ذات خصائص جديدة ومتطورة ، أن مواد النانو يمكن وصفها بأنها المواد التي لها بعد واحد على الأقل بين (1-100) نانومتر (ASTM E2456).

وعلى الرغم من الفائدة الكبيرة من استخدام الجزيئات النانوية ولكن هناك عوائق قد تحدث من جراء استخدام هذه الجزيئات واحدى هذه العوائق هو التجميع الذاتي للجزيئات النانوية عند مزجها في الخرسانة مما قد يؤدي الى التقليل من فوائد حجم الجسيمات الصغيرة من المواد النانوية في المزيج الخرساني [2].

وبما ان السمنت هو من مواد البناء الأكثر أهمية كما أنه أحد أكثر المواد المنتجة في القرن 21 حيث في عام 2010 كان هناك ما يقرب من 2 مليار طن من السمنت المصنوع في جميع أنحاء العالم ، أن إنتاج كميات كبيرة من السمنت اليورتلاندي أدى إلى تحرير كمية كبيرة من ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) وغيره من الغازات الاخرى التي تسبب ظاهرة الاحتباس الحراري مما دفع العلماء والباحثين الى البحث في تقليل كمية السمنت عن طريق تحسين مواصفات السمنت او اضافة مواصفات اخرى عن طريق اضافة مواد محسنة لصفات الكونكريت وبالتالي الاستغناء عن قسم من السمنت المستخدم في الخرسانة بسبب أن التحسينات ادت الى جعل الخرسانة بمواصفات افضل واقل استخداما للسمنت او تقليل كميته ومن تلك التحسينات او المواد المضافة هو اضافة مواد نانوية الى مونة السمنت او الخرسانة من اجل تحسين صفات الخرسانة والمونة السمنتية او الحصول على مواصفات جديدة للمونة السمنتية والخرسانة ، ومن المعلوم ان الخرسانة ذات موصلية حرارية عالية اي انها غير جيدة في العزل الحراري وكذلك مقاومتها للحرق تقل بمرور الزمن ومع طول فترة التعرض للحرق .

ولما كان موضوع البحث هو إيجاد مواد عازلة حرارياً وذات مواصفات ميكانيكية جيدة لذلك تم اضافة المواد النانوية وهي الميٹاکاؤلین النانوي ( من مصادر طبيعية محلية ) وغبار السيلكا النانوي والياف الكربون الى الخلطة السمنتية مع تسليح الواح العزل بمشبيكات الياف الزجاج للاستفادة من التحسينات التي تحدثها المواد النانوية على الخرسانة والمونة السمنتية من ناحية العزل الحراري في المنشآت الحرارية والافران والمراجل من أجل الحصول على مواد عازلة جديدة ويمكن للقطاع النفطي والصناعي الاستفادة منها.

تم في السنوات الاخيرة إجراء دراسات وبحوث لتحسين قابلية الخرسانة على العزل الحراري وذلك بأنتاج خرسانة خفيفة الوزن ذات مقاومة انضغاط قليلة على اعتبار ان تقليل الكثافة للخرسانة هو احد اساليب العزل الحراري ، منها ما قامت به الجيلوي [4] عن طريق دراسة خصائص الخرسانة خفيفة الوزن من ناحية العزل

الحراري والمعاقبة الصوتية حيث اشارت الى وجود زيادة ملحوظة في قيم العزل الحراري للخرسانة خفيفة الوزن نتيجة انخفاض كثافتها وان هناك تناسب عكسي ما بين كثافة الخرسانة والعزل الحراري لها .  
أشار الاسدي [5] الى امكانية انتاج بلاطات خرسانية ذات عزل جيد للحرارة تستخدم في اعمال التسطيح لسطوح المنازل والمنشآت والتي لا تتطلب مقاومة انضغاط عالية مما يساهم في الحد من هذه المشكلة بشكل كبير على اعتبار ان القسم الاكبر من الحرارة في المنازل تأتي من خلال سقوف الابنية .

أما عبدالله واخرون [6] فقد قاموا بدراسة تأثير اضافة نشارة الخشب المعالجة بالدملك والغير المعالجة على خصائص مونة السمنت وخصائص السقوف الفيروسمنتية تحت تأثير الاحمال الساكنة والحركية حيث تم اضافة نشارة الخشب بنسب مختلفة ( 10 - 50 % ) من حجم الركام الناعم الى مونة السمنت وقام الباحثون باجراء فحص مقاومة الانضغاط ومعايير الكسر لمكعبات ومواشير مونة السمنت كما تم حساب معامل التوصيل الحراري لمونة السمنت النشارية ، وقد اظهرت النتائج تحسن كبير لاداء الخلطات المستخدمة من ناحية العزل الحراري حيث تراوحت قيم الموصلية الحرارية ( من 0.54 الى 0.31 واط/(م.كلفن)) لنسب الخلط التي تم اضافة نشارة الخشب اليها بينما كانت قيمة الموصلية الحرارية للخلطة المرجعية بدون اضافة نشارة الخشب اليها (0.65 واط/(م.كلفن)) وهذا يعني تحسن كبير في اداء الخلطات للعزل الحراري وبنسبة تتراوح (17- 52%) وان افضل نسبة اضافة لنشارة الخشب هي (30%) والتي اعطت مقاومة انضغاط عالية وموصلية حرارية منخفضة حيث كانت قيمة الموصلية الحرارية عندها هي (0.38 واط/(م.كلفن)) وقيمة مقاومة الانضغاط جيدة.

كما قام العديد من الباحثين بدراسة تأثير اضافة المواد النانوية الى الخرسانة لتحسين خواصها الميكانيكية حيث قام ( M. S. Morsy, S. H. Alsayed and M. Aqel ) [7] بدراسة الخواص الميكانيكية والمجهريه لمونة الاسمنت بعد اضافة الميناكاؤولين النانوي وبنسب أحلال مختلفة من وزن السمنت بحدود ( 0% - 8% ) الى الخلطات السمنتية وقد وجدوا بان اضافة الميناكاؤولين النانوي الى المونة السمنتية تحسن الخواص الميكانيكية للخلطة السمنتية حيث باضافة (8%) نانوميكاؤولين الى الخلطة السمنتية فان مقاومة الانضغاط تزداد بحدود ( 7% ) عن مقاومة الانضغاط في الخلطة المرجعية وكذلك تزداد مقاومة المونة السمنتية للشد بحدود (49%) عن مقاومة الشد في الخلطة المرجعية عند اضافة (8%) من النانوميكاؤولين الى الخلطة السمنتية وقد حصل الباحثين على الميناكاؤولين النانوي وذلك بحرق الكاؤولين بدرجة حرارة ( 750 درجة مئوية ) ولمدة ساعتين حيث يتحول الكاؤولين الى الميناكاؤولين النانوي.

واثبت (Li واخرون) [8] أن إضافة الجزيئات النانوية لمونة السمنت يزيد من مقاومة الانضغاط والانحناء ويعزز الخواص الميكانيكية بشكل عام وبالإضافة إلى ذلك فقد وجد في هذه الدراسة أن جزيئات النانوهي أكثر فعالية من غبار السيليكا في زيادة القوة كما ثبت بالتجربة أن إضافة النانو (SiO<sub>2</sub>) ونانو (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) معا يعطي نتائج أفضل في قوة الانضغاط من إضافة كل واحد منهم على حدة كما اشار الباحثون ان اضافة المواد النانوية الى الخرسانة سوف تحسن الخواص الميكانيكية اكثر من التحسين في الخواص الميكانيكية لمونة السمنت ولذلك لان المواد النانوية تزيد من الترابط بين عجينة السمنت والركام وبذلك نستطيع الحصول على خرسانة عالية الاداء .

قام (Porro واخرون) [9] بدراسة مقارنة بين السيليكا النانوية والسيليكا متناهية الصغر وذكروا أن السيليكا النانوية هي أكثر فعالية من السيليكا متناهية الصغر في تحسين الخواص الميكانيكية وزيادة مقاومة الانضغاط

عندما تضاف إلى الخلطة السمنتية وعلاوة على ذلك فإنهم وصلوا إلى استنتاج مفاده أن التفاعل وانتاج الجل الاسمطي في الخلطة السمنتية للسيليكا النانوية يعطي نتائج أفضل من السيليكا المتناهية الصغر. كما قام الباحث (Green B.) [10] بدراسة اضافة السيليكا النانوية الى مسحوق الصخور المستخدم للتحشية (Rock Matching Grout RMG) حيث اكتشف ان اضافة السيليكا النانوية الى ركام مسحوق الصخور يزيد من كثافة المزيج ويزيد لزوجته من دون ان يحصل فصل في الركام الناعم واطاف انه من دون اضافة السيليكا النانوية الى ركام مسحوق الصخور سوف لن نحصل على سهولة الضخ والتشكيل والخواص الميكانيكية الاخرى للخلطة.

أجرى الباحثون (Jo وآخرون) [11] بدراسة عملية لاضافة جزيئات من النانو سيلكا الى عجينة السمنت وقد لاحظوا بان اضافة النانو سيلكا الى عجينة السمنت يولد درجة حرارة اكثر من درجة الحرارة الطبيعية في التفاعل الكيميائي وان هذه الحرارة تزداد مع الوقت لذلك خلصوا ان اضافة جزيئات النانو سيلكا الى العجينة السمنتية تحتاج الى اضافة كمية كبيرة من الملدن الفائق لكي يؤخر زمن التجمد الابتدائي للسمنت ويقلل تأثير الحرارة المتولدة من اضافة النانو سيلكا الى العجينة السمنتية وبذلك يعطي وقتا اكثر لكي تتفاعل المواد البوزولانية في العجينة السمنتية بشكل جيد واكثر فعالية وبالتالي تزداد مقاومة العجينة السمنتية بسبب ان المواد النانوية الناعمة تتفاعل وتتغلغل في المسامات الصغيرة الحجم وبذلك يمكن انتاج الخرسانة العالية الاداء بهذه الطريقة اي باضافة النانو سيلكا الى الخلطة الخرسانية .

كما قام حسن [12] بدراسة مختبرية لمعرفة إمكانية الاستفادة من إضافة شرائح ألياف الكربون (CFRP) الى الخلطة الخرسانية في تقليل التوصيلية الحرارية الإجمالية للخرسانة وبالتالي تقليل الحرارة المنقلة خلال تراكيب وعناصر الأبنية، مما يؤدي إلى زيادة العزل الحراري وتقليل الطاقة الكهربائية المستهلكة لتشغيل أجهزة التكيف وقد اوجد الباحث أن مقاومة الإنضغاط للمكعبات عند إضافة ألياف الكربون سوف تقل تدريجيًا عن مقاومة الإنضغاط لمكعبات الخرسانة المرجعية وهذا بسبب وجود مادة ألياف الكربون التي تمتلك كثافة أقل من باقي مكونات الخرسانة مما يؤدي إلى إضعاف الخرسانة والتقليل من تماسك مكوناتها وبالتالي تقليل مقاومتها للإنضغاط وان وجود الياف الكربون في الخلطة قد حسن العزل الحراري للخلطات .

