



جامعة قاصدي مرباح ورقلة



كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء

مذكرة ماستر أكاديمي

مجال : عموم المادة

شعبة: فيزياء

تخصص : فيزياء طاوقية و الطاقات المتجددة

من إعداد الطالبة : بن صب سهيئة

العنوان:

## دراسة توزيع الحرارة و انتقالاتها في الطبقات الأرضية الداخلية

نوقشت علنا بتاريخ: /.... /.... /....

أمام اللجنة المكونة من الأساتذة:

رئيسا	أستاذ محاضر أ	سوداني محمد البار
مناقشا	أستاذ محاضر أ	محسن حسين
مشرفا	أستاذ محاضر ب	تليلي صالح
مساعد	ماستر فيزياء طاوقية و طاقات متجددة	عاشوري انتصار

2020/2019

اهداء

## الإهداء:

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات حمداً كثيراً طيباً مباركاً الذي وفقنا إلى طريق العلم والمعرفة, ووفقنا لإنجاز هذه المذكرة وإتمام هذا البحث العلمي المتواضع والذي أهديه إلى :

روح والدي الطاهرة تغمده الله بواسع رحمته وأسكنه فسيح جناته مع النبيين والصديقين و الشهداء والصالحين, اللهم جازيه عني خيراً ماجازيت والد عن ولده.

إلى أعلى ما أملك في الوجود إلى من سهرت وربت أمني الغالية اطال الله في عمرها , وإلى والدتي الثانية حفظها الله من كل سوء لنا .

إلى زوجي وقرت عيني خالد أدامه الله سنداً لي طول حياتي وأبنتنا ونور حياتنا حفظها الله لنا ألاء .

إلى كل أفراد عائلتي وأقاربي كبيراً وصغيراً .

إلى كل صديقاتي كل واحدة بإسمها وكل طالبة ماستر فيزياء طاقوية .

إلى كل أساتذتي الكرام الذين لهم الفضل في وصولي إلى ما أنا عليه .

وفي الأخير أتوجه بالشكر والإمتنان إلى كل من ساعدني من قريب أو من بعيد على إنجاز هذا العمل المتواضع .

شكر و عرفان

## شكر و عرفان:

تكاد شموع الشكر تحترق خجلا لتضيء كلمات عجز اللسان والقلم  
عنها.....

بعد رحلة بحث وجهد و إجتهدا تكلفت بإنجاز هذا البحث , أحمد الله عز و  
جل على نعمه التي من بها علينا فمع وضع اللمسات الأخيرة لهذا العمل  
اغتنمت الفرصة لأتوجه اليكم بهذه السطور التي تحمل في ثناياها لكم اسمى  
عبارات الشكر و التقدير.

أشكر أستاذي الفاضل " تليلي محمد صالح " على جهوده التي بذلها  
لتوجيهي وعلى كل ما أعطى لي فهو لم يبخل عليا بشيء، أشكره على  
قبوله الإشراف على عملي، وعلى صبره الجميل في سبيل تعليمي.

كما أود أن أشكر الأستاذة الفاضلة والصديقة العزيزة " عاشوري إنتصار " على مساعدتها في الإشراف على هذا العمل فلها مني اسمى عبارات الشكر والتقدير.

شكرا للأستاذ " بو عنان رابح " .

شكرا لكل أساتذة قسم الفيزياء على نصحتهم وإرشادهم لي في مشواري  
الدراسي زادها الله في ميزان حسناتهم.

شكرا لكل من أزال غيمة جهل مررت بها، شكرا لكل من ساهم في إتمام  
هذا العمل من قريب أو بعيد. لكم مني جزيل الشكر.

# الفهرس

الصفحة

I

الفهرس

IV

قائمة الإشكال و الجداول

VI

مقدمة

الفصل الأول

## الحرارة

01

1-I مقدمة

01

2-I الحرارة

01

1-2-I تعريف الحرارة

01

2-2-I أهمية الحرارة

01

3-2-I مصادر الحرارة

03

4-2-I قياس الحرارة

04

3-I انتقال الحرارة

05

1-3-I انتقال الحرارة بالتوصيل

06

2-3-I انتقال الحرارة بالحمل

08

3-3-I انتقال الحرارة بالإشعاع

11

4-I معادلات الحرارة

12

1-4-I المعادلة الحرارة في ثلاثة أبعاد

12

2-4-I المعادلة الحرارة في بعد واحد

الفصل الثاني

نماذج وصف البنية الداخلية للأرض

13

1-II مقدمة

14	2-II نموذج علم الزلازل
14	1-2-II البيانات الزلزالية
16	2-2-II البنية الداخلية للأرض
19	3-II النموذج الجيوكيميائي و المعدني للأرض
19	1-3-II مبدأ طرق الدراسة
19	2-3-II النتائج

