محاكاة حاسوبية لتجمد مسبوكات الألمنيوم في القوالب الدائمة[1]

المهندس محمود الحناوي[2] الدكتور خليل عزيمة[3]

الدكتور آلن كليج[4]

الملخص

يُنْتَجُ عدد هائل من القطع و الأجزاء الميكانيكية المعدنية باستخدام عملية السباكة. تعتمد جودة المنتجات المسكوبة من حيث المتانة والشكل بقدر كبير على عملية تجمد المعدن بعد السكب وطريقة انتقاله من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة. اقْتُرِحَ في هذه الدراسة نموذج محاكاة حاسوبية لعملية تجمد مسبوكة من معدن الألمنيوم النقي في قالب معدني من الحديد الصب وذلك بالاستعانة بالمعادلات الرياضية التي تصف عملية التجمد المنشورة في المقالات المحكمة و باستخدام برنامج محاكاة حاسوبي متطور. و قُورِنَتِ النتائج الحاسوبية مع التجارب العملية التي أُجْرِيَتْ على مسبوكات مماثلة (من حيث الشكل الهندسي والمعدن المسكوب) و ذلك بمقارنة منحني التبريد الناتج عن عملية المحاكاة الحاسوبية مع منحني التبريد النتاتج من أخذ قراءة الحرارة في المسبوكة خلال التجارب العملية. بينت الدراسة وجود تقارب كبير بين الحل الحاسوبي والتجربة العملية مما يتيح الاستنتاج بصلاحية النموذج الحاسوبي للتطبيق العملي.

الكلمات المفتاحية: سباكة المعادن، محاكاة التجمد.

[1] أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للطالب المهندس محمود الحناوي بإشراف الدكتور المهندس خليل عزيمة ومشاركة الدكتور آلن كليج.

[2] قسم هندسة التصميم الميكانيكي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

[3] قسم هندسة التصميم الميكانيكي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

[4] قسم هندسة التصنيع، كلية ولفسون لهندسة الميكانيك والتصنيع، جامعة لافبرا، انكلترا.

1- مقدمة

تستخدم المحاكاة الحاسوبية لتمثيل عمليات أو ظواهر حقيقية باستخدام برامج مناسبة على الحاسب الآلي، حيث يزود الحاسب بالمعادلات الرياضية التي تحكم أو تمثل تلك العملية (أو الظاهرة) وتحدد الشروط الحدية لتلك المعادلات و يزود بالقيم الابتدائية لعدد من المتغيرات، ثم يطلب من البرنامج حساب أحد المتغيرات الأخرى (أو أكثر) وإظهار النتائج بأشكال مختلفة يمكن اختيارها(رقمية، صور، منحنيات بيانية....).

تستخدم المحاكاة الحاسوبية بكثرة في أيامنا هذه نظراً لما تؤمنه من إمكانية التنبؤ بالنتائج المستقبلية لمواضيع مختلفة مما يُمكّن من اتخاذ إجراءات استباقية (أو تعديلات) تجعل التوقعات المستقبلية مناسبة لما نحتاجه كما يحدث عندما تستخدم لتمثيل العمليات التصنيعية، أو في حالات أخرى تمكننا من التهيؤ للنتائج المتوقعة إذا لم يكن بالإمكان تغييرها كما يحدث في برامج المحاكاة الحاسوبية لحالة الطقس مثلاً.

يتعلق هذا البحث بإجراء عملية محاكاة حاسوبية لعملية تجمد المعدن المصهور (solidification process) عند السباكة بالقوالب الدائمة (Permanent Mould Casting) يُستَخْدَمُ فيها القالب المعدني المكون من قطعتين (أو أكثر) بشكل متكرر لإنتاج مسبوكات من الشكل نفسه حيث يُدْخَلُ المعدن إلى فجوة القالب بتأثير وزنه فقط (الجاذبية). السباكة بالقوالب الدائمة مناسبة بشكل خاص لإنتاج مسبوكات بكميات كبيرة والتي لها سماكة جدران متساوية تقريباً. و يمكن أن يسكب بهذه الطريقة الألمنيوم والمغنيزيوم و الزنك و خلائط النحاس و الحديد الرمادي الهيبريوتكتويدي.