أجرى (Carino and Phan) [13] دراسة مقارنة ما بين خلطة خرسانية إعتيادية المقاومة وخلطة خرسانية عالية المقاومة تحت تأثير مستويات مختلفة من درجات الحرارة إذ أن الفرق الواضح في سلوك الخلطتين يظهر ضمن المدى (20 – 400 درجة مئوية) فالخرسانة عالية المقاومة تفقد من مقاومتها ضمن هذا المدى أكثر مما هو عليه في الخرسانة إعتيادية المقاومة، كما وجد الباحثان أن الخرسانة عالية المقاومة معرضة للتشطي المتفجر (Explosive Spalling) عند تجاوز درجة الحرارة (300 درجة مئوية) وأن معامل المرونة يسلك سلوكا مشابها للمقاومة عند ارتفاع درجة الحرارة، لكن الخرسانة عالية المقاومة ذات الركام خفيف الوزن تحتفظ بنسبة أعلى من معامل مرونتها أكثر مما هو عليه في الخرسانة عالية المقاومة ذات الركام الاعتيادي.

قام (Bagel and Janotka) [14] بدراسة حول الهيكل المسامي (Pore Structure) ومعامل النفاذية ومقاومة الانضغاط لخرسانة معرضة للتسخين الى درجة حرارة (800 درجة مئوية) إذ أنه لم تلاحظ أي تغيرات في الخواص المذكورة عند التسخين الى درجة حرارة (400 درجة مئوية) وعندما تكون درجة حرارة التسخين ضمن المدى (400 – 800 درجة مئوية) فإن الهيكل المسامي يتأثر بوضوح مما يؤدي إلى تناقص

المقاومة أما معامل النفاذية فإن قيمته عند الخرسانة المعرضة الى درجة حرارة (400 درجة مئوية ) أعلى مما هي عليه عند الخرسانة المعرضة لدرجة حرارة المختبر. قام ( Sultan and Kodur ) [15] بدراسة الخصائص الحرارية لخرسانة عالية المقاومة فقد تم تثبيت عدد من العلاقات الرياضية كدالة لدرجة الحرارة حيث إن الخصائص التي تطرق إليها الباحثان هي الموصلية الحرارية ( Thermal Conductivity ) والحرارة النوعية ( Specific Heat ) والتمدد الحراري ( Thermal Expansion ) وفقدان الوزن للخرسانة حيث تم أخذ أربع خلطات خرسانية هي خلطة خرسانية إعتيادية حاوية على ركام سيليكوني واخرى حاوية على ركام كربوني وخلطة خرسانية مسلحة بالالياف الفولاذية وحاوية على ركام سيليكوني ومثلها أيضا حاوية على ركام كربوني وقد تم دراسة تأثير درجات الحرارة ضمن المدى (0- 1000 درجة مئوية ) وقد وجد أن نوع الركام يؤثر على الخصائص الحرارية للخرسانة عالية المقاومة بينما وجود الالياف الفولاذية يؤثر بشكل محدود جدا على الخصائص الحرارية. مما تقدم اعلاه يتبين وعلى حد معرفة الباحثين عدم وجود بحوث او دراسات حول إضافة مواد نانوية الى الخرسانة او المونة السمنتية لتحسين قابليتها على العزل الحراري او الحصول على خرسانة نانوية ذات عزل حراري جيد وتحمل لدرجات الحرارة العالية وبمواصفات ميكانيكية جيدة.

### الجانب العملي

تم في هذا البحث استخدام ركام ناعم نهري من مقالع مدينة بيجي ومن ثم تم نخله على منخل رقم (No.50=300  $\mu\text{m}$ ) وغسلة بالماء على المنخل (No.200=75  $\mu\text{m}$ ) مع سمنت فائق النعومة عراقي المنشأ من معمل حمام العليل – الشركة العامة للسمنت الشمالية وبنسبة خلط (1:1.5) أما المواد النانوية والياف الكربون المقطعة فقد تم اضافتها بنسب مختلفة للتعرف على تأثيرها على الموصلية الحرارية للخرسانة النانوية والجدول (1) يبين تفاصيل الخلطات المستخدمة ونسبة كل مادة فيها ، بالإضافة الى ذلك فقد تم استخدام الملدن الفائق بنسبة (5.5%) من وزن المواد السمنتية وذلك للمحافظة على قابلية تشغيل جيدة للخرسانة النانوية وذلك لتأثرها السلبي بوجود المواد الناعمة النانوية .

### مواصفات المواد المستخدمة

**السمنت :** تم استخدام سمنت فائق النعومة عراقي محلي الصنع ، والمنتج في الشركة العامة للسمنت الشمالية – نينوى / معمل سمنت حمام العليل ، وحسب المواصفة القياسية العراقية المرقمة (I.Q.S No.5 1984) وخصائص السمنت الفيزيائية والكيميائية ومقارنتها مع المواصفات القياسية العراقية مبينة في الجدول (2).

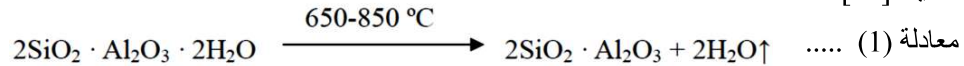
**الرمل :** تم استخدام الرمل النهري من منطقة بيجي – محافظة صلاح الدين في كافة مراحل البحث وتم اجراء الفحوصات المختبرية والتحليل المنخلي للرمل وحسب المواصفة (ASTM C33-10) بعد ذلك قمنا بنخل الرمل على المنخل (No.50=300  $\mu\text{m}$ ) وغسلة بالماء على المنخل (No.200=75  $\mu\text{m}$ ) للحصول على رمل ناعم بتدرج (300-75  $\mu\text{m}$ ) وخالي من المواد الطينية واستخدامه في جميع الخلطات للبحث والجدول (3) يبين نتائج التحليل المنخلي والمواصفات الفيزيائية والكيميائية للرمل المستخدم في البحث.

**الملدن الفائق (Super Plasticizer) :** الملدن الفائق المستخدم في هذا البحث هو الملدن الفائق ( TuffFlow )

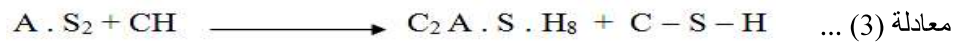
والمنتج من قبل شركة (Tuf Bond Chemicals) وهو ملدن خال من الكلوريدات يتكون اساسا من السولفونيت نفتالين مع مضافات اخرى ومصمم لغرض التقليل الامثل لماء الخلطة دون التأثير على زمن التصلب الابتدائي بالتوازي مع الحفاظ على قابلية التشغيل للخرسانة والغرض من استخدام الملدن الفائق هو للمحافظة على قابلية تشغيل متساوية تقريبا لجميع الخلطات مع عدم تغيير نسبة الماء في الخلطة وهو مطابق للمواصفة (ASTM C494) والسولفونيت نفتالين ذات تأثير جيد جدا على قابلية التشغيل في حالة استخدام الركام الناعم او المهشم دون ان تتأثر نسبة الماء / المواد السمنتية (w/c) [16] والجدول (4) يبين مواصفات الملدن الفائق .

**السيكا النانوية (Fumed silica)** وهي عبارة عن مسحوق ابيض منتفش ذات نعومة عالية جدا ومساحة سطحية كبيرة وتنتج السيلكا النانوية من تكثيف الابخرة المتصاعدة عند احتراق رابع كلوريد السيلكون ووجود الاوكسجين والهيدروجين في معامل انتاج السيلكون والمعادن السيلكونية والجدول (5) والشكل (1) يبينان مواصفات السيلكا النانوية وشكلها [17][18][19].

**الميتاكاؤولين النانوي (Nano Metakaolin)** تم استخدام الكاؤولين المتوفر محليا من المنطقة الغربية - محافظة الرمادي والمجهز من معمل المواد الحرارية بالقرب من مدينة الفلوجة وهو مسحوق ناعم جدا ولونه مائل الى اللون البرتقالي وقد تم حرقه بفرن كهربائي مختبري ( في قسم المحبرات/ شركة مصافي الشمال - بيجي) وبدرجة حرارة ( 750 درجة مئوية ) وبمعدل ارتفاع درجة الحرارة (5-8 درجة/دقيقة ) وابقاء النموذج في الفرن بعد ثبات درجة الحرارة على ( 750 درجة مئوية ) لمدة ساعتين حيث انه عند حرق الكاؤولين بدرجة حرارة بحدود ( 650 - 850 درجة مئوية ) يتحول الى مادة بوزولانية فعالة ونتيجة للتغيير الكيميائي الحاصل بفقدان جزيئات الماء في تركيبته يتحول إلى مركب آخر يطلق عليه ( الميتاكاؤولين ) وحسب المعادلة الكيميائية التالية: [20]



وعند اضافة الميتاكاؤولين الى الخرسانة يتفاعل الميتاكاؤولين مع هيدروكسيد الكالسيوم (Ca(OH)<sub>2</sub>) المتحرر نتيجة اماهة مركبات السمنت الرئيسية مكونا مركبات سمنتية جديدة التي تعطي قوة اضافية مع دعم لديمومة الخرسانة وتقادي خروج هيدروكسيد الكالسيوم القابلة للذوبان من المونة الاسمنتية أو من خلال تعزيز البنية للخرسانة وهذا يؤدي إلى تكوين بنية مجهرية ذات نفاذية قليلة مما ينعكس بشكل ايجابي على زيادة ديمومة المونة أو الخرسانة الناتجة كما هو موضح في المعادلتين :



الميتاكاؤولين

إن تحديد درجة حرارة الحرق اعتمد على ما جاء في البحوث السابقة إذ أشارت البحوث السابقة إلى أن الفعالية البوزولانية للميتاكاؤولين تقل بازدياد درجة حرارة الحرق أو مدة الحرق أو كليهما في الوقت نفسه ومن معادلة تفعيل الكاؤولين بالحرق فإن زيادة درجة حرارة ومدة الحرق تزيد من تحلل الكاؤولين إلى أكاسيده وبالتالي زيادة

نعومة الناتج النهائي ، وهو ما تم اعتماده في بحثنا ، لذلك أعتدت درجة حرارة ومدة الحرق على غرار ما جاء في المصادر [21][22][23] كما تم اجراء الفحوصات والتحليل الكيماوية على نماذج الميتاكاؤولين قبل وبعد الحرق في مختبرات معمل سمنت حمام العليل – نينوى والجدول (6) والجدول (7) والشكل (2) مبين فيها خواص الكاؤولين والميتاكاؤولين وشكلهما.