### الفصل الثالث

## الحرارة و الأرض

22	1-III مقدمة
22	2-III المناطق الحرارية السطحية
23	3-III الحرارة الباطنية الأرضية
23	1-3-III المظهر الخارجي للحرارة الباطنية الأرضية
23	2-3-III التدفق الحراري في باطن الأرض
24	3-3-III النموذج الحراري لباطن الأرض
25	4-3-III انتشار الحرارة عبر الطبقات الداخلية الأرضية
35	5-3-III النموذج الديناميكي للأرض
37	4-III الطاقة الحرارية الأرضية

### الفصل الرابع

## المحاكاة عددية لظاهرة انتقال الحرارة في الطبقات

### الأرضية

40	1-IV مقدمة
40	2-IV طريقة الفروق المنتهية
40	1-2-IV المفهوم العام لطريقة الفروق المنتهية
42	2-2-IV المفهوم الرياضي لطريقة الفروق المنتهية

46	3-IV نمذجة انتقال الحرارة في الطبقات الداخلية لأرض	
46	1-3-IV نمذجة الطبقات الداخلية لأرض	
47	2-3-IV المعادلة الكلية لانتقال الحرارة على مستوى كل طبقة	
47	3-3-IV فرضيات التبسيط المعتمدة في هذه الدراسة	
48	4-3-IV خوارزمية الحساب	
53	4-IV عرض و مناقشة نتائج النمذجة	
53	1-4-IV عرض النتائج	
53	2-4-IV مناقشة النتائج	
56		الخلاصة
58		المراجع
		الملخص

# قائمة الأشكال و الجداول

## الأشكال:

### الصفحة

- شكل (1-I) انتقال الحرارة بالحرارة بالحمل من سطح مستو 07
- شكل (2-I) الشعاع الحراري الساقط على الجسم جزء منه ينعكس و آخر ينفذ 10
- الشكل(1-II): رسم بياني لمنحنيات سرعات الموجة الزلزالية كدالة للعمق 15
- الشكل(2-II): مخطط يوضح البنية الداخلية للأرض على أساس الانقطاعات الرئيسية في سرعات الموجات الزلزالية 16
- الشكل(3-II): مخطط يوضح البنية الداخلية للأرض بناءً على السلوك المادي للطبقات 18
- الشكل(4-II): توزيع العناصر الكيميائية و المعادن داخل الأرض 21
- الشكل(1-III): توزيع الحرارة في باطن الأرض 25
- الشكل(2-III): رسم بياني يشرح مبدأ التصوير المقطعي الزلزالي 36
- الشكل(3-III): صورة مقطعية لجزء من الأرض في جنوب آسيا 36
- الشكل(4-III): يمثل الملخص الفني لقدرة الكهرباء الحرارية الأرضية المركبة حسب البلدان في 2009 يبين الشكل متوسط تدفق الحرارة على النطاق العالمي بالميللي واط للمتر المربع و حدود الصفيحة التكتونية 39
- شكل(1-IV): تقطيع مستوي حسب طريقة الفروق المنتهية 41
- الشكل(2-IV): المخطط الانسيابي العام 49
- الشكل(3-IV): المخطط الانسيابي للجزء I الخاص بحساب درجة الحرارة على حدود الطبقات 50
- الشكل(4-IV): المخطط الانسيابي للجزء II الخاص بحساب درجة الحرارة داخل كل الطبقة 51
- الشكل(5-IV): المخطط الانسيابي للجزء III الخاص بتغير الإحداثيات 52
- الشكل(6-IV): يمثل تغيرات درجات الحرارة بدلالة العمق. 54
- الشكل(7-IV): يبين التدرج الحراري و قيمها في الطبقات الأرضية. 54

- 55 الشكل (8-IV): يمثل تغيرات درجات الحرارة بدلالة العمق؛  
 أ- للطبقات الأربعة الأولى بداية من القشرة.  
 ب- للطبقات الثلاث الاخيرة.

