Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Vol. 37, No. 6, pp.1389-1405, November 2009.

EFFECT OF METAKAOLIN ON STRENGTH AND DURABILITY OF CONCRETE

م /محمد احمد علي المطار
مدرس –المعهد التقني الصناعي -صنعاء
د /حسان سعد عبد المغني –أستاذ مشارك الهندسة الإنشائية –جامعة صنعاء
د /سليمان إسماعيل الصافي –أستاذ مساعد الهندسة الإنشائية –جامعة صنعاء
قسم الهندسة المدنية – كلية الهندسة – جامعة صنعاء مايو 2009

(Received September 27, 2009 Accepted October 24, 2009).

The aim of this investigation is to study the performance of concrete containing different percentages of local metakaolin and to identify the optimum addition percentage and to compare the performance of metakaolin with other pozzolanic materials as silica fume . The study focuses on the strength and durability of concrete of the blended concrete containing different percentages of metakaolin for two types.

The concrete mixture with the percentages of 5%, 10%, and 15% by weight of cement in the first type used W/C = 0.55. Concrete Cubes are tested at the age of 3, 7, 14, 28, and 60 days. The results showed that the strength development of concrete blended with Metakaolin is enhanced. It was found that 5% of Metakaolin appears to be the optimum, where concrete exhibits enhanced compressive and tensile strength at all ages compared to reference samples.

The second Type concrete mixture used superplasticizer to reduce water/cement ratio (W/C=0.4) to keep the same slump (75-120mm). The concrete mixture with the percentages of 5% and 10% by weight of cement is prepared. Concrete sample are tested at the age of 7, 14, 28, 60, and 90 days. In addition to both absorption and permeability test at 28 days.

The result showed that the strength development of concrete blended with metakaolin is enhanced. Also, it was found that 5% appears to be the optimum. Where metakaolin concrete 5% exhibits enhanced compressive and tensile strength at all ages compared to reference samples. When compared the results of silica fume and metakaolin appear to be an effective pozzolan in enhancing concrete strength. From the study, it is clear that metakaolin is a very reactive pozzolan and results in enhanced strength and some improvement in Durability.

KEYWORDS: *Metakaolin; Silica fume; Compressive strength; Tensile strength; Durability; Superplasticizer; Pozzolan; Calcining Clay; Concrete,*

تأثير الطين المحروق (Metakaolin) على مقاومة و متانة الخرسانة

الخلاصة

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير طين الكاولين المحلى على مقاومة ومتانة الخرسانة في مرحلتين ، حيث تم في المرحلة الأولى إضافة نسب مختلفة (5% , 10% , 15%)من طين الكاولين المحروق من وزن الأسمنت إلى مكونات الخرسانة المرجعية في المرحلة الأولى من الخلط وبنسبة ماء إلى الأسمنت W/C=0.55 . وتم فحص عينات هذا النوع من الخلطات لمقاومة الضغط والشد في الأعمار 3, 7, 14, 28, 60 يوما .وقد بينت نتائج فحص العينات الحاوية على 5%من طين الكاولين قد زادة مقاومتها في الشد و الضغط عن العينات المرجعية التي لم يستخدم فيها الكاولين .

وتم في المرحلة الثانية إضافة نسبة 5%و 10%من طين الكاولين إلى مكونات الخرسانة مع استخدام مضاف الملدن المتفوق (Superplasticizer)لتقليل نسبة الماء إلى الأسمنت W/C=0.40للمحافظة على نفس الهطول 120 – 75)مم (وقد أجريت لهذه العينات اختبارات مقاومة الضغط والشد في الأيام 7, 14, 28, 60, 90 يوم (بالإضافة إلى اختبار الامتصاص و النفاذية عند العمر 28يوماً ,وتم مقارنة نتائج فحص العينات مع العينات المرجعية ومع عينات حاوية على مضاف أبخرة السليكا و بنفس نسب طين الكاولين .وقد بينت النتائج أيضا زيادة واضحة في مقاومة الضغط والشد في العينات الحاوية على نسبة 5%من طين الكاولين بالمقارنة مع العينات المرجعية .كما أن نتائج المقارنة بين عينات طين الكاولين وأبخرة السليكا أظهرت عينات طين الكاولين تفوقاً ملحوظاً في مقاومة الضغط والشد .

الكلمات الدالة :طين الكاولين –مقاومة الضغط –مقاومة الشد –متانة الخرسانة –الملدن المتفوق –أبخرة السليكا .

1. المقدمة

تعتبر الإضافات البوزلانية ، ومنها طين الكاولين المحروق (Metakaolin)من المواد التي لها تأثير مباشر على التركيب الكيميائي والبلوري على الأسمنت ، فهذه المواد تزيد من مقاومة الخرسانة لأنها تتحد مع هيدروكسيد الكالسيوم)الجير الحر (الناتج من اماهة الأسمنت لتكوين سليكات الكالسيوم و الألمنيوم الهيدراتية الإضافية والناتجة عن التفاعل البوزلاني الذي يملأ الفراغات ويسد المسامات بين حبيبات الأسمنتي لتكوين أسمنتات لها قوى تحمل عالية [1]

والمواد البوزلانية هي إما أن تكون مواد طينية طبيعية أو صناعية تحوي على مادتي السيليكا والالمونيا في التركيب الكيميائي .والمواد البوزلانية الطبيعية لا تتطلب أكثر من المعالجة الميكانيكية و الحرارية بينما المواد البوزلانية الصناعية تحتاج إلى عمليات صناعية معقدة .

ويندرج الميتاكاولين (Metakaolin)ضمن البوزلانيات الطبيعية التي يحصل عليها من عملية حرق طين الكاولين (kaolin)، هذه العملية سوف تساهم في انتزاع الروابط الهيدروجينية من الهيكل البلوري المنتظم والخامل)غير النشط في التفاعل مع المواد الأسمنتية (للكاولين مكون حالة غير بلورية وذات نشاط عالي التفاعل مع المواد الأسمنتية .وتتحول إلى الحالة غير البلورية عندما تصل درجة حرارة الاحتراق بين ° (750 – 600)م . [2]

و تأثير البوزلانيات على الخرسانة يندرج في خاصيتين هما :

1- النشاط الكيميائي الذي يحدث بين نواتج اماهة الأسمنت الضارة والمركبات البوزلانية حيث إن أحد نواتج الاماهة الطبيعية بين الأسمنت والماء هو هيدروكسيد الكالسيوم (CH)فإن الميتاكاولين (MK)سوف يتفاعل مع هذا العنصر بوجود الماء مما يقلل من كمية هيدروكسيد الكالسيوم (CH)في حين تزداد نواتج التفاعل من سيليكات الكالسيوم المائية (CSH)و هيدروكسيد مونياسليكات الكالسيوم .(CASH)بطريقة التفاعل البوزلاني .

2- أما التأثير الآخر للبوزلانيات على الخرسانة فيتمثل في عملية التحشية (Filler)حيث تؤدي المواد الناعمة جدا والخاملة كيميائيا فقط سد المسامات وملء الفراغات بين مكونات الخرسانة كما أن المواد الناعمة ذات الخواص البوزلانية تساهم في عملية الاماهة[4] [3] [2] .