**غبار السيليكا المايكرو (Microsilica fume)** غبار السيليكا المستخدم في هذا البحث هو مايكرو سيليك (micro silica) نوع (MEYCO® MS610) حيث تنتج المايكرو سيليك كنتاج عرضي من صناعة السيليكون، وهي انعم بمائة مرة من السمنت البورتلاندي وعندما تستخدم في الخرسانة تستخدم كمادة مألثة (filler) ومادة اسمنتية ، حيث ان الدقائق الصغيرة للمايكرو سيليك تملأ الفراغات بين دقائق السمنت وبين السمنت والركام ، وتتفاعل المايكرو سيليك كذلك مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج من عملية اماهة السمنت لتشكيل سيليكات كالسيوم اضافية خلال التفاعل ، وبالتالي تنتج خرسانة اكدف واقرى واقل نفاذية [24][25].

المايكرو سيليك نوع خاص من غبار السيليكا ذو جودة عالية، ويجهز بأكياس وزنها (20كغم)، ومعتمد كمضاف للخرسانة حسب المواصفة الاميركية (ASTM C1240-03) [26] والجدول (8) يبين المواصفات الكيماوية والفعالية البوزولانية لغبار السيليكا المايكرو.

**الياف الكربون المقطعة (المتشظية) (Chopped Carbon Fiber)** تم اضافة الياف الكربون المقطعة (CFRP) الى الخلطة الخرسانية وذلك لغرض اعاقه الحرارة المنتقلة خلال الخرسانة وبالتالي تقليل الموصلية الحرارية للخرسانة وزيادة العزل الحراري [12] وبما أن إضافة شرائح الياف الكربون إلى الخلطة الخرسانية سوف يحسن من خواصها في مقاومة الشد والشقوق والتصدعات لذلك فان تلك الصفات مفيدة في مقاومة تأثير الحرارة على الخرسانة وهذا هو السبب لاستخدام الالياف في الخلطات السمنتية لهذا البحث [27] والياف الكربون المستخدمة هي من أنتاج شركة (SIKA) نوع (Sika Wrap Hex-230c) وهو على شكل شعيرات مقطعة ذات لون اسود والجدول (9) والشكل (3) يبينان مواصفات وشكل الياف الكربون المقطع.

**مشبك الياف الزجاج (مشبك تسليح) (Fiberglass mesh)** ويمكن تسميته في بعض الاحيان بـ (Glass fiber mesh) ويتكون من الياف زجاجية نوع (C-glass) او نوع (E-glass) بشكل اساسي تنسج هذه الالياف على شكل ضفائر مغزولة لتشكيل مشبك بفتحات مربعة الشكل وبطلي هذا النسيج بحوامض بوليمرية واكريليكية (acrylic acid copolymer liquid) ليعطي النسيج مقاومة جيدة جدا ضد الحوامض والقلويات والحرارة وتزداد مقاومته للشد والتماسك والمرونة وهو متوفر في الاسواق المحلية باللوان وقياسات مختلفة ويستخدم في مجالات كثيرة من أعمال الهندسة المدنية ومنها اعمال العزل الحراري [28] وقد تم استخدامه في البحث لمقاومته الجيدة لدرجات الحرارة ولزيادة قوة تماسك الخرسانة مع المحافظة على الوزن القليل مقارنة بوزن حديد التسليح وتقليل التشققات نتيجة التعرض لدرجات الحرارة العالية والجدول (10) والشكل (4) يبينان مواصفات وشكل الياف الزجاج.

**الفحوصات**

**مقاومة الانضغاط والانشاء** تم صب مكعبات الخرسانة النانوية بأبعاد (50×50×50mm) ومواشير الخرسانة النانوية بأبعاد (160×40×40mm) وذلك لغرض قياس مقاومة الانضغاط ومعايير الكسر ( Modulus of Rupture ) بعمر 28 يوما وعند تعرضها لدرجات حرارة تصل الى ( 750 درجة مئوية ) وبيان مدى تأثير المواد النانوية على الصفات الميكانيكية للخرسانة النانوية .

**قياس معامل التوصيل الحراري** ان من اهم جوانب هذا البحث يتمثل في قياس معامل التوصيل الحراري لنماذج من الخرسانة النانوية بأبعاد (30×30 سم ) وبسمك (3 سم ) وبالاعتماد على المواصفة القياسية الامريكية (ASTM C1058-03 and ASTM C177-10)[29] والجهاز المستخدم لقياس معامل التوصيل الحراري بطريقة الصفيحة الساخنة وهو عبارة عن صندوق من الالمنيوم على شكل متوازي الاضلاع بأبعاد(70×75×90 سم) من الخارج وبداخله صندوق من البليت الحديدي بأبعاد(30×30×30 سم ) مفتوح من الاعلى الى الهواء الطلق والمسافة بين الصندوق الخارجي والصندوق الداخلي معزولة بالصوف الزجاجي عزلا محكما ويحتوي على باب متحرك مكون من اطار من الحديد والبليت وبسمك (4 سم ) والداخل معزول بالصوف تاما ويستخدم هذا الباب وذلك لادخال العينات الى الجهاز والجهاز يتكون من مصدر فولتية متغير ( Auto transformer) ومقياس الفولتية (Digital Voltmeter) ومقياس التيار (Digital Ammeter) وسخان كهربائي (Heater) ومقياس حرارة رقمي (Digital Temperature measurement) ومفتاح كهربائي انتقائي (Selector Switch) ومزدوجات حرارية حساسة (Thermocouple type K) يوضع النموذج في المكان المخصص له على الصفيحة الساخنة ويتم تشغيل الجهاز والتحكم بمقدار الفولتية من خلال مصدر الفولتية المتغير والتيار المار بالسخان وتكون القراءة الاولى تبدأ ب(40 فولت) حيث نستطيع التحكم بالفولتية ونقوم باخذ القراءات كل ربع ساعة الى ان نصل الى حالة الاستقرار الحراري حيث يستغرق كل قراءة فولتية ما لا يقل عن ساعتين واذا كان كل نموذج يتم اخذ اربعة قراءات للفولتية(40، 45، 50، 55 فولت ) اي ان كل نموذج يحتاج الى ما لا يقل عن (9-10 ساعات ) في الجهاز ، حيث بعد ان يصل النموذج الى حالة الاستقرار الحراري تؤخذ قراءات الفولتية والتيار ودرجة الحرارة العظمى ( السخان ) ودرجة حرارة الصفيحة الساخنة ودرجة حرارة الوجه البارد للنموذج ودرجة حرارة الهواء لكل مرة ، بعدها يتم حساب معامل التوصيل الحراري (K) من خلال قانون فورير وكالاتي :

$$P = V \times I = K \times A (T_2 - T_1) / L$$

P: القدرة (واط)

V: الفولتية (فولت)

I: التيار (أمبير)

A: مساحة العينة العمودية على انتقال الحرارة (متر مربع)

T<sub>2</sub>: درجة حرارة الوجه الساخن للنموذج (درجة مئوية)

T<sub>1</sub>: درجة حرارة الوجه البارد للنموذج (درجة مئوية)

L: سمك النموذج (متر)



**خصائص نماذج الخرسانة النانوية المستخدمة في الدراسة وطريقة البحث**

تم صب نماذج على شكل سقفوف من الرمل ( المقاس الاقصى 300 مايكرون ) والسمنت فانق النوعمة بنسبة خلط ( 1:1.5 ) وبسبك ( 3 سم ) وبأبعاد ( 300 ملم × 300 ملم ) مسلحة بأربع طبقات من مشبك الياف الزجاج (Fiberglass mesh) تم تغيير نسب اضافة المواد النانوية الى الخلطة السمنتية وحسب الجدول رقم (1) وتم قياس مقاومة الانضغاط والانتشاء لمكعبات ومواسير مونة السمنت النانوية بعد تعرضها الى درجات الحرارة العالية والتي وصلت الى ( 1000 درجة مئوية ) ومقارنتها مع الخلطة المرجعية ، تم قياس الموصلية الحرارية للسقفوف المصنعة من مونة السمنت النانوية والمسلحة بمشبك الياف الزجاج بواسطة جهاز قياس الموصلية الحرارية شكل رقم (5) وتم اجراء مقارنة بين مقدار الموصلية الحرارية للخلطة المرجعية والموصلية الحرارية للخلطات التي تم اضافة مواد نانوية اليها وملاحظة التحسن في مقدار العزل الحراري والذي نتج من اضافة المواد النانوية الى الخلطة.

**النتائج والمناقشة****مقاومة الانتشاء والانضغاط لمونة السمنت النانوية**

تم قياس مقاومة الانضغاط والانتشاء لمكعبات ومواسير مونة السمنت النانوية والاشكال من (6) الى (9) تبين تأثير درجة الحرارة على مقاومة الانضغاط والانتشاء لنماذج مونة السمنت النانوية أظهرت النتائج حصول زيادة في مقاومة الانضغاط لجميع الخلطات تقريبا عند درجة الحرارة (250 – 500 درجة مئوية) مقارنة بمقاومة الانضغاط عند درجة حرارة المختبر ، بعدها تنخفض مقاومة الانضغاط عند درجات الحرارة المرتفعة(750-1000 درجة مئوية).

ان افضل النتائج لمقاومة الانضغاط كانت عند الخلطات (A3,A6,A9) وان تلك الخلطات تشترك بكون نسبة غبار السيليكا النانوية هي اعلى نسبة تم اضافتها الى الخلطات وهي (3%) من وزن السمنت لذلك يمكن القول بأن تلك النسبة هي النسبة المثلى التي اعطت نتائج جيدة لتحمل مقاومة الانضغاط لتأثير درجة الحرارة عند اضافتها مع المواد الاخرى الى مونة السمنت حيث أن زيادة غبار السيليكا النانوي في مونة السمنت الى هذا الحد ادت الى تحسين في مقاومة الانضغاط وبصورة عامة ان تأثير درجة الحرارة على مقاومة الانضغاط لمونة السمنت هو تأثير سلبي وهذا واضح من انخفاض مقاومة الانضغاط مع الزيادة في مقدار درجة الحرارة التي تتعرض اليها النماذج ، كذلك مقاومة الانضغاط عند نسبة (2.5%) من الميتاكاولين النانوي ونسبة (3%) من غبار السيليكا النانوي تعطي نتائج جيدة عند درجة الحرارة البالغة (250 درجة مئوية) ثم تنخفض عند زيادة نسبة الميتاكاولين النانوي الى (5%) وبنفس النسبة من غبار السيليكا النانوي ثم تعاود الارتفاع عندما تكون نسبة الميتاكاولين النانوي (7.5%) وبنفس النسبة من غبار السيليكا النانوية وهذا يعطي دلالة على ان النسبة المثلى للميتاكاولين النانوي عندما يتم اضافته الى الخلطة مع هذا المزيج يجب ان تكون نسبته بحدود (7.5%) ليعطي افضل النتائج حيث تبين بأن زيادة الميتاكاولين النانوي في الخلطة الى هذا الحد اعطت نتائج جيدة على مقاومة الانضغاط ويمكن ملاحظه هذه الحالة عند الخلطات (A3,A6,A9) كما لم يطرأ على الخلطات اي تحسن في مقاومة الانضغاط عند اضافة الياف الكربون المقطعة اليها بل على العكس اظهرت الخلطة المضاف اليها الياف

الكربون المقطعة تدني في مقاومة الانضغاط ولنفس المكونات عند اضافة الياف الكربون المقطعة وعليه يمكن القول بان اضافة الياف الكربون المقطعة الى مونة السمنت مع المواد النانوية يؤدي الى تقليل مقاومة الانضغاط ، وعلى الرغم من درجات الحرارة العالية الا ان جميع الخلطات تقريبا حافظت على مقاومة انضغاط جيدة لا تقل عن ( 10 ميكاباسكال ) عدا الخلطة (A1) لم تنطبق عليها تلك القاعدة.