### الجدول:

- 06 جدول (1-I): الموصلية الحرارية لبعض المواد الشائعة الاستخدام  
 08 الجدول (2-I): يوضح بعض القيم لمعامل انتقال الحرارة بالحمل h  
 10 الجدول (3-I): يوضح قيما للانبعائية لبعض المواد  
 41 الجدول (1-IV): يقدم أنواع التقطيعات الخاصة بطريقة الفروق المنتهية  
 46 الجدول (2-IV): يقدم درجات الحرارة عند حدود هذه الطبقات و العمق الموافق

## المقدمة العامة:

تكتسي المواضيع المتعلقة بالطاقة المتجددة أهميتها من أهمية هذا النوع من الطاقة، فمن المعلوم أن هذه الأخيرة في معظمها صديقة للبيئة ذات تكلفة اقل بأثمان رخيصة و متوفر لدى كل دول العالم على عكس الطاقة الكلاسيكية أي الأحفورية المحترقة لبعض الدول دون غيرها، و عالية التكاليف و باهضة الثمن في الغالب بالإضافة لعداوتها للبيئة.

مصادر الطاقات المتجددة طبيعية و غير مستنفذة في اغلبها، فأشعة الشمس و الرياح التي هي من عناصر المناخ هي مصادر لأهم أنواع هذه الطاقة. كلا العنصرين ينتجان كهرباء بطريقة مباشرة بتحويل أشعة الشمس عن طريق الخلايا الكهروضوئية، غير مباشرة بتحويل سرعة الرياح إلي طاقة ميكانيكية و من ثم إلى طاقة كهربائية عن طريق التوربينات.

يمكن بالاعتماد على مفاهيم نظرية خاصة بكل نوع من هذين النوعين حساب القدرة الناتجة، و بالتالي القدرة الناتجة عن محطة هجينة تتضمن كل منهما. حيث أن مصدر هذين النوعين من الطاقة المتجددة هو عنصر من عناصر المناخ، فان محطات الرصد الجوي قد توفر لنا معطيات هامة قد تفيد عن طريق المحاكاة صناعة برنامج يحصي القدرة الناتجة عن كل محطة و بالتالي المقارنة بين نتائج مجموعة من محطات الرصد.

لتحقيق هذه الدراسة رأينا من المناسب تقسم هذا العمل لأربعة فصول، و هي:

الفصل الأول: الذي يتناول عناصر المناخ، الطاقات المتجددة و مدى تأثير كل منهما على

الأخر.

الفصل الثاني: يخصص لمعرفة عامة بطاقتي الرياح و الخلايا الكهروضوئية، من خلال ميد

العمل، الأجهزة المستعملة، أهميتها عيوب و مزايا .... و غيرها.

الفصل الثالث: من خلاله تقدم الدراسة النظرية لحساب قدرات المحطات الريحية، الكهروضوئية و الهجينة، و ذلك لاستخلاص أهم خطوات المحاكاة و بالتالي وضع اهم خطوات البرنامج المعد.

الفصل الرابع: يتم فيه تطبيق البرنامج على معطيات لثلاث محطات رصد جوي و هي محطات كل من ورقلة، تقرت و حاسي مسعود، لتتم مناقشة و تحليل النتائج و مقارنة بينها.

و أخيرا خلاصة تختصر طريقة العمل و أهم النتائج المحصل عليها، بالإضافة إلى تعديد أخطاء الدراسة و نقائصها، كما يقدم من خلالها أفاق و مقترحات أعمال المستقبلية.

## الفصل الأول:

# الحرارة

### 1-I مقدمة:

فضلنا في هذا الفصل سنتناول الحرارة من حيث؛ تعريفها، أهميتها، مصادرها، طرف أو أدوات قياسها، طرق و كفاءات انتقالها و في الأخير معادلة انتشارها في الأوساط المادية.

### 2-I الحرارة:

#### 1-2-I تعريف الحرارة:

هي مقياس لسخونة أو برودة جسم معين؛ فالأجسام الساخنة تحتوي على طاقة عالية، وتتحرك جزيئاتها بسرعة كبيرة، أما الأجسام الباردة فتمتلك القليل من الطاقة وتتحرك جزيئاتها ببطء. و تمثل إحساس الجسم بالبرودة و السخونة<sup>[01]</sup>.

#### 2-2-I أهمية الحرارة:

تعتبر أهم عناصر المناخ نظراً لأن اختلاف درجاتها يؤثر في العناصر الأخرى كالضغط الجوي، الرياح، الرطوبة و التكاثف و بالتالي الأمطار. كما تؤثر على الحياة و الأحداث على ظهر الأرض، بتأثيرها على الإنسان و الحيوان و النبات، لذلك عمل الإنسان على التكيف معها و السيطرة عليها مهما كانت الظروف غالباً<sup>[02]</sup>.