ويعتبر طين الكاولين المحروق مادة بوزلانية جيدة لها القدرة على التفاعل مع الجير الحر الناتج من اماهة الاسمنت وتكوين سليكات الكالسيوم المائية الإضافية والتي تؤدي إلى تحسين الخواص الدقيقة للاسمنت .

2. الأعمال المخبرية

2-1 المواد المستخدمة :

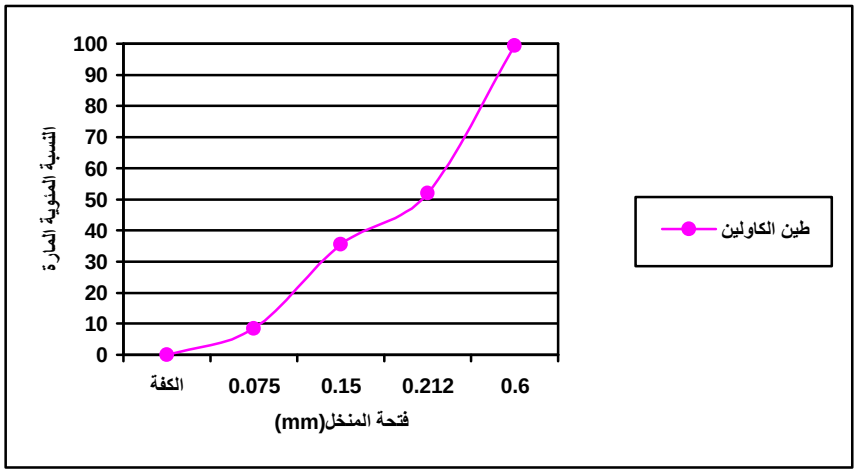
المواد المستخدمة في هذا البحث هي طين الكاولين و الأسمنت البورتلاندي العادي و الركام و أبخرة السليكا والملدن المتفوق . (Superplasticizer)

2-2 تحضير الميتاكاولين :

تم تفتيت وطحن كتل عينات الطين مبدئياً إلى درجة نعومة وصلت النسبة المارة من المنخل 0.60مم إلى 100% باستخدام المدق اليدوي .
ثم تمت المعالجة الحرارية لطين الكاولين في درجة حرارة 700 º م لمدة 3ساعات وبعد ذلك تم طحن عينات الطين المحروق (Metakaolin)بجهاز الطحن ,(SIEBTFCHNIK)للحصول على نعومة منتظمة للعينات وبحيث تصل درجة النعومة في العينات إلى أنعم من الأسمنت .ونتائج فحص التحليل المنخلي لعينة الميتاكاولين مبينة في الجدول (1) والشكل .(1)

الجدول (1) التحليل المنخلي لطين الكاولين المحروق

رقم المنخل (مم)	الكمية المحجوزة على كل منخل (جم)	النسبة المئوية المارة بالوزن %
o.600	1.3	99.35
0.300	22.4	88.13
0.212	72.4	51.85
0.150	32.5	35.57
0.075	54	8.52
الكفة	17	0



شكل (1) منحنى تدرج طين الكاولين

2-3تجهيز الخلطات:

تم تحضير خلطات مختلفة من المواد الأولية المستخدمة على مرحلتين والجداول 2و 3يوضحان تركيب هذه الخلطات والرموز الخاصة بها .

المرحلة الأولى :في هذه المرحلة تم تنفيذ أربع خلطات بنفس نسب الخلط) , (1 : 1.8 : 2.9)الأسمنت :ركام ناعم :ركام خشن . (كما استخدمت كمية ماء الخلط نسبة إلى خليط الأسمنت) الأسمنت = W/Cb (MK + 0.55 .وقد تم إضافة الطين المحروق MKبنسب (% 15 -%5%- 10)من وزن الأسمنت من نوعي (KA, KB) .وهذه الخلطات خالية من المضافات. ((Superplasticizerومكونات هذا النوع من الخلطات في المتر المكعب موضحة في الجدول (2)

المرحلة الثانية :تم تحضير وتنفيذ ست خلطات بنسب) , (1 : 2.3 : 3.6)الأسمنت :ركام ناعم :ركام خشن . (و تم تثبيت نسبة الماء إلى الاسمنت في جميع الخلطات . W/C = 0.4وتم استخدام المضاف الملدن المتفوق (Superplasticizer)بنسب 4%من وزن الأسمنت .وهي النسب التي تحقق كمية الهبوط (Slump) المطلوب الذي يتراوح مابين 120 – 75)مم (للخلطات المختلفة في هذه المرحلة .ومكونات هذه الخلطات موضحة في الجدول (3)

جدول (2) مكونات الخلطات الخرسانية بدون Superplasticizer

نوع الخلطة	(W/C)	مكونات الخليط في المتر المكعب (Kg/m^3)						الكثافة (kg/m^3)
		الاسمنت	الركام	الركام الخشن	الماء	MKA	MKB	
Rf	0.55	400	720	1160	220	0	0	2500
MK15	0.55	400	720	1160	252	60	0	2592
MK10	0.55	400	720	1160	242	40	0	2562
MK5	0.55	400	720	1160	231	0	20	2531

جدول (3) مكونات الخلطات الخرسانية مع Superplasticizer

نوع الخلطة	(W/C)	مكونات الخليط في المتر المكعب (Kg/m^3)								الكثافة (kg/m^3)
		الاسمنت	الركام الناعم	الركام الخشن	الماء	SP1	MKA	MKB	S.F	
M1	0.4	330	780	1200	132	13.2	0	0	0	2455
M2	0.4	330	780	1200	132	13.2	0	16.5	0	2472
M3	0.4	330	780	1200	132	14.9	0	0	16.5	2473
M4	0.4	330	780	1200	132	16.5	0	16.5	16.5	2492
M5	0.4	330	780	1200	132	14.9	0	33	0	2490
M6	0.4	330	780	1200	132	16.5	0	0	33	2462

4-2 الاختبارات المعملية :(Lab. Tests)

1.4.2 فحص الهطول : (Slump Tests)

استعمل فحص الهطول حسب الموصفات الأمريكية ASTM C 143-90aلقياس قابلية التشغيل لجميع أنواع الخلطات المنفذة في هذه الدراسة .

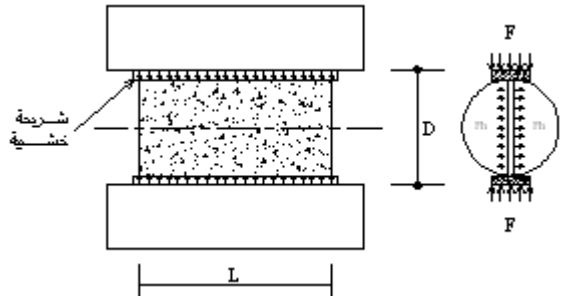
2-4-2اختبارات الضغط (Compression Tests)

تم فحص مقاومة الضغط بواسطة ماكينة الاختبار SCHENCKذات قدرة 2500كيلو نيوتن وبمعدل سرعة تحميل , (0.20 Mpa/sec)وهي ضمن القيمة المحددة لفحص المواد التي حددتها مواصفات المؤسسة الأمريكية لاختبار المواد (ASTM C 39M)بين .Mpa/sec (0.35 - 0.15)
وتمثل نتيجة المعدل الحسابي لثلاثة نماذج عند كل عمر ,وقد أجريت اختبارات مقاومة الضغط لعينات النوع الأول (الخلطات بدون الملدن المتفوق) عند الأعمار (3–7– 14– 28–60)يوم .
أما نماذج النوع الثاني)الخلطات مع مضاف الملدن المتفوق (فقد أجريت اختبارات مقاومة الضغط عند الأعمار (90 - 7– 14– 28– 60)يوم .