وقد أظهرت النتائج حصول زيادة في مقاومة الانثناء لجميع الخلطات تقريبا عند درجة الحرارة (250 درجة مئوية) مقارنة بمقاومة الانثناء عند درجة حرارة المختبر بعدها تنخفض مقاومة الانثناء عند درجة الحرارة البالغة (500 درجة مئوية) بحدود (20-30%) ومن ثم تنخفض مقاومة الانثناء كثيرا عندما تصل درجة الحرارة الى (750 درجة مئوية) حيث تصل نسبة الانخفاض الى (80%) من مقاومة الانثناء عند درجة الحرارة (250 درجة مئوية) اما عند درجة الحرارة البالغة (1000 درجة مئوية) فإن مقاومة الانثناء انخفضت كثيرا بحيث لم نستطيع تسجيل اي قراءة لها ان افضل النتائج لمقاومة الانثناء كانت عند الخلطة (A2) وأن اضافة الياف الكربون المقطعة الى الخلطة الاسمنتية النانوية يحسن مقاومة الانثناء وبصورة عامة ان تأثير درجة الحرارة على مقاومة الانثناء هو تأثير سلبي وهذا واضح من انخفاض مقاومة الانثناء مع الزيادة في مقدار درجة الحرارة التي تتعرض اليها النماذج.

افضل مقاومة انثناء يمكن الحصول عليها من خلال زيادة غبار السيلكا النانوي حيث كانت نسبة غبار السيلكا النانوي في الخلطة (A6) (3%) بينما في الخلطات الاخرى اقل من ذلك وهذا يفسر التحسن الذي حصل في مقاومة الانثناء للخلطة مقارنة بالخلطات الاخرى وافضل مقاومة للانثناء يمكن الحصول عليها كانت عند اضافة نسبة (2.5%) من الميتاكاولين النانوي وهي اقل نسبة مضافة الى الخلطة مقارنة بالخلطتين الاخرتين وهذا يدل على ان نسبة الميتاكاولين النانوي تعمل عكسيا مع مقاومة الانثناء للخلطة النانوية.

#### الكثافة والامتصاص

تم إيجاد قيم الكثافة والامتصاص لنماذج المونة السمنتية النانوية المتصلبة بعمر (28 يوما) للخلطات وكانت النتائج المبينة في الجدول (11) نجد بأن الكثافة الجافة لمونة السمنت النانوية كانت قليلة عند نسبة الميتاكاولين النانوي وغبار السيلكا النانوي (2.5%) و (1%) على التوالي ثم ارتفعت عند النسب (5%) و (2%) وعاودت الانخفاض عند النسب (7.5%) و (3%) اي ان الكثافة تقل بزيادة المواد النانوية في الخلطة ، اما عند اضافة الياف الكربون المقطعة الى نفس الخلطات وبنسب غبار السيلكا النانوي متغيرة فإن الكثافة الجافة ازدادت مع زيادة نسبة غبار السيلكا النانوي في الخلطات ، كما ان تغيير نسبة الميتاكاولين النانوي مع اضافة الياف الكربون المقطعة الى الخلطات كذلك ادى الى تذبذب الكثافة الجافة في الخلطات وبصورة عامة يمكن القول بأن الكثافة الجافة تراوحت قيمها ما بين (1900-2300 كغم/م<sup>3</sup>) كما ان الكثافة الرطبة والكثافة الرطبة المغلية ذات قيم اكثر من قيم الكثافة الجافة ويرجع السبب الى امتصاص الماء من قبل المادة ومن الضروري كان ايجادها في البحث وذلك بحكم ان المادة العازلة التي هي قيد الدراسة تستعمل في مناطق تتعرض الى درجات حرارة عالية ومن الممكن ان تحتوي على ماء ساخن او بخار الماء كما يحدث في المراحل البخارية.

نسبة الامتصاص تراوحت قيمها ما بين (1.2-5.5%) حيث تزداد قيم نسبة الامتصاص بزيادة نسب الميتاكاولين النانوي وغبار السيلكا النانوي في الخلطات ، كما ان نسبة الامتصاص بعد الغلي تزداد قيمها عن نسبة الامتصاص العادية وتصل في بعض الاحيان الى اكثر من (100%) من قيمة نسبة الامتصاص كما هو واضح في

الخلطة (A10).

نسبة الفراغات سجلت انخفاضا مع زيادة المواد النانوية في الخلطات ولكنها ارتفعت بعد اضافة الياف الكربون المقطعة ويمكن الاستفادة من الحالتين في العزل الحراري حيث ان تقليل الفراغات يعمل عمل مادة عاكسة تؤدي بالتالي الى تحسين العزل الحراري كما ان زيادة الفراغات يمكن ان يحسن قابلية العزل الحراري الى حد كبير .

### الموصلية الحرارية

تم اجراء هذا الفحص لخلطات مونة الاسمنت النانوية المبينة وبمعدل نموذجين لكل خلطة وبواسطة جهاز الصفحة الساخنة لقياس الموصلية الحرارية ((Thermal Conductivity (K)) من خلال ملاحظة الاشكال من (10) الى (12) تبين ان اضافة المواد النانوية الى الخلطات قد حسنت كثيرا من قابلية العزل الحراري حيث ان قابلية العزل الحراري لمونة السمنت النانوية قد زادت بحدود عشر اضعاف عن قابلية العزل لمونة السمنت الاعتيادية وهذا يمكن ملاحظته من نتائج العزل الحراري للخلطة المرجعية (A11) والتي هي بدون اضافة اي مواد نانوية حيث نلاحظ ان معامل التوصيل الحراري قد تراوحت بحدود ( 0.8-2.2 واط/متر. درجة مئوية ) في حين ان معامل التوصيل الحراري لمونة السمنت النانوية قد كانت بحدود (0.17 – 0.22 واط/متر. درجة مئوية) وهذا يعكس المدى الكبير لتحسن العزل الحراري لمونة السمنت بأضافة المواد النانوية وبصورة عامة يمكن ملاحظة ان قيم معامل التوصيل الحراري للخلطات المونة النانوية كانت بحدود (0.09 – 0.27 واط/متر0 درجة مئوية ) وهي قيمة ممتازة مقارنة بقيمة معامل التوصيل الحراري للكونكريت العادي او مونة السمنت العادية والتي تصل الى (2.2 واط/متر0 درجة مئوية ) ، ان افضل قيم لمعامل التوصيل الحراري كانت عند نسبة غبار السيلكا النانوي هي (2%) وافضل نسبة من الميتاكاولين النانوي كانت (5%) عند اضافة الياف الكربون المقطع الى الخلطة النانوية اعطى نتائج سلبية لقابلية العزل الحراري عندما كانت نسبة الميتاكاولين النانوي (5%) بينما تحسنت قابلية العزل الحراري عند اضافة الياف الكربون المقطع الى الخلطة التي تحتوي على نسبة الميتاكاولين النانوي (7.5%) وهذا ما يمكن ملاحظته في الخلطات (A9،A10) وحققت الخلطة (A8) نتائج جيدة جدا وثابتة تقريبا لمعامل التوصيل الحراري مع تغير درجة الحرارة حيث ان نسبة غبار السيلكا النانوي كانت (2%) في تلك الخلطة.

ان الخلطات (A3,A7) قد حدث بها زيادة كبير في معامل التوصيل الحراري مع ارتفاع درجة الحرارة ويمكن ملاحظة المخططات لتلك الخلطات وحدث قفزة كبيرة في معامل التوصيل الحراري مع ارتفاع درجة الحرارة ونعتقد بأن هذا الامر نقطة سلبية ، بينما الزيادة في معامل التوصيل الحراري للخلطات الاخرى كانت شبة خطية اي الارتفاع معتدل وهذا يعتبر نقطة ايجابية لتلك الخلطات حيث ان التغيير المفاجيء في قابلية العزل غير محبذ وخاصة في درجات الحرارة العالية .

### تأثير التجفيف على الموصلية الحرارية لخلطات مونة السمنت النانوية

تم اختيار الخلطة (A2) لدراسة مقدار التغير في معامل التوصيل الحراري للنماذج قبل تجفيفها بواسطة فرن مختبري وبعد تجفيفها واجراء مقارنة على النتائج في الحالتين حيث وجدنا بأن معامل الموصلية الحرارية قد طرأ عليه تحسن وذلك بتجفيف النماذج ولو كان التحسن طفيفا الا انه هناك تحسن وهذا يعلل ان المحتوى الرطوبي في المادة العازلة يؤثر على قابليتها للعزل الحراري سلبيا وهذا واضح من خلال الشكل (13).

**الاستنتاجات والتوصيات**

من خلال ما تم استعراضه من نتائج يمكن استنتاج الآتي :