لمنع حدوث عيوب بالمسبوكات المنتجة يتم فحص كل تصميم جديد لقالب باستخدام نموذج أولي تجريبي (Prototyping) فيصنع قالب بالأبعاد الحقيقية وتجرى عليه تجارب سباكة حقيقية ثم تفحص النتائج و يعدل تصميم القالب بحيث يتم التخلص من العيوب و يسكب فيه ثانية و تفحص النتائج و هكذا حتى الوصول إلى نتائج مرضية.

إن إنتاج النموذج التجريبي للقوالب الدائمة يمكن أن يكون باهظ التكاليف و ذلك بسبب

التكلفة المرتفعة لتصنيع القالب فضلاً عن الزمن والجهد المبذول في التعديل و التجارب المتكررة. إضافة إلى ذلك فإنه لا يمكن بالطرائق التقليدية التنبؤ بالإجهادات الداخلية الناتجة ضمن المسبوكة خلال هذه التجارب و يستلزم الأمر الانتظار إلى حين القيام بعمليات التشغيل للمسبوكة التي يتم خلالها (في كثير من الحالات) تحطم العديد من المسبوكات بسبب الإجهادات الداخلية الناشئة بداخلها، أو وضع المسبوكة في العمل الحقيقي و مراقبة النتائج فترة زمنية طويلة للحصول على معلومات عن وجود إجهادات داخلية خطيرة أو سلامة المنتج و إمكانية استخدامه بأمان فترات طويلة.

إن استخدام المحاكاة العددية في مرحلة التصميم تخفض تكاليف النماذج الأولية للقوالب التجريبية وتسرع عملية التصميم حيث يمكن التنبؤ بأجزاء القالب التي قد تسبب عيوباً بالمسبوكات و إصلاحها باستخدام الحاسب الآلي و دون الحاجة للنموذج التجريبي، فضلاً عن إمكانية التنبؤ بالإجهادات الداخلية المتكونة داخل المسبوكة من خلال نمذجة عملية التجمد، ومن ثَمَّ اقتراح الحلول و تجريبها حاسوبياً حتى الوصول إلى نتائج مرضية [1].

تستخدم صناعة المسبوكات بشكل أكثر هذه الأيام النمذجة العددية مع التحقق التجريبي لعمليات تجمد المسبوكات و ذلك لتقليل زمن التصميم و تحسين عملية التصنيع عموماً بحيث تنخفض تكاليف الإنتاج وزمنه [2].

يجب الاعتراف أنه من الصعب جداً نمذجة عمليات السباكة بدقة متناهية بسبب الظواهر الفيزيائية المعقدة المرتبطة بها و التي تتضمن فيما تتضمنه ميكانيك الموائع مع تغير الطور و انتقال الحرارة بين المسبوكة والقالب والمحيط الخارجي و ظاهرة التقلص والمسامية و الإجهادات الحرارية و ظاهرة الإنعزال (macrosegregation) في الخلائط، كما أن تعقيد شكل العناصر الميكانيكية يزيد من تعقيد عملية النمذجة والمحاكاة. إن كَلاً من هذه الظواهر هو مجال لبحوث كثيرة، حيث تتطور هذه

التقنيات بسرعة كبيرة بسبب التنافس الكبير بين الشركات لزيادة الأرباح وخفض التكاليف [3].

إن مفاهيم التجمد وطرائقها قد دُرِسَتْ وحُلِّلَتْ بشكل معمق في كثير من المنشورات [4] [5] و[6] و مع تطور تكنولوجيا الحاسبات الآلية والطرائق العددية أصبح من الممكن الربط بين نمو البنية المجهرية و ظاهرة الانتقال على شكل نموذج رياضي يعتمد على المعادلات الأساسية للطاقة و الكتلة و القدرة الحركية، و بتراكم هذه المعلومات تطورت أنواع مختلفة من النماذج الرياضية للتنبؤ بالبنية المجهرية للمسبوكات [7] و[8] و[9].

تعتمد الفكرة الأساسية للنمذجة الرياضية على تقسيم الفراغ الحسابي (الذي تشكله المسبوكة بشكلها وأبعادها) إلى سلسلة من العناصر المرتبطة فيما بينها، بحيث تمثل كل منها نظاماً مفتوحاً بالنسبة للتبادل الحراري و لكنها تكون مستقلة عندما يتعلق الأمر بنمو البنية المجهرية. و حتى تكون عملية المحاكاة قابلة للتطبيق يجب اعتماد عدد من الفرضيات التقريبية لتمثيل عملية التصلب و التي تعتمد على نوع عملية السباكة [3].