3-4-2اختبار الشد (Tensile Test)

تم فحص نماذج مقاومة الشد الاسطوانية بطريقة اختبار الشد بالفلق Brazilian methodطبقا للمواصفات الأمريكية لاختبار المواد (ASTM C496-96)وذلك بنفس جهاز مقاومة الضغط حيث تم وضع العينات الاسطوانية بين فكي ماكينة الضغط .كما هو مبين في الشكل (2)

وقد أجريت اختبارات الشد لعينات المرحلة الأولى عند الأعمار 3– 28– 60)يوم (، أما عينات المرحلة الثانية فقد تم اختبارها في الأيام , (60 -28 –7)حيث تم اختبار ثلاثة نماذج اسطوانية في كل عمر ,وتمثل نتائج الاختبار المتوسط الحسابي للثلاثة نماذج .



الشكل (2) اختبار الشد غير المباشر

4-4-2اختبار الامتصاص(Absorption Test)

تم فحص الامتصاص بحسب مواصفات الجمعية الأمريكية لاختبار المواد (ASTM C 642–97)لثلاثة مكعبات مقاس 100مم بعد اليوم 28من المعالجة ,عن طريق تجفيف النماذج داخل الفرن لمدة 24ساعة في درجة حرارة º 110م ,ثم يتم وزنها وإعادتها إلى حوض الماء وتركها مدة 24ساعة حتى يثبت وزنها ,ثم يحسب مقدار الامتصاص طبقا للمعادلات الآتية:

$$\text{Absorption \%} = ((B - A) / A)*100$$

حيث إن B :وزن العينة مشبعة بالماء.
Aوزن العينة جافة.

5-4-2 اختبار النفاذية (Permeability Test)

تم اختبار النفاذية لثلاثة نماذج منشورية ذات أبعاد 120x200x200)مم ,(بعد مرور 28يوم من تاريخ الصب , بواسطة جهاز نوع (Controls)، حيث تم وضع نماذج العينة في الجهاز وتثبيتها جيدا ,ثم تم تعريض أحد أوجهها لضغط الماء المسلط من جهاز الضغط الهيدروليكي بمقدار (0.1 MPa)لمدة 48ساعة .ثم تم رفع ضغط الماء إلى (0.3 MPa)لمدة 24ساعة وبعد ذلك تم رفع الضغط إلى (0.7 MPa)لمدة 24 ساعة أخرى وبعد هذه الفترات من الضغط الهيدروليكي المتزايد تم فلق العينة مباشرة ,وتم قياس مقدار اختراق الماء في النماذج ,طبقا للمواصفات الألمانية [11] (DIN 1048)التي تصنف الخرسانة بأنها خرسانة غير منفذة إذا كان عمق اختراق الماء لا يزيد عن 5سم .و يحسب مقدار الاختراق كمتوسط حسابي لثلاثة نماذج في العينة الواحدة.

3-النتائج والمناقشة :

3-1مقاومة الضغط (Compression Strength)

3- 3-1 الخرسانة بدون استخدام المضاف الملدن(W/C=0.55) .

جميع نتائج اختبارات الضغط للخرسانة بإضافة نسب مختلفة من الطين المحروق إلى مكونات الخرسانة المرجعية مبينة في الجدول (4)والشكل . (3)
وقد أظهرت المكعبات الخرسانية الحاوية على نسبة 5%من الطين المحروق أفضل النتائج في مقاومة الضغط لكل الأعمار .بينما أظهرت النتائج أن مقاومة العينات الحاوية على 5%ميتاكاولين قد تفوقا على العينات المرجعية ، كما هو مبين في الشكل .(3)ففي اختبارات اليوم الثالث سجلت عينات الميتاكاولين (MK)زيادة في مقاومة الضغط بمعدل 27%بالمقارنة مع مقاومة ضغط المكعبات المرجعية .وقد لوحظ استمرار التفوق في كل الأعمار إلا أن معدل الزيادة قد اختلف إلى 13 % , 12 % , 22 % , 8 %في الأعمار 60 , 28 , 14 , 7يوم على الترتيب .
وهذه النتائج التي سجلت في هذا البحث لنسبة الإضافة 5%قد وافقت نتائج البحث الذي قدمه Jiping BAI, et al, 2004 [4]] [5]والتي كانت تمثل نسبة الإضافة 5%هي الأفضل من بين النسب الأخرى التي استخدمها في بحثه .
إلا أن هذه النسبة لم تكن هي الأفضل في البحث المقدم من [6]] Ong Chee [الذي وجد في بحثه أن تأثير استبدال 5%من وزن الأسمنت بمادة الميتاكاولين أظهر تفوق في مقاومة الضغط فقط في اليوم الأول بمعدل 35% , بينما أبدت نتائج الأيام اللاحقة نقص في مقاومة الضغط عن المرجعية مقداره 6%تقريبا في باقي أعمار الفحص .ومن المحتمل أن هذا الاختلاف قد يرجع إلى اختلاف نسب AL_2O_3 , SiO_2 , Ca في مكونات الأسمنت المستخدم في تلك الأبحاث وبين نسب مكونات الاسمنت العمراني المستخدم في هذا البحث وهذا يفسر أن نواتج الاماهة في الأسمنت العمراني من هيدروكسيد الكالسيوم أقل ولذلك فإن كمية قليلة من الميتاكاولين تبدو كافية لإكمال عملية التفاعل مع هذه النواتج وتحويلها إلى مواد متصلبة تضاف إلى نواتج التصلب الاعتيادي لاماهة الأسمنت.

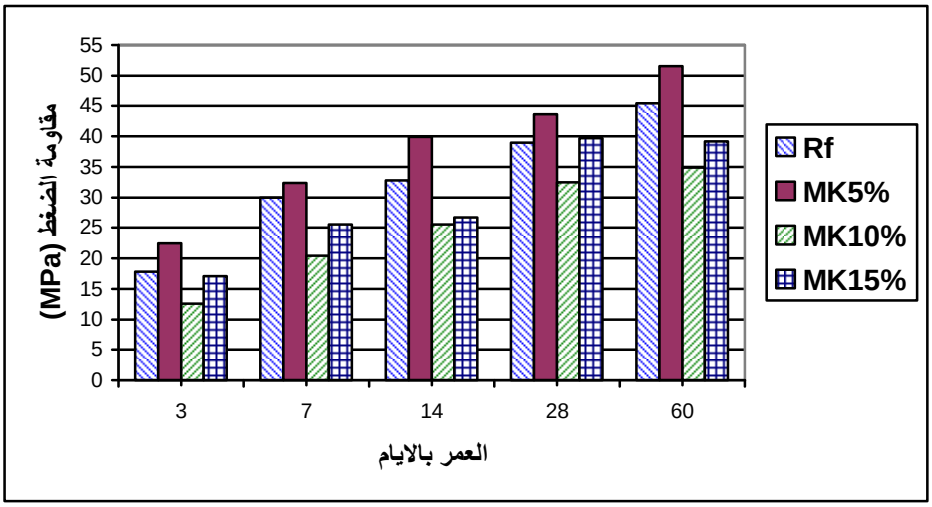
3-1-2الخرسانة مع استخدام المضاف الملدن:(W/C=0.4) .