- 1- عند تعرض خلطات مونة الاسمنت النانوية الى درجات حرارة عالية تزداد مقاومة الانضغاط لجميع الخلطات تقريبا عند درجة الحرارة (250 – 500 درجة مئوية) مقارنة بمقاومة الانضغاط عند درجة حرارة المختبر ، بعدها تنخفض مقاومة الانضغاط عند درجات الحرارة المرتفعة ( 750 – 1000 درجة مئوية ) .
- 2- مقدار فقدان في مقاومة الانضغاط عند التعرض لدرجات الحرارة العالية تراوح ( من 70% الى 85% ) وان قيمة مقاومة الانضغاط الاولية أي قبل التعرض لدرجات الحرارة العالية لها علاقة بمقدار مقاومة الانضغاط المتبقية بعد التعرض لدرجات الحرارة .
- 3- بصورة عامة ان تأثير درجة الحرارة على مقاومة الانضغاط هو تأثير سلبي وهذا واضح من انخفاض مقاومة الانضغاط مع الزيادة في مقدار درجة الحرارة التي تتعرض اليها النماذج.
- 4- ترتفع مقاومة الانضغاط لمونة الاسمنت المضاف اليها مواد نانوية عند درجة الحرارة (250 درجة مئوية ) عند مقاومة الانضغاط عند درجة حرارة المختبر وهذا يمكن الاستفادة منه في الابنية التي تكون درجة الحرارة التي تتعرض لها اجزاءها الانشائية بحدود (250 درجة مئوية).
- 5- تنخفض مقاومة الانضغاط لمونة الاسمنت النانوية عند اضافة الياف الكربون المقطعة الى الخلطات قبل وبعد تعرضها الى درجات الحرارة العالية .
- 6- بسبب استخدام الركام الناعم بمقياس (75-300 مايكرومتر) فأن مونة الاسمنت النانوية حافظت على مقاومة انضغاط جيدة لاتقل عن ( 10 ميكاباسكال ) على الرغم من تعرضها الى درجات الحرارة العالية والتي وصلت الى (1000 درجة مئوية) .
- 7- تزداد مقاومة الانتشاء لخلطات مونة الاسمنت النانوية عند درجة الحرارة (250 درجة مئوية) مقارنة بمقاومة الانتشاء عند درجة حرارة المختبر ، بعدها تنخفض مقاومة الانتشاء عند درجة الحرارة البالغة (500 درجة مئوية ) بحدود (20-30%) ومن ثم تنخفض مقاومة الانتشاء كثيرا عندما تصل درجة الحرارة الى (750 درجة مئوية ) حيث تصل نسبة الانخفاض الى (80%) من مقاومة الانتشاء عند درجة الحرارة (750 درجة مئوية) اما عند درجة الحرارة البالغة ( 1000 درجة مئوية ) فأن مقاومة الانتشاء انخفضت كثيرا بحيث لم نستطيع تسجيل اي قراءة لها .
- 8- يمكن الحصول على افضل مقاومة انتشاء عندما تكون نسبة المي تاكولين النانوي (2.5%) ونسبة غبار السيلكا النانوي (2%) أي عند الخلطة (A2).
- 9- بصورة عامة ان تأثير درجة الحرارة على مقاومة الانتشاء هو تأثير سلبي وهذا واضح من انخفاض مقاومة الانتشاء مع الزيادة في مقدار درجة الحرارة التي تتعرض اليها النماذج.
- 10- تقل كثافة مونة الاسمنت النانوية كلما ازدادت كمية المواد النانوية في الخلطة وان الكثافة الجافة لمونة الاسمنت النانوية تراوحت قيمها ما بين (1900- 2300 كغم/م<sup>3</sup>) كما ان الكثافة الرطبة والكثافة الرطبة المغلية اكثر من الكثافة الجافة بسبب امتصاص الماء من قبل مونة الاسمنت النانوية وتراوحت قيم الكثافة الرطبة بحدود (1900- 2400 كغم/م<sup>3</sup>) والكثافة الرطبة المغلية لخلطات مونة الاسمنت النانوية

تراوحت قيمتها ما بين (1915-2450 كغم/م<sup>3</sup>).

- 11- نسبة الامتصاص تراوحت قيمها ما بين (1.2-5.5%) حيث تزداد قيم نسبة الامتصاص بزيادة نسب الميثاكاولين النانوي وغبار السيلكا النانوي في الخلطات ، كما ان نسبة الامتصاص بعد الغلي تزداد قيمها عن نسبة الامتصاص العادية وتصل في بعض الاحيان الى اكثر من (100%) من قيمة نسبة الامتصاص الاعتيادية.
- 12- نسبة الفراغات تنخفض مع زيادة المواد النانوية في الخلطات حيث بلغت بحدود (2.5 الى 6.5%) ولكنها ارتفعت بعد اضافة الياف الكربون المقطعة الى الخلطات حيث وصلت الى (7.5%) ويمكن الاستفادة من الحالتين في العزل الحراري حيث ان تقليل الفراغات يعمل عمل مادة عاكسة تؤدي بالتالي الى تحسين العزل الحراري كما ان زيادة الفراغات يمكن ان يحسن قابلية العزل الحراري كما هو الحال في المواد العازلة التقليدية.
- 13- ان اضافة المواد النانوية الى الخلطة الاسمنتية يحسن كثيرا من قابلية العزل الحراري حيث ان قابلية العزل الحراري لمونة الاسمنت النانوية قد زادت بحدود عشر اضعاف عن قابلية العزل لمونة الاسمنت الاعتيادية وهذا يمكن ملاحظته من نتائج العزل الحراري للخلطة المرجعية (A11) والتي هي بدون اضافة اي مواد نانوية حيث نلاحظ ان معامل التوصيل الحراري قد تراوحت بحدود (0.8-2.2 واط/متر. درجة مئوية ) بينما ان معامل التوصيل الحراري لمونة الاسمنت النانوية اصبحت بحدود (0.09 – 0.22 واط/متر.درجة مئوية) وهذا يعكس المدى الكبير لتحسن العزل الحراري لمونة الاسمنت بأضافة المواد النانوية .
- 14- ان معامل الموصلية الحرارية يقل عند تحفيف النماذج ولو كان التغير طفيفا الا ان هذا التغير يعزز كون ان المحتوى الرطوبي في المادة العازلة يؤثر على قابليتها للعزل الحراري .

المصادر

1. Mondal, P., "Nano mechanical Properties of Cementations Materials", NORTHWESTERN UNIVERSITY, Field of Civil and Environmental Engineering, December, 2008.
2. Said, A., And Zeidan, M., "Enhancing the Reactivity of Normal and Fly Ash Concrete Using Colloidal Nano-silica", ACI, SP267-07, October 2009, pp.75-86.
3. Sanchez, F. And Sobolev, K., "Nanotechnology in concrete –A review", Construction and Building Materials, 24, May, 2010, pp. 2060–2071.
4. الجيلاوي ، ندى مهدي فوزي " خواص الخرسانة خفيفة الوزن بالاشارة الى العزل الحراري والمعاققة الصوتية " اطروحة ماجستير / جامعة بغداد (1997).
5. الاسدي ، فائق الاسدي " انتاج بلاطات تسطيح عازلة للحرارة " مركز بحوث البناء(2002).
6. عبدالله ، عزيز ابراهيم ، صالح ، ياسين علي ، صالح ، هيفاء مهدي "خصائص السقوف الفيروسمنتية الحاوية على نشارة الخشب" مجلة تكريت للعلوم الهندسية /المجلد 20/العدد 1/ 2013(51-63).
7. M. S. Morsy, S. H. Alsayed and M. Aqel "Effect of Nano-clay on Mechanical Properties and Microstructure of Ordinary Portland Cement Mortar", International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol: 10 No: 01,p.p.23-27. <http://www.ivsl.org>
8. Li, H., Xiao, H., Yuan, J., And Ou, J., "Microstructure of Cement Mortar with Nano-particles". Composites, Part B, Engineering, 35, 2, January 2004, pp.185-189.
9. Porro, A., Dolado, J., Campillo, I., Erkizia, E., Miguel, Y., And Ibarra, Y., "Effects of Nanosilica Additions on Cement Pastes", in R. Dhir, M.D. Newlands, L.J. Csetenyi (Eds.), Application of Nanotechnology in Concrete Design, 2005, pp.87-96.
10. Green B., "Development of a High-density Cementitious Rock-matching Grout Using Nano-particles," Proceedings of ACI Session on "Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives", November 2006, pp.119-130.
11. Jo, B., Kim, C., Tae, G., and Park, J., "Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO<sub>2</sub> Particles". Construction and Building Materials, 21, 6, June 2007, pp.1351-1355.
12. حسن، قيس فاضل، " تأثير كمية ألياف الكربون المضافة على الموصلية الحرارية ومقاومة الإنضغاط للخرسانة" ، الكلية التقنية/العراق/كركوك ، 2011 .

13. Phan, L. T. and Carino, N. J., "Fire Performance of High Strength Concrete: Research Needs", Reprinted from the Advanced Technology in Structural Engineering, ASCE/SEI Structural Congress 2000, Proceedings, May, 2000, PP.1 8.
14. Janotka, I. and Bágel, L., "Pore Structures, Permeabilities, and Compressive Strengths of Concrete at Temperatures up to 800°C", ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 2, March – April, 2002, pp. 196 – 200.
15. Kodur, V.K.R. and Sultan, M.A., "Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, No. 2, April, 2003, pp. 101 – 106.
16. ACI Education Bulletin E4-12, "Chemical Admixtures for Concrete", 2012.
17. N. Krishnaswami and others "High Performance Concrete Using Fumed Silica", May 2008, Available: [www.nbmccw.com/articles](http://www.nbmccw.com/articles) , last visited on February 2013.
18. ACI 234R-06, "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", 2006.
19. Report for Nottingham Company, Performance Process, INC." Many applications For Fumed and Precipitated Silica" Nottingham (Div. of Performance Process, Inc.) - Atlanta, GA.2011.
20. القيسي، وليد عبدالرزاق، "تحسين الخواص الميكانيكية للسمنت الحديدي باستخدام الميتاكاؤولين"، اطروحة دكتوراه، قسم هندسة البناء والانشاءات، الجامعة التكنولوجية، العراق، بغداد، 2006.
21. Dr. Ghalib M. Habeeb, Dr.Mahdi S. Essa, Esam M. Ali," Evaluation OF Metakaolin For Use As Supplementary Cementitious Material" , Journal of Karbala University, Vol.5, No.4, Decembar 2007.
22. K. Patel "The Use of Nanoclay as A Constructional Material", International Journal of Engineering Research and Applications ", Vol.2, No.4, July 2012, pp. 1382-1386. [www.ivsl.org](http://www.ivsl.org)
23. M. S. Morsy, S. H. Alsayed, M. Aqel "Hybrid effect of carbon nanotube and Nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar ", Construction and Building Materials, Vol.25, No.1, 2011, pp. 145-149.
24. Terence C. Holland, "Technical Report Silica Fume User's Manual", Federal Highway Administration, 400 7<sup>th</sup> street, SW, Washington, D20590, April, 2005.
25. Finer than fly ash, this pozzolan increases strength and density, reduces concrete permeability "How micro silica improves concrete", April 1, 1985, pp.1-4, available on [http://www.concreteconstruction.net/images/How%20Microsilica%20Improves%20Concrete\\_tcm45-346441.pdf](http://www.concreteconstruction.net/images/How%20Microsilica%20Improves%20Concrete_tcm45-346441.pdf).

26. ASTM C240-08, "Standard Test Methods of Testing Cellular Glass Insulation Block", Vol. 04.06, pp. 54-57.
27. حسن، قيس فاضل ، "سلوك العتبات الخرسانية المسلحة المقواة بصفائح ألياف الكربون تحت تأثير أحمال دورية"، رسالة دكتوراه فلسفة في الهندسة المدنية ، جامعة النهرين، بغداد، العراق، 2007 .
28. Shama Parveen, Sohel Rana, and Rau Fanguero, "A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nano fiber Reinforced Cementations Composites" Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterial's Volume 2013, Article ID 710175, 19 pages , <http://dx.doi.org/10.1155/2013/710175>.
29. ASTM C 177-10, "Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus", Vol. 04.06, 2010, pp. 22-44.