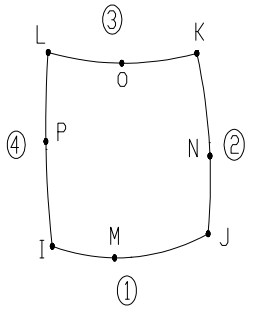
2- تحليل العناصر المتناهية الصغر (Finite Element Analysis)

إن أي نموذج رياضي مقبول يجب أن يكون قادراً على تمثيل تغيرالبارامترات المؤثرة كما تحدث في الواقع، بحيث نستطيع توقع تأثيرها في المنتج النهائي. نظراً لأنَّ كل العملية تعتمد على التدفق الحراري من المسبوكة إلى القالب و من ثَمَّ إلى المحيط الخارجي، فمن المنطقي تحديد الحقل الحراري في مراحل مختلفة من العملية.

منذ ظهور المقالة الرائدة لـ سارجانت و سلاك ((Sarjant and Slack (1954 عن النمذجة الرياضية لتجمد المسبوكات، نُشِرَت العديد من الدراسات عن تطور النمذجة الرياضية لحساب عملية التجمد في المسبوكات. ورغم أن التجمد هو عملية ثلاثية

الأبعاد، إلا أنه يمكن الحصول على نتائج مقبولة باستخدام نمـوذج ثنـائي الأبعـاد و خاصة في الأشكال غير المعقدة (الإسطوانية مثلاً).

إن النموذج الحراري المطبق هنا يستخدم طريقـة غـاليركين (Galerkin Method) [10] و عناصر متناهية الصغر مضلعة الشكل ثمانية العقد متماثلة الخـواص (eight node quadratic isoparametric elements) (شكل رقم 1) وهي عناصر تمكننا من تمثيل تغير الناقلية الحرارية مع تغير الزمن و نمذجة انتقال الحـرارة فـي الفجـوة الهوائية التي تتشكل بين المسبوكة وسطح القالب.



شكل (1) – رسم تخطيطي لعنصر متناهي الصغر مضلع الشكل ثماني العقد متماثل الخواص

معادلات التدفق الحراري للعناصر المتناهيـة (Finite-element formulation of the heat-flow) [11]:

بشكل عام، فإن تغير درجة الحرارة T مع تغير الزمن بمنطقـة ثنائيـة الأبعـاد Ω محاطة بمنحني Γ تعطى بالمعادلة الآتية:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \qquad \ldots\ldots (1)$$

حيث:

ρc – السعة الحرارية للمادة.

k_x, k_y–الناقلية الحرارية بالاتجاه الأفقي x و الشاقولي y.

الشروط الحدية لهذه المعادلة التفاضلية الجزئية هي معادلات التدفق الحراري بين المسبوكة والقالب من جهة وبين القالب و الجو المحيط من جهة أخرى. و هي كما يأتي:

أ– بين المسبوكة والسطح الداخلي للقالب:

$$q_{12} = h_{12}(T_1 - T_2) = (k_{12} / d_{12})(T_1 - T_2) \qquad \text{.... (2)}$$

حيث:

h_{12} – معامل الانتقال الحراري بين سطح المسبوكة والسطح الداخلي للقالب.

T_1 – درجة حرارة سطح المسبوكة.

T_2 – درجة حرارة السطح الداخلي للقالب.

k_{12} – الناقلية الحرارية بين سطح المسبوكة والسطح الداخلي للقالب.

d_{12} – عرض الفجوة الهوائية بين سطح المسبوكة والسطح الداخلي للقالب.

ب– بين السطح الخارجي للقالب و الجو المحيط:

$$q_{3\infty} = h_{3\infty}(T_3 - T_\infty) \qquad \text{..... (3)}$$

حيث:

$q_{3\infty}$ _ التدفق الحراري بين السطح الخارجي للقالب و الجو المحيط.

$h_{3\infty}$ – معامل الانتقال الحراري بين السطح الخارجي للقالب و الجو المحيط.