نتائج مقاومة العينات الخرسانية التي تم فحصها في المرحلة الثانية من هذه الدراسة موضحة في الجدول (5)و الشكل . (4)من خلال هذه النتائج يلاحظ أن أعلى قيمة لمقاومة الضغط سجلتها الخلطات الحاوية على الطين المحروق .
وبينت النتائج أيضا أن تأثير المضافات البوزلانية لا تظهر في المراحل الأولى من التصلب وكما حصل في نتائج اليوم السابع حيث أن جميع نتائج الخلطات الخرسانية الحاوية على النسب 5%و 10%من الطين المحروق وأبخرة السليكا أقل بقليل من قيمة مقاومة المرجعية غير الحاوية على أية مضافات بوزلانية .في حين شهدت الفحوصات التي تمت بعد هذا اليوم تحسن ملحوظ وخاصة في اليوم . 60وهذا يخالف ما تقدم به [JIPING BAI ET.AL] [5]الذي توصل من خلال دراسته إلى أن استخدام الميتاكاولين كمضافات خرسانية مع الأسمنت البورتلاندي له تأثير إيجابي على مقاومة الخرسانة للضغط في كل الأعمار ومع مختلف نسب الماء إلى الأسمنت

, ((W/Cولكن الارتفاع الأكبر لمقاومة الضغط سجلت في الأيام الأولى مع تراجع ملحوظ في ارتفاع مقاومة الضغط في المراحل الأخيرة للمعالجة .

الجدول (4)نتائج مقاومة ضغط الخلطات الخرسانية بدون استخدام الملدن(W/C=0.55)

رقم الخلطة	W/C %	نوع المضاف	مقاومة الانضغاط في العمر (بالأيام) (MPa)					الامتصاص % عن العمر 28 يوم	الكثافة kg/m^3
			3	7	14	28	60		
Rf	55	بدون مضاف الملدن	17.79	30.00	32.74	38.96	45.50	2.93	2564
MK 5%	55		22.54	32.40	39.91	43.63	51.55	5.36	2555
MK 10%	55		12.57	20.60	25.57	32.48	34.88	2.99	2510
MK 15%	55		17.12	25.53	36.66	39.75	39.20	5.72	2508



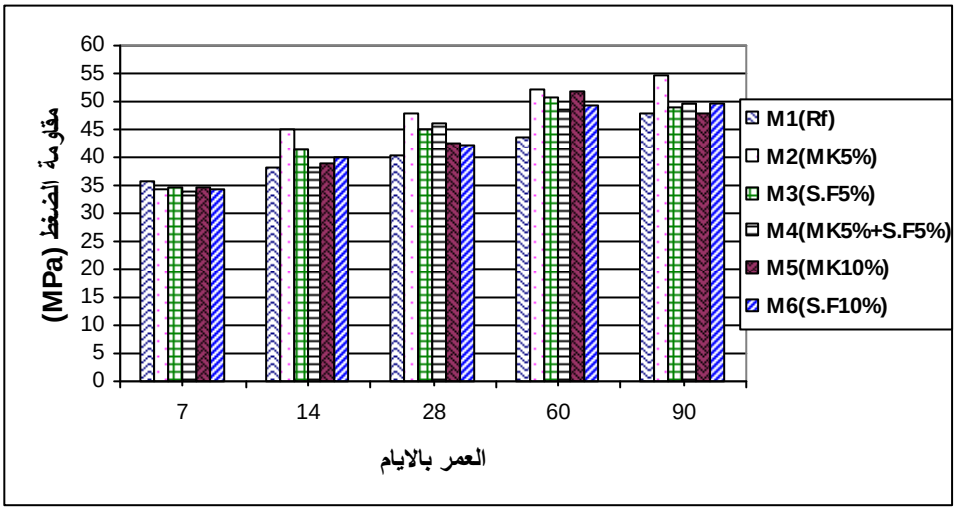
الشكل (3) مقاومة ضغط عينات الحاوية على الطين المحروق والمرجعية.**(W/C=0.55)**

يلاحظ من الشكل (4)أن مقاومة ضغط الخلطات الحاوية على 5%طين محروق في الأيام الأولى للتصلب ، أقل بقليل من العينات المرجعية وهذا ملاحظ تقريبا في جميع العينات الحاوية على نسب مختلفة من الطين المحروق وأبخرة السليكا .إلا أن تحسن مقاومة الضغط بدأت مع العينات المختبرة بعد يوم 14واستمرت الزيادة حتى اختبار اليوم 90، إلا أن أقصى قيمة لمقاومة الضغط في هذه العينات حدثت في اليوم . 60
ويلاحظ أن أعلى نسبة للزيادة في مقاومة الضغط في الخلطات الحاوية على الملدن المتفوق وصلت إلى أقصى مقاومة في العينات الحاوية على إضافة 5%طين محروق إلى مكونات الخرسانة من بين العينات الخرسانية

الحاوية على الملدن المتفوق ، وهذه النتيجة تؤكد نتائج العينات السابقة بدون استخدام المضاف الملدن التي بينت نتائجها أيضا تفوق العينات المضاف إليها 5%طين عن النسب الأخرى .

الجدول (5) نتائج مقاومة ضغط الخلطات الخرسانية باستخدام الملدن المتفوق.(W/C=0.4)

رقم الخلطة	W/C %	نوع المضاف	مقاومة الانضغاط في العمر)بالأيام (MPa)					الامتصاص % عند العمر 28 يوم	الكثافة kg/m^3
			7	14	28	60	90		
M1 مرجعية	40	خلطات باستخدام مضاف الملدنا لمتفوق	35.55	38.12	40.40	43.63	47.78	3.5	2510
M2 MK 5%	40		34.42	45.08	47.83	52.03	54.76	3.5	2556
M3 S.F5%	40		34.74	41.37	45.14	50.58	48.88	3.45	2534
M4 (MK + S.F)5%	40		33.78	38.14	45.90	48.64	49.77	2.53	2538
M5 MK 10%	40		34.75	38.95	42.39	51.71	48.00	2.57	2513
M6 S.F10%	40		34.32	39.91	42.17	49.45	49.77	2.72	2513



الشكل (4) مقاومة الضغط للعينات الحاوية على المضافات البوزلانية والمرجعية. (W/C=0.4)

2-3 مقاومة الشد (Tensile Strength)

1-2-3- الخرسانة بدون استخدام المضاف الملدن:(W/C=0.55) .