**الجدول(1): خلطات الخرسانة النانوية لقياس الموصلية الحرارية ودراسة تأثير الحرارة على الخواص الميكانيكية للخرسانة النانوية**

No .	Mix ID.	(cement/sand) Ratio	Nano-silica (%) from cement wt.	Super Plasticizer (%) from cementing materials wt.	Metakaolin (%) Replacement from cement wt.	(w/c) Ratio	Silica fume % from cement weight	Carbon fiber % From mix volume	No. of cube	No. of prism
1	A1	1:1.5	1	5.5	2.5	0.35	5	—	18	18
2	A2	1:1.5	2	5.5	2.5	0.35	5	—	18	18
3	A3	1:1.5	3	5.5	2.5	0.35	5	—	18	18
4	A4	1:1.5	1	5.5	5	0.35	5	—	18	18
5	A5	1:1.5	2	5.5	5	0.35	5	—	18	18
6	A6	1:1.5	3	5.5	5	0.35	5	—	18	18
7	A7	1:1.5	1	5.5	7.5	0.35	5	—	18	18
8	A8	1:1.5	2	5.5	7.5	0.35	5	—	18	18
9	A9	1:1.5	3	5.5	7.5	0.35	5	—	18	18
10	A10	1:1.5	3	5.5	7.5	0.35	5	0.8	18	18
11	A11	1:1.5	—	—	—	0.35	—	—	18	18





الشكل (1): نموذج سيلكا نانوية

الجدول (2): الخواص الفيزيائية والكيميائية للسمنت المستخدم في البحث \*

Oxides composition	Content (%)	Limit of Iraqi specification No. 5-1984
CaO	62.07	-
SiO <sub>2</sub>	21.1	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.36	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.12	-
Mg O	2.33	5 % Max.
SO <sub>3</sub>	2.38	2.8 % Max.
Loss on Ignition, (L.O.I)	2.49	4 % Max.
Insoluble material	1.22	1.5 % Max.
Lime Saturation Factor, (L.S.F)	0.89	(0.66-1.02)
Physical Properties	Test Results	Limit of Iraqi specification No. 5-1984
Specific surface area (Blaine method), (m <sup>2</sup> /kg)	458.5	230 m <sup>2</sup> /kg lower limit
Setting time (Vicat apparatus)		
Initial setting, (hrs : min)	2:10	Not less than 45 min
Final setting, (hrs : min)	4:40	Not more than 10 hrs
Compressive strength (MPa)		
For 3 day	27	15 MPa lower limit
For 7 day	39	23 MPa lower limit

\* تم اجراء الفحوصات في مختبرات معمل سمنت حمام العليل وهي الشركة المصنعة للسمنت



الشكل (2): نموذج من الكاولين والميتاكاولين

جدول (3): التحليل المنخلي والخواص الفيزيائية والكيميائية للرمل المستخدم في البحث\*

Sieve size	Cumulative passing (%)	Limit of ASTM C33-10
4.75 mm (No. 4)	100	95 - 100
2.36 mm (No. 8)	100	80 - 100
1.18 mm (No. 16)	82.5	50 - 85
600 µm (No. 30)	49	25 - 60
300 µm (No. 50)	24.5	10 - 30
150 µm (No. 100)	8.5	2 - 10

Properties	Specification	Test Results	Limits of specification
Specific gravity	ASTM C128	2.60	-
Absorption (%)	ASTM C128	2.2	-
Dry loose unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM C29/C29M- 10	1590	-
Sulfate content (as SO <sub>3</sub> ) (%)	(IQS) No.45-84	0.08	0.5 (max. value)
Material finer than 0.075 mm (%)	(IQS) No. 45-84	1.3	5 (max. value)

\* تم اجراء الفحوصات في مختبرات كلية الهندسة - جامعة تكريت



الشكل (3): نموذج من الياف الكربون المقطعة

الجدول (4): مواصفات الملدن الفائق \*

المظهر	سائل بني غامق أو اسود
الكثافة النوعية	1.21 عند 25 □ درجة مئوية
محتوى الكلوريد	لا شيء
التجمد المفاجيء	غير متوقع

\*المواصفات تم الحصول عليها من استمارة المعلومات المجهزة من قبل الشركة المنتجة

الجدول (5): مواصفات السيلكا النانوية (Fumed silica) \*

Parameter	Specification
Specific surface , m <sup>2</sup> /g	200(160-240)
PH-Value	3.7-4.7
Loss on drying , %	~ 3
Sio <sub>2</sub> - Concentration , %	> 99.0

\*المواصفات تم الحصول عليها من استمارة المعلومات المجهزة من قبل الشركة المنتجة

الجدول (6): خواص الكاؤولين الاحمر بالمقارنة مع المواصفة (ASTM C618-03) \*

الخاصية (%)	قيمتها (%)	حدود المواصفة (%)
مجموع (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	90.57	لا تقل عن 70
SO <sub>3</sub>	2	لا تزيد عن 4
محتوى الرطوبة	—	لا يزيد عن 3
الفقدان عند الحرق	7.12	لا تزيد عن 10
المتبقي على منخل 325 (45 مايكرون ) بطريقة النخل الرطب (96 - ASTM C430)	—	لا يزيد عن 34

\*تم اجراء الفحوصات في مختبرات معمل سمنت حمام العليل – نينوى

**الجدول (7): خواص الميكاكاولين الاحمر بالمقارنة مع المواصفة (ASTM C618-03)\***

الخاصية (%)	قيمتها (%)	حدود المواصفة (%)
مجموع (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ، SiO <sub>2</sub> ، Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	95.53	لا تقل عن 70
SO <sub>3</sub>	2.1	لا تزيد عن 4
محتوى الرطوبة	—	لا يزيد عن 3
الفقدان عند الحرق	1.37	لا تزيد عن 10
المتبقي على منخل 325 (45 مايكرون ) بطريقة النخل الرطب (ASTM C430 - 96) [64]	—	لا يزيد عن 34
دليل الفعالية البوزولانية	85.9	لا يقل عن 75

\*تم اجراء الفحوصات في مختبرات معمل سمنت حمام العليل – نينوى

**الجدول (8): الفعالية البوزولانية والتحليل الكيميائي لغبار السيلكا (Micro silica)\***

Pozzolanic activity	Limit of ASTM C1240-03	Chemical decomposition		Limit of ASTM C1240-03
		Oxides	Result%	
121.5%	105%	L.O.I	3.89	6% Max
		SiO <sub>2</sub>	91.03	85% Min
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.02	-
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32	-
		SO <sub>3</sub>	0.73	-

\*المواصفات تم الحصول عليها من استمارة معلومات المجهزة من قبل الشركة المنتجة

**الجدول (9): المواصفات الميكانيكية لاليف الكربون المقطع\***

Properties	Results
Fiber Type	Carbon
Filament diameter, μm	7
Filament length, mm	6
Density, Kg/m <sup>3</sup>	1800
Elongation, %	1.5

Tensile strength, MPa	165
Flexural Strength, MPa	259
Modulus of elasticity Gpa	235
Electrical resistivity, $\Omega$ .cm	$3 * 10^{-3}$
Carbon content %	98

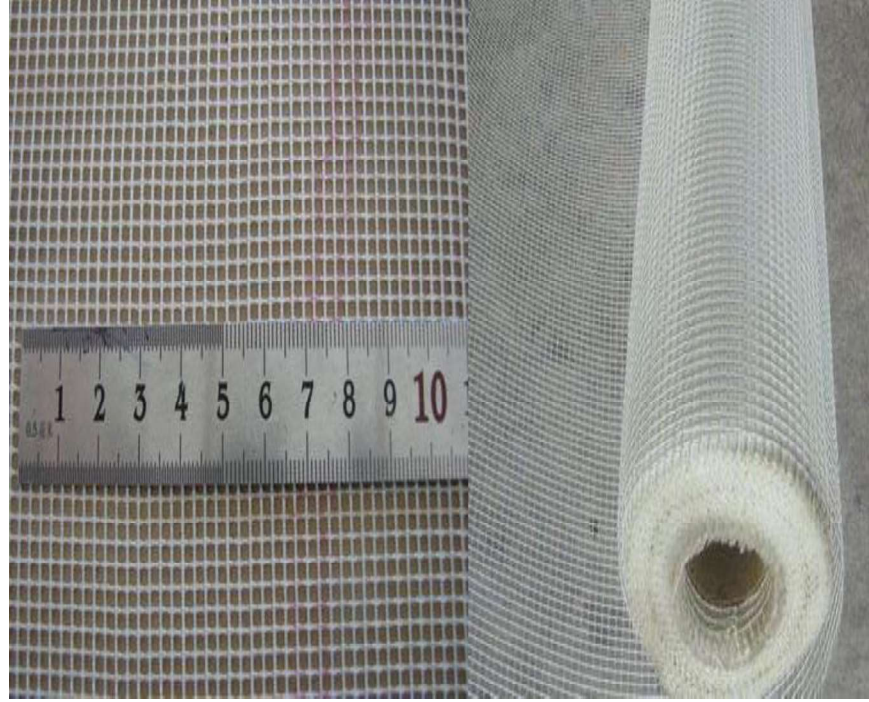
\*المواصفات تم الحصول عليها من استمارة معلومات المجهزة من قبل الشركة المنتجة

الجدول (10): مواصفات مشبك الياف الزجاج\*

Fabric Style	Thick (mm)	Weight g/m <sup>2</sup>	Weave	Tensile strength (N/5cm)		Yarn		Thread count per cm		Temp (deg.C.)
				Warp	Weft	Warp	Weft	Warp	Weft	
CW-110	0.1	110	Plain	2500N/5cm	2000N/5cm	EC9 33 2x1	EC9 33 2x1	12	12	550°C
7628 - 1(EW200)	0.2	210	Plain	2500N/5cm	2000N/5cm	EC9 33 2x1	EC9 33 2x1	17.3	12.5	550°C
HT3732	0.43	430	3x1 Twill	6000N/5cm	4500N/5cm	EC9 33 2x2	EC9 33 2x2	18	13	550°C
HT 3784	0.8	880	8HS Satin	8000N/5cm	6000N/5cm	EC9 33 4x2	EC9 33 4x2	18	13	550°C
HT3788	1.7	1700	12HS Satin	11000N/5cm	4750N/5cm	EC9 33 4x4	EC9 33 4x4	18	13	550°C

Width	90cm
Roll Length	25m
Color	white(standard) & blue
Mesh size	3x3mm
Weight	110g/m <sup>2</sup>
Thick.	0.1mm