T_3– درجة حرارة السطح الخارجي للقالب.

T_∞– درجة حرارة الجو المحيط.

تتغير قيمة معامل انتقال الحرارة h_{12} عندما تتشكل الفجوة الهوائية بين المسبوكة والقالب. و لأخذ هذه الظاهرة بالحسبان فإن h_{12} تُعَدُّ تابعاً للموضع على سطح المسبوكة والزمن. وقد استنتج أوترز ورفاقه (Oeters et al) [12] أن الحسابات تكون متوافقة إلى حد مقبول مع التدفق الحراري الفعلي في الفجوة الهوائية فيما لو اعتبرنا أن سماكة تلك الفجوة هو 0.5 ملم. و قد اِسْتُخْدِمَتْ هذه القيمة في هذا النموذج عند حساب الانتقال الحراري عبر الفجوة الهوائية بين سطح المسبوكة الخارجي والسطح الداخلي للقالب.

حُسِبَتِ الحقول الحرارية في المسبوكة و القالب بشكل متزامن باستخدام معادلات العناصر المنتهية (Finite Elements). فقد قسمت المنطقة المدروسة إلى عدد من العناصر المتماثلة ثمانية العقد Ω^e، بمحيط Γ^e له شكل مضلع N_i يتعلق بكل عقدة.

تُحْسَبُ درجة الحرارة التقريبية T في الحل ضمن المنطقة المدروسة لكل عنصر في أي زمن بالعلاقة:

$$T = \sum_{i=1}^{n} N_i T_i(t). \qquad \text{.... (4)}$$

حيث:

$T_i(t)$- درجة الحرارة التابعة للزمن عند العقدة i.

N_i- شكل المضلع

بتعويض المعادلة (4) في المعادلة (1) و تطبيق طريقة غاليركين (Galerkin Method)[10] نحصل على المعادلة المصفوفية التركيب الآتية:

$$\mathbf{KT} + \mathbf{C\dot{T}} = \mathbf{F}, \qquad \text{.... (5)}$$

حيث إنَّ عناصر المصفوفة هي:

$$K_{ij} = \sum_{e} \int_{\Omega^e} \left(K_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega + \sum_{e} \int_{\Gamma^e} h N_i N_j d\Gamma, \quad .. (6)$$

$$C_{ij} = \sum_{e} \int_{\Omega^e} \rho c N_i N_j d\Omega, \quad .... (7)$$

$$F_i = -\sum_{e} \int_{\Gamma^e} N_i h T_\infty d\Gamma, \quad .... (8)$$

و تُحْسَبُ هذه التكاملات و المجاميع على كل عنصر e على حدة.

3. الحل باستخدام برنامج (ANSYS)

تم في هذا البحث حل النظام الثنائي من المعادلات التفاضلية المبينـــة بالمعادلـــة **(5)** بواسطة برنامج حاسوب متطور **(ANSYS 8.0)**

لإنجاز الحل الرياضي اِستُخْدِمَتْ مواصفات قالب معدني من الحديد الصب قادر على إنتاج أربع عينات متشابهة من الألمنيوم في كل عملية سكب. كما هو مبين في الشكل رقم (2)، و قد زود القالب بست حساسات حرارية موصولة مع الحاسب الآلي لقياس درجة حرارة القالب و المسبوكات في أثناء التجمد.

اِسْتُخْدِمَ برنامج (ANSYS) لتمثيل محاكاة حاسوبية لمراحل تجمد إحدى مسبوكات القالب الأربع، و هي المسبوكة الأقرب إلى المحيط الخارجي من الجهة اليمنى (الشكل (2)).

نُفِّذَتْ هذه المحاكاة على خليطة الألمنيوم التجاري النقي (99.6% ألمنيوم) و الجدول رقم (1) يبين نتيجة تحليل التركيب الكيميائي لتلك الخليطة.

استخدمت المواصفات الفيزيائية للألمنيوم النقي الموجودة في[13] و[14] كمدخلات للبرنامج و كذلك مواصفات الحديد الصب الخاص بالقالب المعدني. كما يبين الجدول رقم (2)

Al	Si %	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb
99.547	0.11	0.328	0.0020	0.0010	0.0020	0.0019	0.0055	0.0021	0.0021	0.0001

الجدول رقم (1) – التركيب الكيميائي للخليطة المدروسة.