أظهرت العينات الحاوية على طين الكاولين المحروق تقدماً واضحاً في مقاومتها للشد بالمقارنة مع العينات المرجعية ، حيث يلاحظ من الشكل (5)والجدول (6)زيادة مقاومة الخرسانة للشد في الخلطات الحاوية على إضافة 5%طين محروق عن مقاومة الخرسانة المرجعية غير الحاوية على أي مضافات .وقد بلغت نسب الزيادة 10% , 13% , 20%عند العمر 60 , 28 , 3يوم على التوالي .بينما أظهرت نتائج مقاومة الخرسانة للشد في الخلطات الحاوية على نسب 10%و 15%طين محروق انخفاض في مقاومة الشد في اليوم الثالث بمقدار 7%و 22%على الترتيب .بينما أصبحت مقاومة الشد في الأيام (60 , 28)في عينات 10%مساوية مع عينات المرجعية مع زيادة نسبية في عينات 15%تصل إلى 10%في اليوم . 28ويلاحظ أن العينات الحاوية على نسب أقل من الطين المحروق تفوقت بشكل كبير على العينات الحاوية على نسب أكبر من الطين المحروق بالمقارنة مع العينات المرجعية .ويمكن تفسير ذلك إلى أن النسبة 5%من الطين المحروق تعتبر نسبة كافية لملء الفراغات في عجينة الأسمنت وكذلك التفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الناتج من عملية التفاعل الكيميائي بين الماء والأسمنت . وإن الزيادة من الطين على عملية الحشو والتفاعل الإضافي مع نواتج الإماهة تبقي زيادة من الطين كمادة خاملة وخاصة في المنطقة البينية التي تؤثر على عملية التماسك بين عجينة الأسمنت وحبيبات الركام .
ففي حالة إضافة 5%طين محروق إلى الخلطة الخرسانية تتفاعل مادة الطين المحروق مع هيدروكسيد الكالسيوم ($Ca(OH)_2$)وينتج عن طريق التفاعل تكوين مادة رابطة إضافية سيليكات الكالسيوم المائية (C-S-H)وبالتالي يتم استهلاك مركب هيدروكسيد الكالسيوم وتتلاشى المنطقة البينية (T.Z)مما يزيد من قوى الترابط بين الركام وعجينة الأسمنت .ونتيجة لذلك تزيد مقاومة الخرسانة للشد[8] [7]

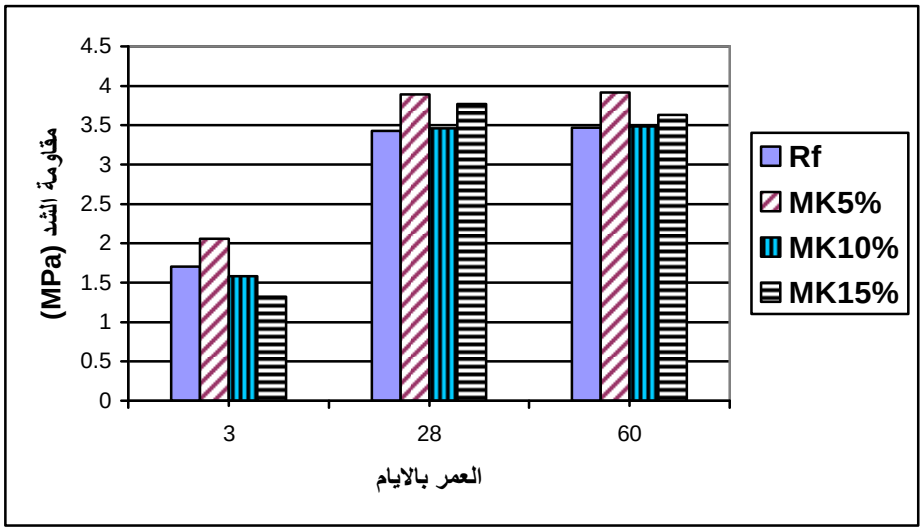
جدول (6)نتائج مقاومة العينات الخرسانية للشد بدون استخدام الملدن.

رقم الخلطة	W/C %	نوع المضاف	مقاومة الانضغاط في العمر (يوم) (MPa)			الكثافة kg/m^3
			3	28	60	
Rf	55	بدون مضاف الملدن المتفوق	1.70	3.43	3.47	2463
MK5%	55		2.06	3.89	3.92	2471
MK10%	55		1.58	3.46	3.49	2453
MK15%	55		1.32	3.77	3.63	2435

2-2-3-الخرسانة مع استخدام المضاف الملدن(W/C=0.4) .

من خلال نتائج فحص الاسطوانات الخرسانية لجميع الخلطات الخرسانية والمسجلة في الجدول (7)يمكن قراءة أهمية استخدام المضافات البوزلانية ودورها الفعال في تحسين مقاومة الخرسانة للشد، وفي الشكل (6) يظهر بوضوح التأثير الإيجابي لمادة طين الكاولين المحروق .وتأتي أهمية هذه المادة في تحسين خواص المنطقة البينية وزيادة قوة التماسك بين أسطح الأسمنت وتحويل هيدروكسيد الكالسيوم إلى مواد متصلبة تزيد من قوة التماسك في المنطقة البينية .وقد تفاوتت معدلات الزيادة في مقاومة الشد بحسب نسب الإضافة البوزلانية.
ومن النتائج يتضح أن إضافة الطين المحروق بنسبة 5%يزيد من مقاومة الشد مقارنة مع الخلطات المرجعية غير الحاوية على أية مضافات بوزلانية .حيث بلغت نسبة الزيادة 14%)، 7%، (6%في الأعمار7)،28، (60 يوماً على التوالي .ويلاحظ أيضاً أن معدل الزيادة في الأعمار المبكرة كانت هي الأكبر ثم تراجعت نسبة الزيادة في الأعمار 28، 60يوم .ويعزى ذلك إلى أن الطين المحروق في الأيام الأولى للتصلب قد يساهم في إزالة

هيدروكسيد الكالسيوم الناتج من عمليات الإماهة الطبيعية، في حين أن كمية الطين المحروق غير كافية في الاستمرار في عملية الإماهة الإضافية في الأعمار المتأخرة .



الشكل (5) مقاومة الشد في الخلطات المختلفة.(W/C=0.4)

بصورة عامة أظهرت العينات الحاوية على 10% طين محروق ارتفاع متزايد مع عمر العينات المختبرة ووجد من خلال النتائج أن مقاومة الخرسانة الحاوية على إضافة 10%طين محروق أكبر من المرجعية بمعدل 8%،10%، 28%في الأعمار 7)، 28، (60يوماً على التوالي .ويعزى هذا التحسن المتزايد في مقاومة الشد إلى استمرار عملية الإماهة الإضافية مع زيادة عمر العينة .وهذا يعني أيضا أن كمية الطين كافية للاستمرار في عملية التفاعل مع نواتج الإماهة الطبيعية بين الأسمنت والماء)هيدروكسيد الكالسيوم (وبذلك تزداد مقاومة الخرسانة للشد بشكل أفضل من تلك التي حدثت مع العينات الخرسانية المضاف إليها MK 5%فقط حيث بدأت الزيادة تظهر بشكل أكبر في المرحلة الأولى من عملية التصلب وبعد ذلك قلت في الأعمار المتأخرة كما أن مادة الطين المحروق (MK)تعمل على تكوين مادة رابعة إضافية من مادة الجل (Gel)تزيد من قوة الترابط بين مكونات الخرسانة بالإضافة إلى قدرة الطين المحروق في استهلاك مركب هيدروكسيد الكالسيوم $CA(OH)_2$ الناتج من عملية الإماهة والذي يسبب في تكوين طبقة عازلة بين أسطح الركام وعجينة الأسمنت .ففي حالة إضافة (MK)للخلطة الخرسانية تتفاعل مكونات الطين من Sio_2 وAl_2o_3مع مركب هيدروكسيد الكالسيوم وينتج عن هذا التفاعل تكوين مادة رابطة إضافية من سيليكات الكالسيوم المائية (C-S-H)وبالتالي يتم استهلاك مركب $Ca(OH)_2$وتتلاشى المنطقة البينية (T.Z)مما يزيد من قوة ترابط بين الركام وعجينة الأسمنت ونتيجة لذلك تزيد مقارنة الخرسانة للشد.