\*المواصفات تم الحصول عليها من استمارة معلومات المجهزة من قبل الشركة المنتجة



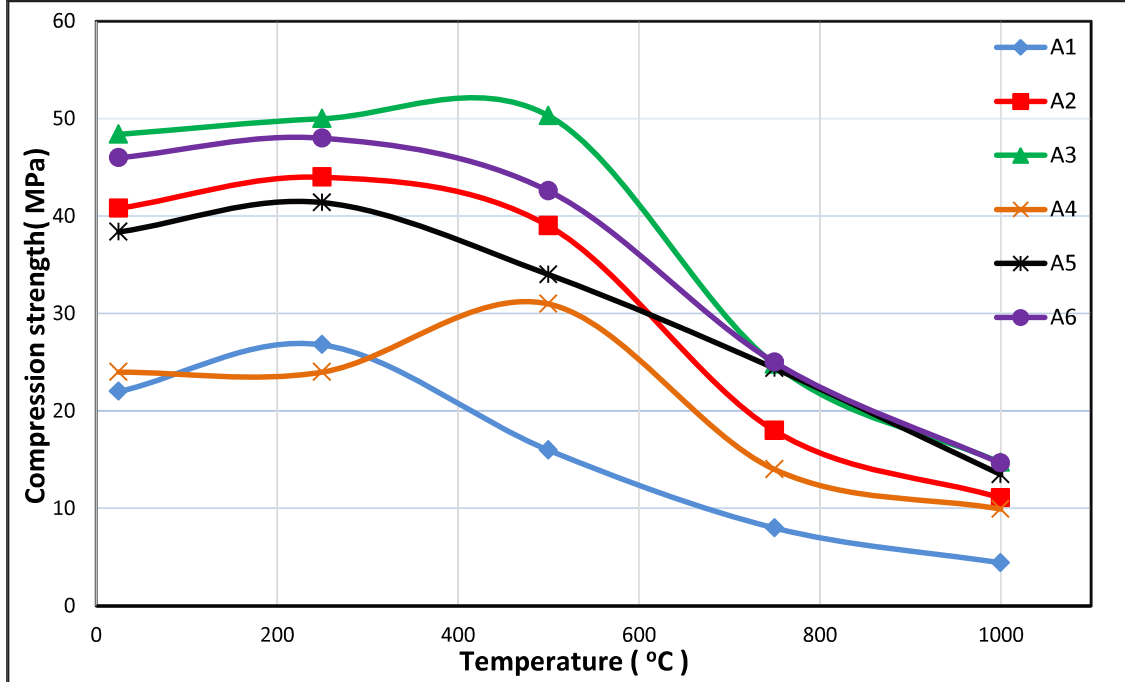
الشكل (4): نموذج من مشبك الياف الزجاج



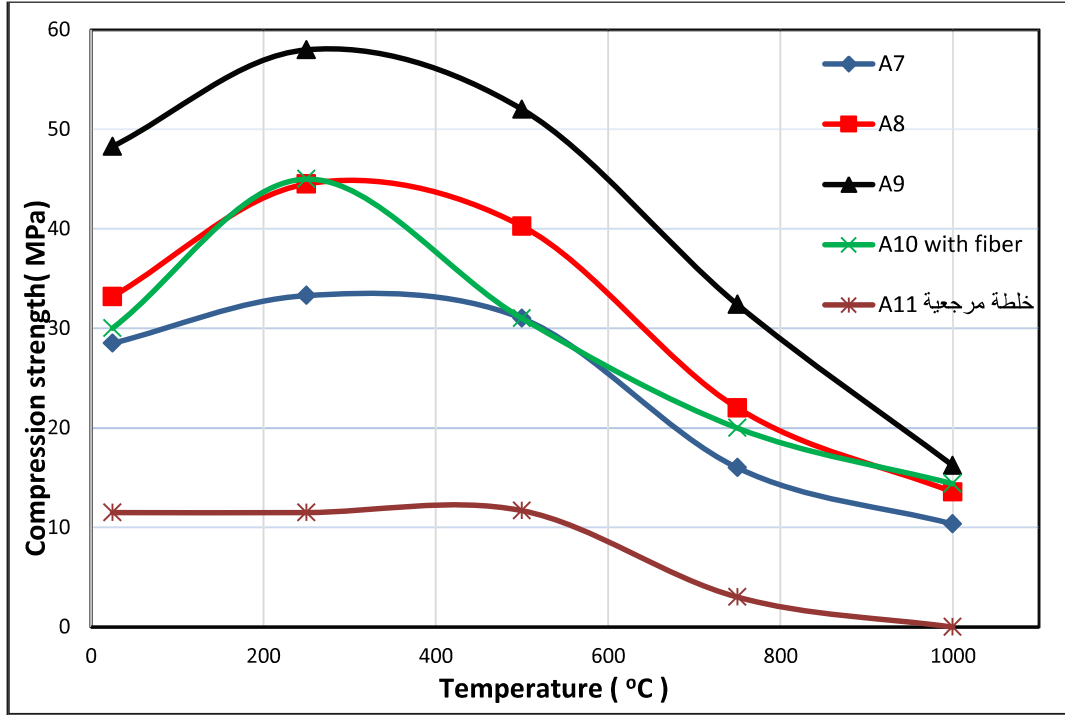
الشكل (5): جهاز فحص الموصلية الحرارية

الجدول (11): نسبة الكثافة والامتصاص لخلطات مونة السمنت النانوية

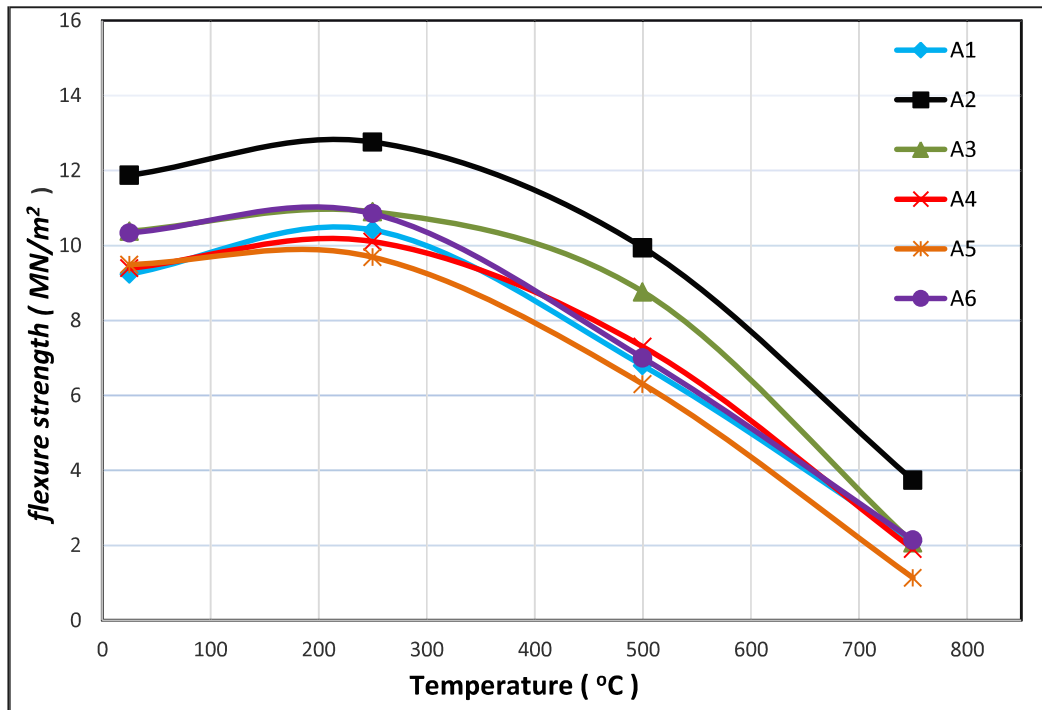
Mi x ID	نسبة الامتصاص بعد الغمر (%)	نسبة الامتصاص بعد الغمر والغليان (%)	الكثافة الجافة (كغم/م <sup>3</sup> )	الكثافة بعد الغمر كغم/م <sup>3</sup>	الكثافة بعد الغمر والغلي (كغم/م <sup>3</sup> )	الكثافة الظاهرة (كغم/م <sup>3</sup> )	نسبة الفراغات (%)
A1	1.2	3.3	1966	1991	2075	2075	5.2
A2	3.1	4.7	2100	2166	2200	2200	4.5
A3	3.2	3.7	2025	2091	2125	2125	4.7
A4	4.8	5.2	1900	1991	2000	2000	5
A5	3.4	5.9	1807	1869	1915	1915	5.6
A6	3.3	3.7	2172	2245	2272	2272	4.4
A7	5.2	7	1900	2000	2033	2033	6.5
A8	5.4	8.3	2300	2300	2363	2363	2.6
A9	3.5	4.3	2108	2183	2200	2200	4.1
A10	2.4	5.6	2083	2133	2200	2200	5.3



الشكل (6): مقاومة الانضغاط لمونة السمنت النانوية تحت تأثير درجات حرارة مختلفة

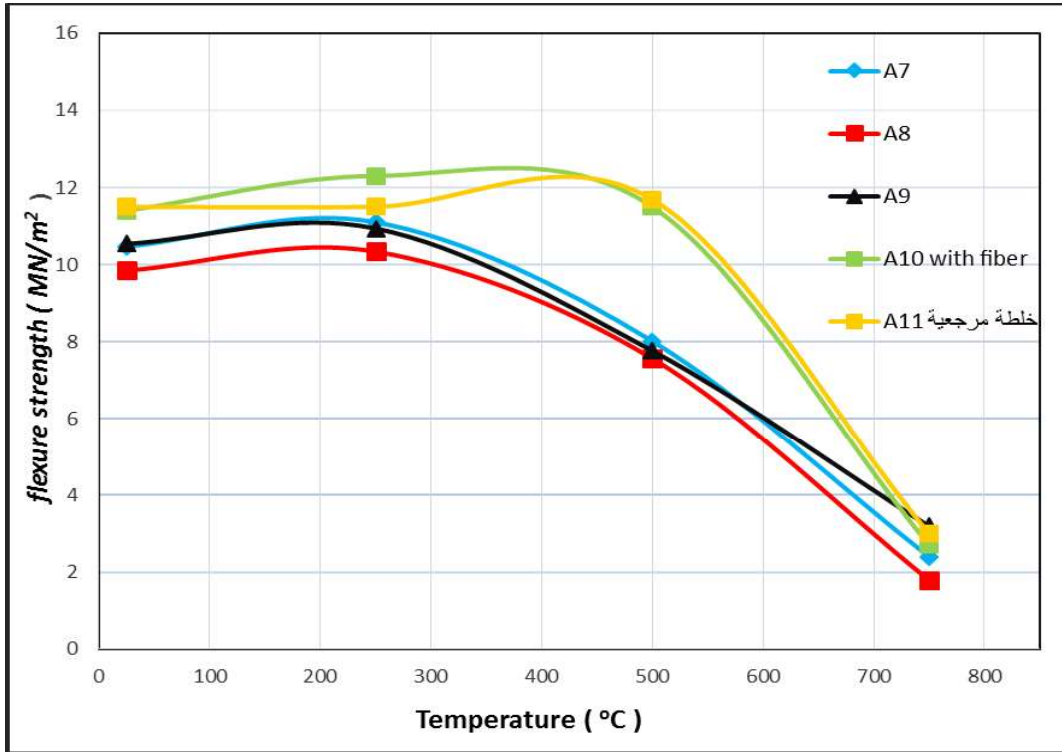


الشكل (7): مقاومة الانضغاط لمونة السمنت النانوية مقارنة مع الخلطة المرجعية وبإضافة الياف الكربون المقطعة تحت تأثير درجات حرارة مختلفة