أجريت المحاكاة على أبعاد المسبوكة الحقيقية بإهمال المرضع و الاستدقاق الطولي للعينة.

يتضمن إنجاز التحليل الحراري بطريقة العناصر المتناهية ثلاث خطوات رئيسية هي:

- بناء النموذج
- تطبيق الأحمال و تنفيذ الحل
- مراجعة النتائج

Coefficient of heat conductivity for aluminum [14]

T, °C	-100	0	20	100	200	300
K_{Al} W/(m.°C)	231.9	228.4	228.0	228.4	228.4	228.4

Specific heat for aluminum CAl, KJ/ (kg. °C) [14]

T, °C	0	50	100	150	200	300	400	500	600
C_{Al} KJ/(kg.°C)	0.895	0.904	0.913	0.925	0.938	0.955	0.979	0.996	1.022

Coefficient of heat conductivity for cast Iron [14]

T, °C	0	100	200	300	400
K_{CI} W/(m.°C)	49.0	46.5	44.5	43.2	42.4

Specific heat for cast iron CCI, KJ/ (kg. °C) [14]

T, °C	100	200	300	400	500	600
C_{CI} KJ/(kg.°C)	0.4421	0.4605	0.4932	0.5079	0.5171	0.5346

بالنسبة لقيم h12 فيقوم البرنامج بتحديدها أثناء عملية الحل.

الجدول رقم (2)– المواصفات الفيزيائية للألمنيوم النقي والحديد الصب المستخدمة كمدخلات في البرنامج

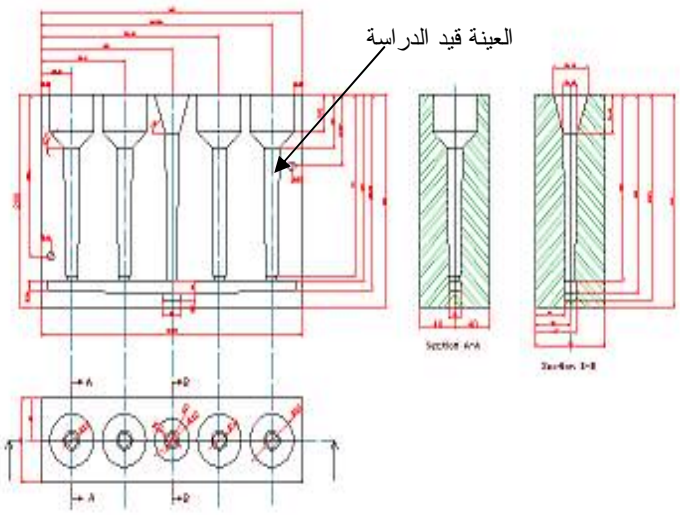
قيم درجات الحرارة المسجلة أثناء الاختبار:

Time (sec)	T °C
0	700
7	698
14	692
21	685
28	680
35	670
42	660
49	650
56	644
63	638
70	629
77	629
84	629
91	630
98	630
105	628
112	624
119	622
126	620
133	615
140	613
147	612
154	612
161	611
168	610
175	608
182	605
189	602
196	601
203	600
210	599
217	598
224	596
231	594
238	592
245	589
252	586
259	583
266	580
273	575
280	568
287	565
294	559
301	555
308	548
315	544
322	542
329	538
336	534
343	530

نتائج قياس درجات الحرارة أثناء العمل التجريبي:

3. 1 بناء النموذج:

بداية نقوم بتسمية العمل و إعطائه عنواناً، ثم نحدد نوع العناصر المنتهية الصغر التي نريد استخدامها في التحليل الحراري (هنا استخدمنا عناصر مضلعة الشكل ثمانية العقد متماثلة الخواص) و نحدد خواص المادة (عادة تكون خواص المواد متغيرة بتغير درجات الحرارة، أُدْرِجَ ذلك التغير في البرنامج باستخدام جدول تغير الخواص بتغير درجة الحرارة) و نرسم الشكل الهندسي للنموذج.