3-3 تأثير الطين المحروق على متانة الخرسانة مع المضاف الملدن(W/C=0.4)

3-3- 1 تأثير إضافة الطين المحروق على امتصاص الخرسانة :

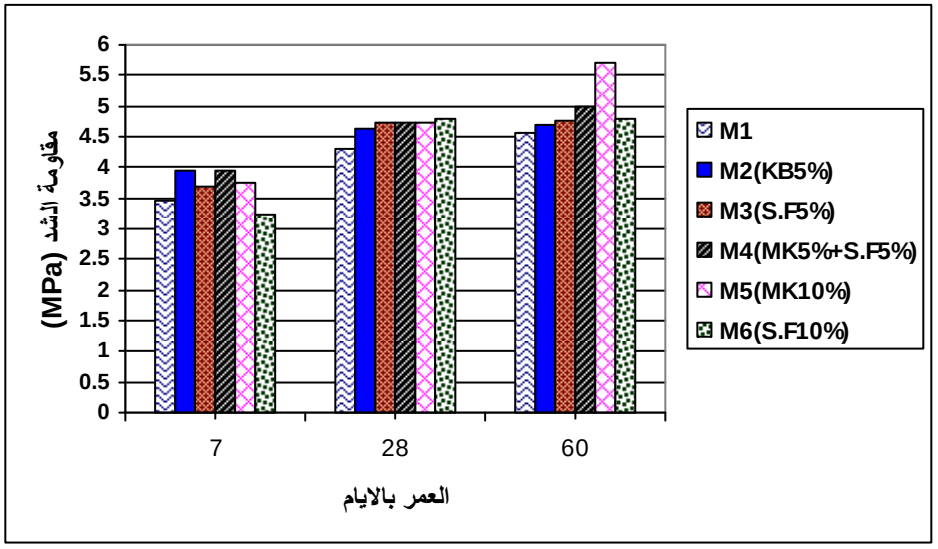
تعتبر خاصية الامتصاص ذات صلة بمقاومة الخرسانة للظروف الجوية ,ففي حالة عدم نفاذ الماء إلى داخل المسامات ,يكون التلف الناتج عن ظروف الانجماد والذوبان أو عن دخول الماء الحاوي على مواد ضارة مثل الأملاح والكبريتات معدوما [9].

ومن خلال النتائج الموضحة في الجدول (7)والشكل (7)يتضح أن للمواد البوزلانية تأثير كبير في تقليل المسامات والفجوات التي تحدث في عجينة الاسمنت وفي المنطقة البينية أيضاً وذلك بسبب التأثير الفيزيائي لعملية ملء المسامات نتيجة لنعومة المواد البوزلانية وصغر حجم حبيباتها ونتيجة للتفاعل الكيميائي الذي يحدث بين

المواد البوزلانية المتمثلة بثاني أكسيد السيلكون (SiO_2)ومركب هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$الضارة وتحويلها إلى مادة رابطة إضافية تسمى الجل (Gel)تقوم بملء ما تبقى من المسامات مما يجعل الخرسانة الناتجة كتيمة وغير منفذة[8] .

جدول (7) نتائج مقاومة العينات الخرسانية للشد باستخدام الملدن.

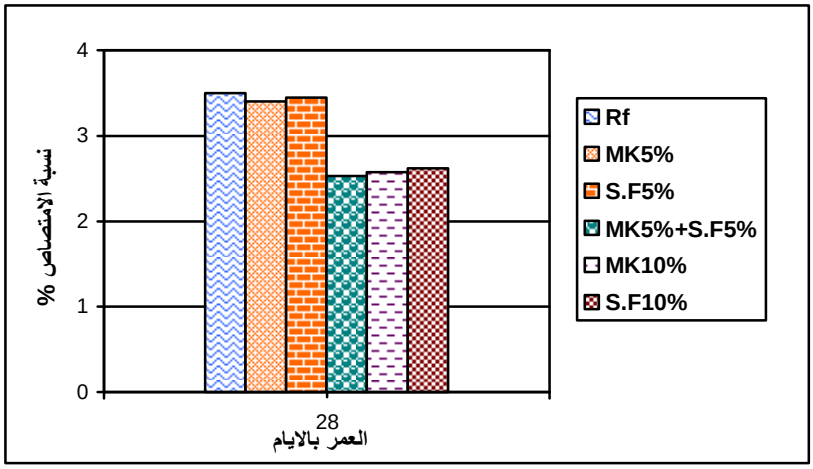
رقم الخلطة	W/C %	نوع المضاف	مقاومة الانضغاط في العمر (بالأيام) (MPa)			الكثافة kg/m^3
			7	28	60	
M1 مرجعية	40	خلطات مع مضاف الملدن المتفوق	3.46	4.30	4.57	2481
M2 MK5%	40		3.96	4.62	4.70	2491
M3 S.F5%	40		3.68	4.72	4.76	2496
M4 MK+S.F)5%)	40		3.95	4.72	5.00	2451
M5 MK10%	40		3.75	4.72	5.70	2484
M6 S.F10%	40		3.22	4.78	4.78	2453



الشكل (6) تأثير نسب المضافات البوزلانية على مقاومة الخرسانة للشد.(W/C=0.4)

جدول (7) قيم امتصاص العينات الخرسانية

نوع الخلطة	W/C	SP.%	الامتصاص % عند العمر 28 يوم
مرجعية	0.4	4	3.50
حاوية على 5 % MK	0.4	4	3.40
حاوية على 5 % S.F	0.4	4.5	3.45
حاوية على S>F% 5+MK%5	0.4	4.5	2.53
حاوية على 10% MK	0.4	4.25	2.57
حاوية على 10 % S.F	0.4	5	2.62



الشكل (7) تأثير الطين المحروق وأبخرة السيليكا على امتصاص الخرسانة.

إن تأثير إضافة 5%من الطين المحروق إلى مكونات الخرسانة أبدت تأثير طفيف في تغير خاصية الامتصاص بالمقارنة مع العينات المرجعية .وقد يفسر ذلك بأن كمية الطين غير كافية لتحقيق وإنجاز عمليتي التفاعل الكيميائي مع نواتج الإماهة الطبيعية بين الاسمنت والماء وكذلك عملية الحشو)ملء المسامات بالحبيبات الناعمة (ويؤكد هذا التفسير تقارب نتائج نسب الامتصاص في عينتي الطين المحروق وأبخرة السليكا لنفس الكمية المضافة.