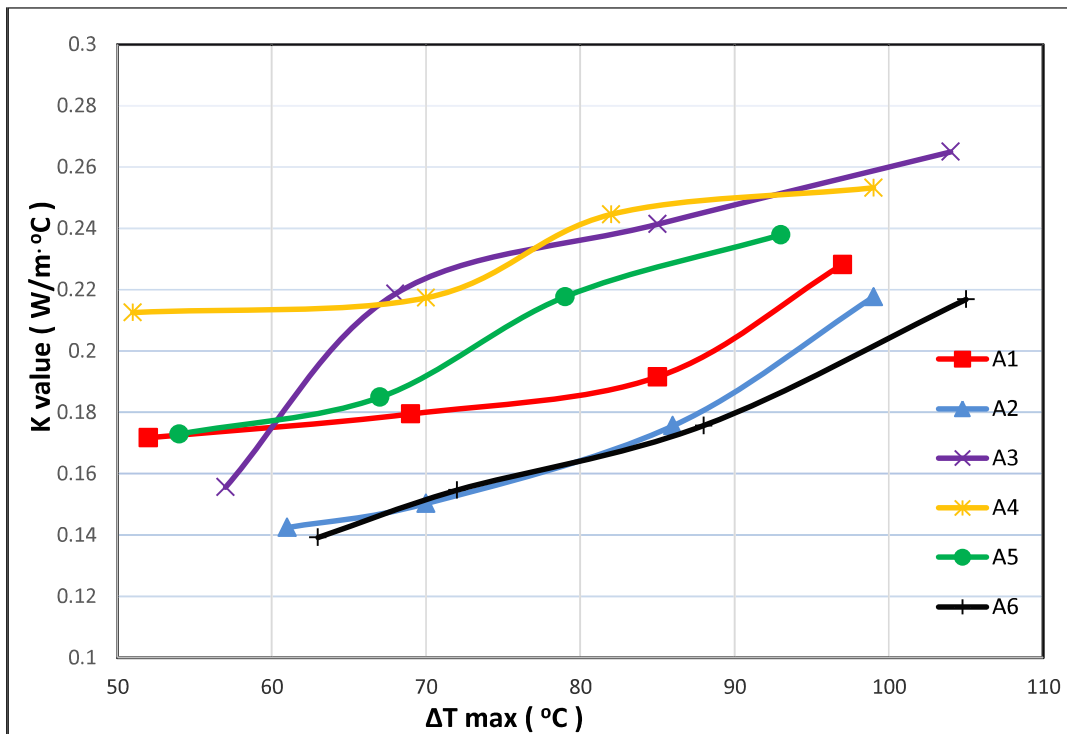


الشكل (8): مقاومة الانثناء لمونة السمنت النانوية تحت تأثير درجات حرارة مختلفة

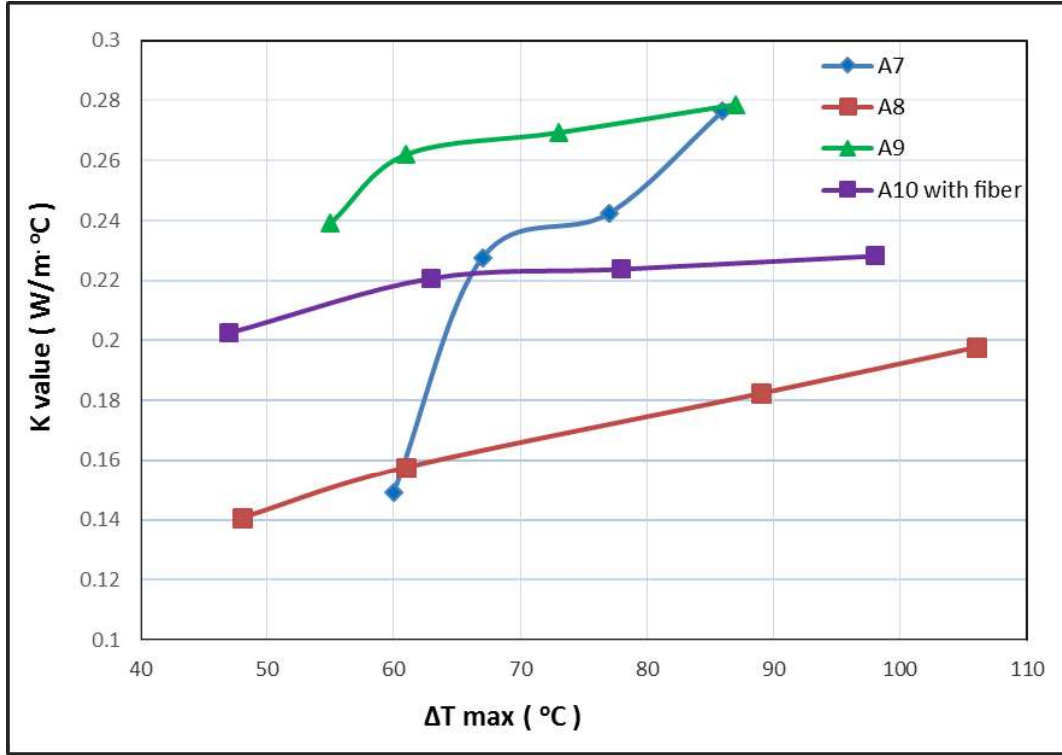




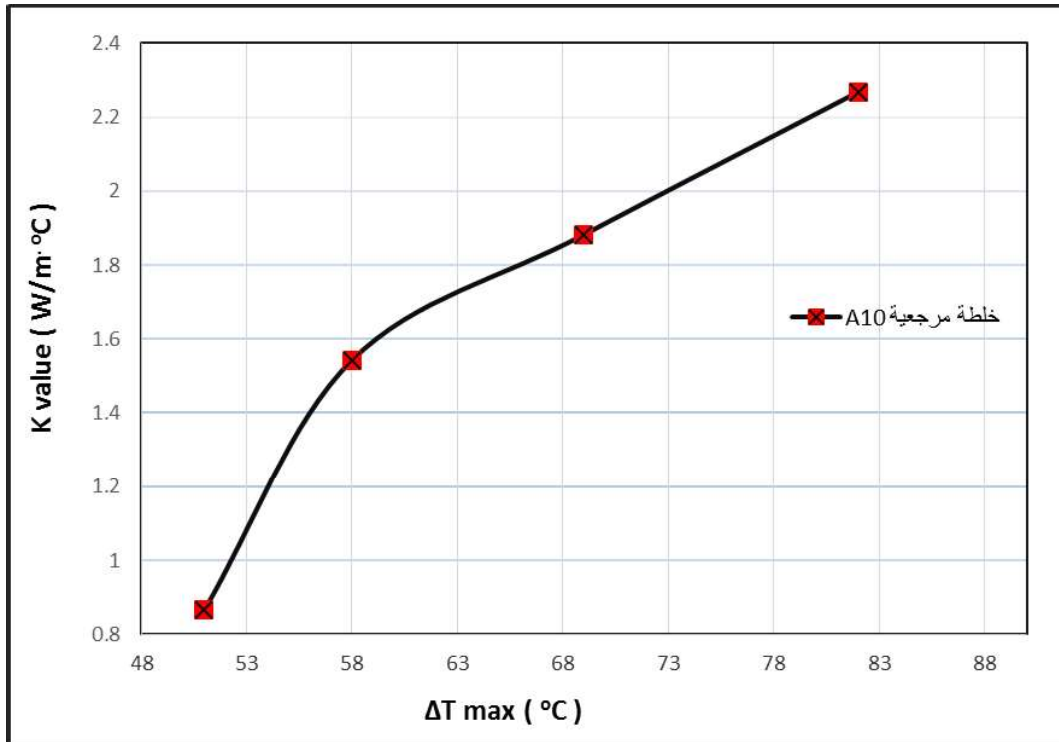
الشكل (9): مقاومة الانثناء لمونة السمنت النانوية مقارنة مع الخلطة المرجعية وبإضافة الياف الكربون المقطعة تحت تأثير درجات حرارة مختلفة



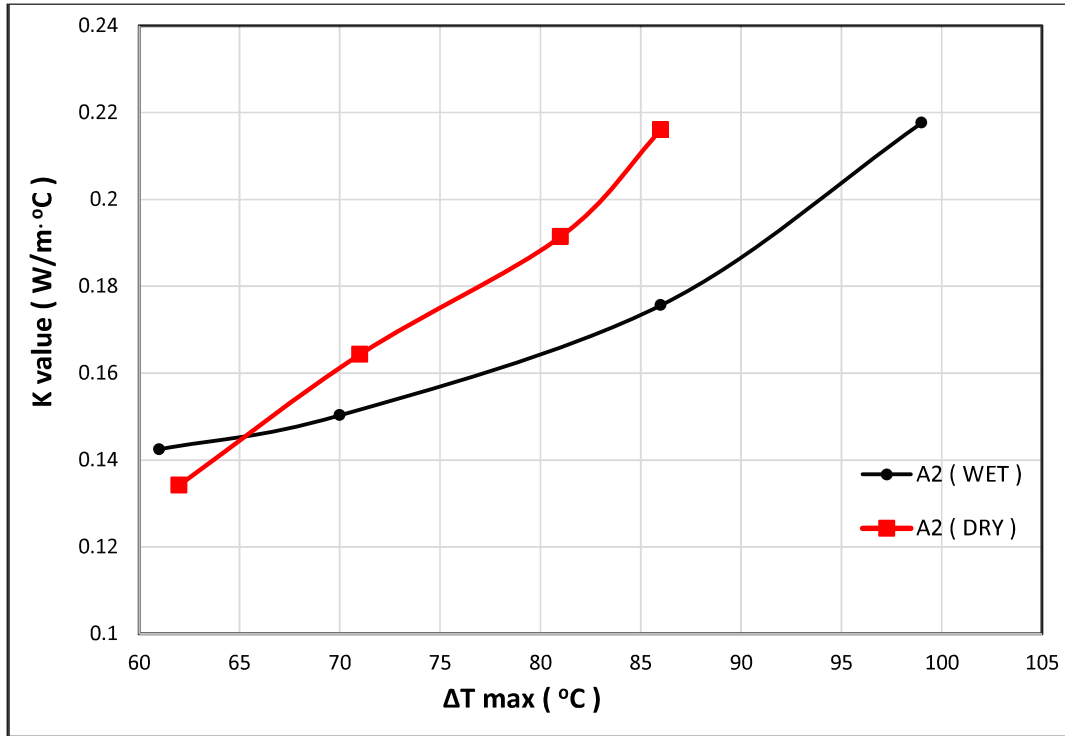
الشكل (10): الموصلية الحرارية مع درجات الحرارة المختلفة لخلطات مونة السمنت النانوية



الشكل (11): الموصلية الحرارية مع درجات الحرارة المختلفة لخلطات مونة السمنت النانوية



الشكل (12): الموصلية الحرارية مع درجات الحرارة المختلفة لخلطة مونة السمنت المرجعية



الشكل (13): تأثير المحتوى الرطوبي على الموصلية الحرارية للخطة (A2)