شكل (2) – رسم هندسي للقالب المعدني المستخدم لعملية السباكة

3. 2 تطبيق الأحمال وتنفيذ الحل:

تطبيق الأحمال يعني تحديد درجات الحرارة الابتدائية لعناصر النموذج المختلفة، فقد حُدِّدَتْ درجة حرارة المعدن المصهور عند انتهاء عملية السكب و بدء المحاكاة 700 درجة مئوية. و درجة حرارة القالب عند بدء المحاكاة 250 درجة مئوية. و حرارة الجو المحيط بالقالب 25 درجة مئوية.

بعد انتهاء تطبيق الأحمال حُدِّدَ المجال الزمني لتلك المحاكاة أي الفترة الزمنية من بدء المحاكاة إلى انتهائها، وهي هنا 20 دقيقة. ثم أعطي أمر تنفيذ الحل.

استغرق الحل دقيقة تقريباً على حاسب محمول نوع كومباك سرعة معالجه 2.3 غيغاهرتز.

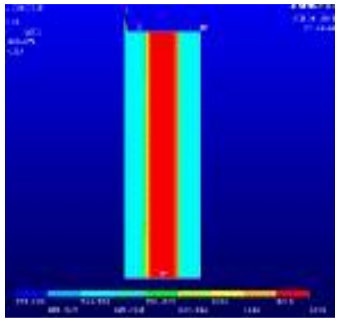
تبين الأشكال (من 3 إلى 10) مراحل مختلفة من نتيجة الحل.

4. نتائج المحاكاة الحاسوبية:

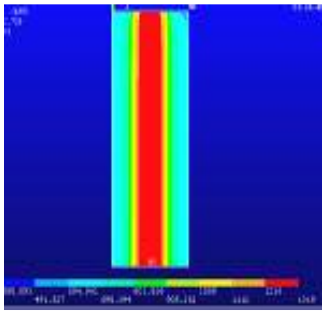
يتضح من الأشكال (3-10) التي تمثل عدة مراحل من المحاكاة الحاسوبية لعملية التجمد أن النتائج تشابه التوقعات من حيث مسار التجمد وذلك بأن يبدأ تجمد الحدود الجانبية للمسبوكة (المحيط) بما في ذلك الطبقة العلوية الملامسة للجو المحيط ثم يتجه شعاع التجمد نحو الداخل و الأسفل. (في الشكل (3-10) الألوان الأكثر قتامة تمثل درجات الحرارة الأعلى)

ويكون محور التجمد مختلفاً عن محور المسبوكة مقترباً من الطرف اليساري لها وتفسير ذلك أن سرعة التجمد على الطرف اليميني للعينة أسرع منها على الطرف اليساري و ذلك بسبب قرب الطرف اليميني من سطح التلامس بين القالب والجو المحيط في حين من الطرف الأيسر هناك عينات أخرى (كما يوضح الشكل 2) أي إنَّ سطح التلامس بين القالب والجو المحيط من الجهة اليسرى أبعد مما هي عليه على الجهة اليمنى ومن ثَمَّ تكون سرعة التجمد أبطأ.

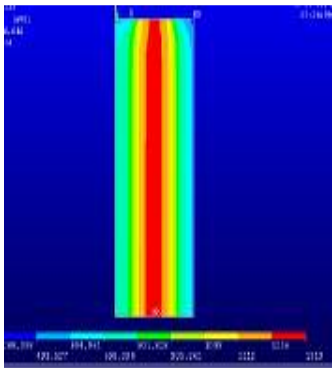
هذا من ناحية تحليل المشاهدة، ولكن كان لابد من اعتماد طريقة أخرى للمقارنة بين الواقع التجريبي والمحاكاة الحاسوبية للحكم على مدى صلاحية النموذج المقترح.