يتضح من النتائج الموضحة في الجدول (7)والشكل (7)أن الطين المحروق يلعب دور فعال في إقفال وتصغير المسامات ,حيث تقلصت نسبة الامتصاص إلى 2.57%بالمقارنة مع 3.5 % التي حققتها العينات المرجعية .حيث حققت العينات الخرسانية الحاوية على نسبة 10%من الطين المحروق انخفاضا قدره 73% بالمقارنة مع العينات المرجعية .بينما انخفضت نسبة الامتصاص في العينات الحاوية على S.F%10بمقدار 75%عن العينات المرجعية .ويعزى سبب الانخفاض في نسبة الامتصاص في خرسانة الحاوية على الطين المحروق وأبخرة السليكا إلى الدور الكبير الذي تلعبه المضافات البوزلانية في سد معظم المسامات ,حيث تقوم بإقفال وملء المسامات بسبب نعومتها العالية وصغر حجم حبيباتها مما يجعلها تنحشر في المسامات الصغيرة وتعمل على سدها ويسمى هذا بالتأثير الفيزيائي .وهناك تأثير إيجابي آخر يسمى بالتأثير البوزلاني ,حيث تقوم المضافات البوزلانية مثل الطين المحروق وأبخرة السيليكا الحاويتان على مركب ثاني أكسيد السيلكون ($_2SiO$) بالتفاعل مع مركب هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$وتحويلها إلى مادة رابطة إضافية من هيدروكسيد سيليكات الكالسيوم (C-S-H)تقوم هذه المادة بملء ما تبقى من مسافات بمادة متصلبة مما يجعل الخرسانة الناتجة عالية

الكثافة وكتيمه وغير منفذة . [8]وعند مقارنة الخرسانة الحاوية على المضافات البوزلانية (S.F) , (MIC)مع مواصفات الجمعية الأمريكية لفحص المواد [10] (ASTM C 642- 97)التي تشترط ألا تزيد نسبة امتصاص الخرسانة عالية الكفاءة عن , % 5نلاحظ أن جميع العينات بما فيها المرجعية تقع ضمن حدود أقل من حدود مواصفات الجمعية الأمريكية .كما سجلت نتائج العينات الخرسانية الحاوية على إضافة مشتركة نسبة 5%طين محروق و 5%أبخرة السيليكا أقل نسبة امتصاص مقدارها 2,53%بمعدل 72%اقل عن المرجعية وتمثل أقل نسبة امتصاص بين عينات الخلطات الخرسانية الأخرى .

ويمكن تفسير ذلك الانجاز الكبير الذي حققته الإضافة المشتركة من S.F , MK إلى تحسن خاصية التدرج الحبيبي في الخليط الأسمنتي المكون من أبخرة السيليكا عالية النعومة والتي تصل مساحتها السطحية إلى أكبر من 30م²/جم والطين المحروق الذي تأتي مساحته السطحية اقل من أبخرة السليكا وأكبر من الأسمنت .وهذا ما جعل الخليط الأسمنتي عالي التدرج يساهم بشكل أفضل في عملية توزيع ورص الحبيبات وملء الفراغات والمسامات في عجينة الأسمنت .بالإضافة إلى إسهام الخليط البوزلاني في عملية الإماهة بين ثاني أكسيد السليكون SiO_2و نواتج الإماهة الطبيعية بين الأسمنت والماء.

2-3-3 -تأثير إضافة الطين المحروق على نفاذية الخرسانة :

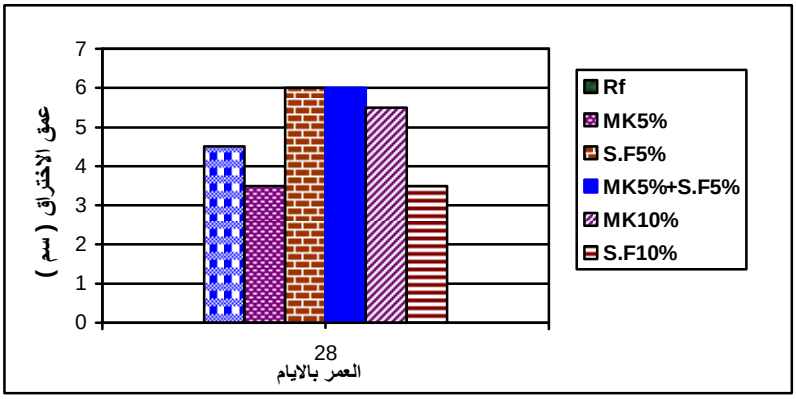
يلعب الطين المحروق دوراً إيجابياً في تحسين مقاومة الخرسانة ومنع اختراق السوائل من خلالها .والخرسانة بطبيعتها مادة مسامية واتصال الفجوات الداخلية هو الذي يؤدي إلى زيادة النفاذية .ومن آجل زيادة تحمل الخرسانة مع الزمن يمكن القول أنه في حالة إضافة نسبة 5%من الطين المحروق إلى مكونات الخرسانة ساهم بشكل واضح في تقليل مقدار اختراق السوائل إلى جسم العينات الخرسانية بالمقارنة مع العينات المرجعية غير الحاوية على أية مضافات معدنية .ويظهر من خلال النتائج الموضحة في الجدول (8)و الشكل (8)التأثير الايجابي لمقاومة النفاية في العينات MK 5%، حيث أدت هذه الإضافة إلى تخفيض اختراق الماء لجسم العينات الخرسانية بنسبة 22%مقارنة مع عينات الخرسانة المرجعية شكل 9)و . (10

ويلاحظ أن متوسط عمق اختراق الماء لجسم العينات MK 5%أقل من أقصى قيمة حددتها الموصفات الألمانية [DIN 1048] [11].وعلى هذا تعتبر هذه العينات غير منفذة .ويمكن تفسير سبب التحسن في مقاومة النفاذية إلى ملء معظم المسامات بدخول حبيبات الطين الناعمة جدا فيها وتحويل الماد غير المتصلبة الناتجة من عمليات الإماهة الاعتيادية بين الاسمنت والماء إلى مواد رابطة إضافية تقوم بسد معظم ما تبقى من فراغات .ويتبين من الشكل (11)إن تأثير زيادة الجرعة من الطين المحروق إلى مكونات الخرسانة يزيد في نفاذيتها .حيث أبدت العينات الحاوية على نسبه 10%من الطين المحروق من وزن الأسمنت تراجع في تحسن نفاذية الخرسانة حيث سجلت اختبارات النفاذية عمق اختراق الماء لهذه العينات مقداره 5.5سم بالمقارنة مع عمق اختراق مقدار 4.5سم للعينات المرجعية .

وقد يفسر ذلك إلى زيادة كمية الطين المضافة والتي قد يستهلك جزء منها فقط في عملية إملاء المسافات والإماهة الإضافية مع نواتج الإماهة الطبيعية ، بينما الجزء الباقي من الطين المحروق يبقى كمادة خاملة قد تساهم في زيادة نفاذية الخرسانة وذلك بامتصاص واختراق الماء إلى جسم الخرسانة .ويلاحظ أن هذه العينات لا تطابق المواصفات الألمانية التي تصنف الخرسانة غير المنفذة بأنها تلك الخرسانة التي لا يزيد عمق اختراق الماء لجسمها عند تعريضها لضغط الماء عن 5سم .

جدول (8) مقدار الاختراق في العينات الخرسانية .