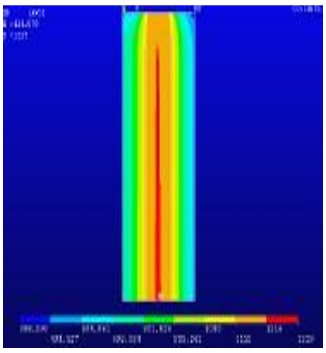
شكل (3)– بدء المحاكاة عند الزمن صفر



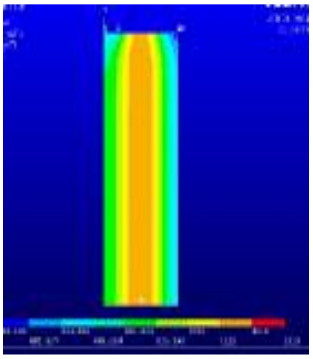
شكل (4)– بعد دقيقة من بدء التجمد



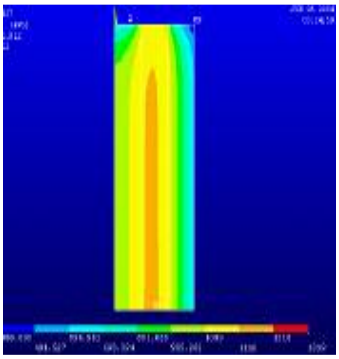
شكل (5)– بعد دقيقتين من بدء التجمد



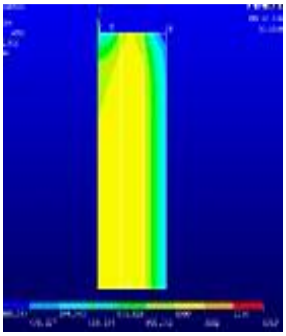
شكل (6)– بعد ثلاث دقائق من بدء التجمد



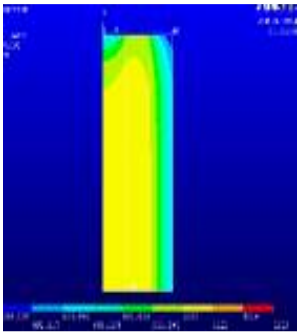
شكل (7)– بعد خمس دقائق من بدءالتجمد



شكل (8)– بعد11 دقيقة من بدء التجمد



شكل (9)– بعد 15 دقيقة من بدء التجمد



شكل (10)– بعد 20 دقيقة من بدء التجمد

5. مقارنة النتائج:

لنتمكن من مقارنة نتائج التجربة المخبرية مع النتيجة الحاسوبية، سُجِّلَتْ خلال عملية السباكة المخبرية درجات حرارة المعدن المسكوب لبعض العينات في أثناء عملية التجمد، وذلك باستخدام مزدوجات حرارية مركبة على القالب المعدني بحيث تنغمس إلى مركز العينة الأسطوانية الشكل وتكون متوضعة من حيث الارتفاع في منتصف ارتفاع العينة (كما هو موضح في الشكل 2). أخذت قراءات درجات الحرارة بمعدل قراءة كل ثانيتين.

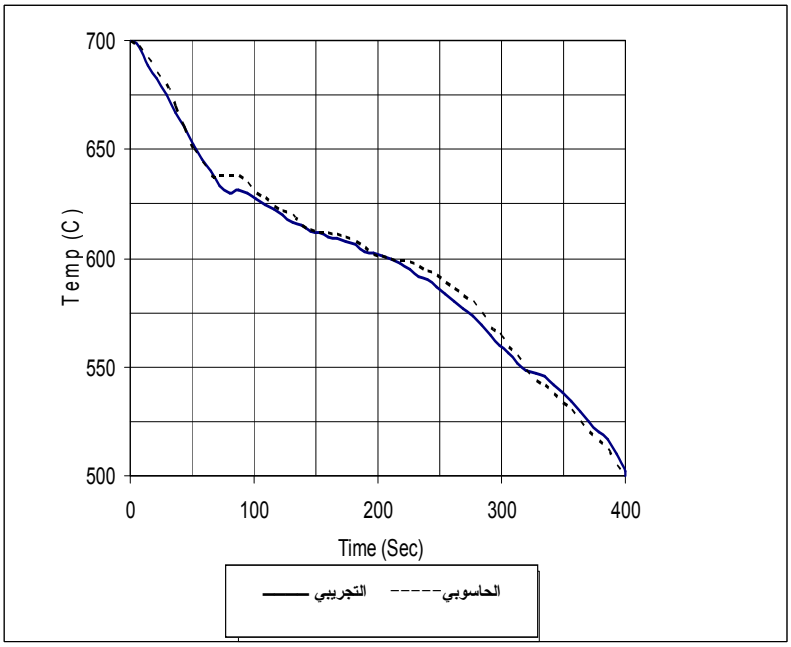
ثم نقلت هذه البيانات إلى الحاسب، و رُسِمَ منحنى التبريد لهذه العينات باستخدام برنامج مايكروسفت إكسل للمجال الزمني من صفر (لحظة انتهاء السكب) إلى 400 ثانية حيث كانت درجة الحرارة 500 مئوية تقريباً، والتي لا تحدث بعدها تحولات في الطور.