نوع الخلطة	عمق الاختراق (سم) عند 28 يوم	نوع الخلطة	عمق الاختراق (سم) عند 28 يوم
مرجعية	**4.5**	حاوية على 5% MK+5% S.F	**6**
حاوية على MK	**3.5**	حاوية على10% MK	**5.5**
حاوية على 5% S.F	**6**	حاوية على 10% S.F	**3.5**

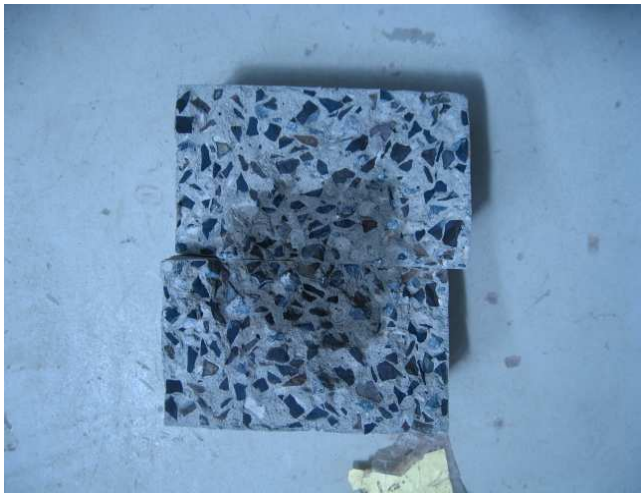


الشكل (8) تأثير نوع ونسبة الإضافة على نفاذية الخرسانة

الشكل (9) مقدار عمق اختراق الماء في
العينات الحاوية 5%طين محروق

الشكل (10)مقدار عمق اختراق
الماء في العينات المرجعية.

الشكل (11)اختراق الماء في العينات
الحاوية 10%طين محروق



الشكل (12)مقدار عمق اختراق الماء في
.العينات الحاوية على الإضافة المشتركة .

4 -الاستنتاجات

- أوضحت النتائج أن إضافة طين الكاولين المحروق إلى مكونات الخرسانة له تأثيراً إيجابياً على مقاومة الضغط في كل ألا عمار .
- يختلف تأثير طين الكاولين المحروق على مقاومة الخرسانة للضغط بحسب نسبة الإضافة ، حيث سجلت النسبة 5%أفضل زيادة في مقاومة الضغط بالمقارنة مع النسب 10%و . 15%
- أشارت نتائج العينات الخرسانية ذات نسبة الماء إلى الأسمنت (W/C=0.55)زيادة في مقاومة الضغط مقدارها % 22في الأيام الأولى من التصلب على خلاف ما سجلته العينات الحاوية على (W/C=0.4) الذي أبدت انخفاض في مقاومة الضغط بمقدار (5% -2)بالمقارنة مع المرجعية .
- في مراحل التصلب الأخيرة أبدت عينات الـ 5%طين الكاولين الحاوية على النسبة (W/C=0.40)مقاومة ضغط أعلى من مقاومة ضغط العينات المرجعية حيث وصلت الزيادة إلى . 19%بينما سجلت عينات الـ 5% طين الكاولين الحاوية على النسب (W/C=0.55)أعلى زيادة . 13%
- يلاحظ تفوق عينات طين الكاولين المحروق في مقاومة الضغط على عينات أبخرة السليكا في حالة إضافة 5%من وزن الأسمنت .بينما أظهرت نتائج إضافة 10%تقارباً كبيراً بين عينات طين الكاولين وأبخرة السليكا.
- يؤثر طين الكاولين المحروق المضاف إلى الخرسانة على تحسين مقاومة الشد ,حيث لوحظ زيادة متفاوتة في قوة الشد في جميع العينات المضاف إليها طين الكاولين وأبخرة السليكا .حيث أظهرت العينات الحاوية على نسب 5%من وزن الأسمنت وذات نسبة W/C=0.55تحسناً واضحاً في مقاومة الشد في الأعمار المبكرة ,ثم تراجعت هذه الزيادة في الأعمار المتوسطة وما بعدها ، في حين لم تظهر العينات الحاوية على نسب 10%أي تحسن يذكرفي مقاومة الشد.بينما أظهرت العينات الحاوية على 15%تحسناً ملحوظاً في الأعمار فوق 28يوم وذلك بالمقارنة مع عينات الأسطوانات المرجعية.
- لوحظ أيضاً أن عينات الإضافة المشتركة أبدت تفوقاً واضحاً في مقاومة الشد على العينات المرجعية و العينات الأخرى .
- أبدت العينات الخراسانية الحاوية على طين الكاولين قليلاً من التفوق في زيادة مقاومة الشد بالمقارنة مع عينات أخرة السليكا لنفس نسبة الإضافة .
- تشير نتائج العينات الحاوية على طين الكاولين المحروق بنسبة 5%من وزن الاسمنت انخفاضاً ملحوظاً في درجة الامتصاص .حيث سجلت هذه العينات اقل نسبة امتصاص بالمقارنة مع العينات المرجعية غير الحاوية على أية مضافات بوزلانية .

- العينات الحاوية على نسبة 10%من طين الكاولين حققت أيضا اقل درجة امتصاص من بين جميع العينات الحاوية على طين الكاولين وأبخرة السليكا .بالمقارنة مع العينات المرجعية .
- أبدت العينات الحاوية على الإضافة المشتركة لطين الكاولين وأبخرة السليكا انخفاضاً كبيراً في درجة الامتصاص بالمقارنة مع درجة امتصاص العينات المرجعية .
- أظهرت عينات طين الكاولين درجة امتصاص اقل من عينات أبخرة السليكا .في كل من العينات الحاوية على نفس نسبة الإضافة .
- أبدت العينات الحاوية على طين الكاولين بنسبة 5%مقاومة جيدة لنفاذية الماء من خلال جسمها مقارنة مع العينات المرجعية بينما لم تظهر عينات 10%طين الكاولين المحروق مقاومة كافية ضد اختراق الماء خلال جسمها في حين أبدت عينات طين الكاولين ذات النسبة 5%تفوقاً كبيراً على نظيرتها في نسبة الإضافة لأبخرة السليكا إلا أنه حدث العكس بين عينات الطين المحروق وأبخرة السليكا ذات الإضافة 10% من وزن الأسمنت .

REFERENCES

1- Neville A., and Aitcin, P.-C., " Hight performance Concrete– An overview " , Materials and Structures, 31, 111-117 (1998)

2- J. Ninov , I. Donchev , A. Lenchev , I. Granchavov, " Chemical Stabilization of Sand Iillite Clay "Faculty of Chemistry 1 James Bouchier , 1126 Sofia , Bulgaria . 2003.

3- Karsten Mitlrath, " Modifying Concrete Matrices With Beneficiated Dredged Material or Other Clayey Constituents " a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Columbia University , 2003.

4- Amer Bin Yusuff, "Behavior of high Strength Reinforced Concrete Beam_with Metakaolin under Static Loading " Project Report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering . Faculty of civil engineering, University Teknologi Malaysia April 2005

5- Jiping Bai , Stan Wild , Albinas Gailius, " Accelerating Early Strength Development of Concrete Using Metakaolin as an Admixture " School at Technology University of Glamorgan , Pontypridd , CF 37 1DL , United Kingdom . sep. 2004

6- Ong chee huat. "performance of concrete containging metakaolin as cement replacement material" aproject report submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of master of engineering structures. Faculty of civil engineering university technology maleysia nov.2006.

7- David Trejo and Ceki Halmen , " Evaluation of Thiele Metakaolin for applications in Concrete " Department of civil engineering . Texas A&M University .August, 2006 .

8- Salih, S. A., " Permeability and pore Structure of Cementitous Composites " Ph. D. Thesis, University of Sheffield . 1987

9- A. Darweesh, " Concrete Mixture " , Faculty of Engineering , University of Asuot .

10- " Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete " , ASTM C 642-97

11- Deutsches Institute fur Normung , DIN 1048, " Test Method for Concrete " December 1978.