أما العينة التي جرت محاكاة تجمدها حاسوبياً فالبرنامج لديه ميزة رسم منحنى التبريد لأي نقطة تحدد إحداثياتها، ومن ثَمَّ زُوِّدَ الحاسب بإحداثيات النقطة التي وضعت فيها المزدوجة الحرارية خلال التجربة المخبرية وطلب إليه رسم منحني التبريد لها ضمن المجال الزمني نفسه (0-400 ثانية).

ثم نُقِلَ الرسم لمنحنيي التبريد (التجريبي والحاسوبي) إلى ورقة واحدة لتتم المقارنة بينهما، وكانت النتيجة كما في الشكل (11).

رغم وجود بعض الاختلاف بين المنحنيين و خاصة في منطقة تغير الطور من سائل إلى صلب، فإن الشكل (11) يبين تشابهاً بين المنحنيين و تقارباً كبيراً في قيم نتائجهما إذْ كان أكبر فرق في درجات الحرارة يعادل 1.3%، وهذا ما يمكننا من استنتاج أن النموذج الرياضي المقترح لعملية التجمد لهذه العينات هو نموذج قريب من الحقيقة بشكل مقبول ويمكن الاعتماد عليه، على الرغم من الحاجة إلى تطويره بغية الوصول إلى تطابق بين الواقع والتجربة.

و لابد من الإشارة هنا إلى أن تقارب النتائج يعود في جزء كبير منه إلى عدم تعقيد الشكل الهندسي للمسبوكة، أما المسبوكات المعقدة الشكل فما زالت البحوث مستمرة للوصول إلى نماذج رياضية تقارب إلى درجة عالية الواقع، وهذا واضح في عدد من المراجع المذكورة في نهاية المقالة [1] – [3] مثلاً.



شكل (11)– مقارنة منحني التبريد التجريبي و الحاسوبي

6. المراجع:

[1] Sergey V., Paolucci S., "Numerical Simulation Of Filling And Solidification Of Permanent Mold Castings", Applied Thermal Engineering, 22 (2002) 229-248.

[2] Ward M. Judson et.al, "Temperature Measurements on an Aluminum Alloy Permanent Mold Casting Process Under Production Conditions", HTD-Vol. 286, ASME 1994.

[3] Grong, O., et. Al., "Analytical Modelling Of Equiaxed Solidification", Acta Mater. Vol. 46, No. 14, pp. 5045-5052, 1998

[4] Metals Handbook, vol. 15, "Casting", ASM International, Metals Park, OH, 1988.

[5] Flemings, M. C., "Solidification Processing", McGraw-Hill, New York, 1974.

[6] Kurz W. and Fisher D. J., "Fundamentals of Solidification", 3rd ed. Trans. Tech. Publications, Switzerland, 1989.

[7] Maxwell I. and Hellawell A., Acta metall., "The constitution and solidification of peritectic alloys in the system Al-Ti" 1975, 23, 229.

[8] Wang, C. Y. and Beckermann, C., "A unified solute diffusion model for columnar and equiaxed dendritic alloy solidification" Mater. Sci. Eng., Volume 171, 1993, 199-211.

[9] Almansour A., Matsugi K., Hatayama T. and Yanagisawa O., Mater. Trans., JIM, 1996, 37, 612

[10] Lewis R W, Morgan K, Thomas H R, Seetharamu K N, "The finite element methods in heat transfer analysis" (New York: John Wiley), 1996.

[11] Morgan K, Lewis R W, Seetharamu K N, "Modelling heat flow and thermal stress in ingot casting", Simulation 1981,:55–63

[12] Oeters F, Ruttiger K, Selenz H J, "Heat transfer in ingot pouring", Information Symp. On Casting and Solidification of Steel, Luxembourg, vol. 1, 1977, pp 126–167

[13] Callister W., "Materials Science and Engineering", John Wiley & sons, 2003

[14] Kazantsev E. L.,"Industrial Furnaces", Mir Publishers, 1977.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2006/5/14.