#### 3-2-I مصادر الحرارة:

مصدر الحرارة هو تلك الأشياء التي تعطي حرارة أو التي يمكنها أن تصدرها، حيث يمكننا التحكم في بعضها دون الآخر. من بين المصادر التي يمكن التحكم فيها؛ الكهرباء و الطاقة النووية المستخدمة في

تدفئة المنازل و في أشغال أخرى، لكننا نستفيد أيضاً من المصادر التي لا نتحكم فيها و التي منها الشمس و الحرارة الباطنية للأرض مثلاً. على العموم هناك ستة مصادر رئيسية للحرارة هي<sup>[03]</sup>:

1- الشمس: هي المصدر الأساسي للحرارة، حيث أن جميع العمليات الجوية التي تحدث في الغلاف الجوي للأرض تستمد طاقتها من طاقتها الهائلة و الناتجة عن تحول الهيدروجين إلى الهيليوم. إذ تمتاز أشعة الشمس بأنها تعطي الحرارة و الضوء و الأشعة الحيوية، فعندما ترسل الشمس أشعتها يسخن سطح الكرة الأرضية من يابس و ماء، ثم تنعكس حرارتهما على الغلاف الغازي المحيط بالأرض. تقطع هذه الأشعة مسافة 93 مليون ميل في الفضاء حتى تصل إلى سطح الأرض في مدة ثماني دقائق تقريباً، فهي تنتشر في كل الاتجاهات على شكل أمواج كهرومغناطيسية و بسرعة الضوء (300000 كلم/ثا). حيث تكون عمودية على خط الاستواء و مائلة على خطوط العرض الأخرى، لذلك يعتبر الموقع الفلكي من أهم العوامل المؤثرة في الحرارة.

منذ القدم أستغل الإنسان طاقة الشمس بشكل مباشر في حياته البسيطة في التدفئة و الحصول على النار و لتجفيف الأغذية النباتية و الحيوانية، ثم تطور هذا الاستغلال إلى استحداث آليات لتجميع الطاقة الشمسية و الاستفادة منها في مجالات مختلفة. استمر التطوير من خلال رفع كفاءة المجمعات الشمسية بزيادة فعالية امتصاص الإشعاع الشمسي على شكل حرارة من جهة و زيادة العزل الحراري من جهة أخرى، ثم تطور استغلال الطاقة الشمسية إلى إنتاج الكهرباء بالتحويل الكهروضوئي أو الحراري بواسطة محطات الطاقة الشمسية المركزة، و يعتبر التحويل الحراري هو الأقل كلفة و الأكثر مردوداً و الأطول عمراً (3). لذلك يركز اهتمام الباحثين حول هذه الطاقة، بينما مصادر الطاقة الأخرى لا تشكل إلا جزءاً ضئيلاً جداً لا يتعدى %0.01 كطاقة باطن الأرض و النجوم و المصانع و السيارات و التدفئة و غيرها و تختلف كمية الطاقة من مكان لآخر.

2- الأرض و النجوم: رغم بعد النجوم الكبير عن الأرض مقارنة بالشمس، إلا أنها تعطي حرارة و لو بشكل ضئيل. كذلك و كما رأينا أعلاه تتأثر درجات الحرارة التي مضرها الشمس بتغير المسافة بين مركزي الأرض و الشمس حسب اليوم من السنة و ذلك لكون مسار دوران الأرض حول الشمس متغير. بالإضافة لكون باطن الأرض يصدر حرارة، تختلف من منطقة لأخرى من سطحها على رغم من ضعف قيمتها.

3- التفاعلات الكيميائية: هي كل العمليات التي تشمل تغير ترتيب الذرات في الجزيئات الكيميائية، أو اتحاد بعض الجزيئات بطرق مختلفة لتشكيل مركبات أخرى أكبر أو أعقد، أو تفكك المركبات لتكوين جزيئات أصغر. بمعنى آخر و ابسط التفاعلات الكيميائية تشمل عادة تكسر أو تكوين روابط كيميائية، مما يعطي حرارة أو يمتصها و هو ما يسمى بالإحتراق بالتفاعل كيميائي.

4- الاحتكاك: هو القوة المقاومة التي تحدث عند تحرك سطحين متلاصقين باتجاهين متعاكسين، عندما يكون بينهما قوة ضاغطة تعمل على تلاحمهما معا (وزن أحد الجسمين). إذ يحدث بين المواد الصلبة، السائلة و الغازية أو أي تشكيلة منهم، مما ينتج كمية من الحرارة.

5- الطاقة النووية: تعتبر النظائر المشعة أهم مصادر الطاقة النووية، النظائر الأساسية المولدة للحرارة على كوكب الأرض في الوقت الحاضر.

6- لمصادر غير الطبيعية: التي غالبا يتسبب فيها الإنسان المتدخل في ذلك عن طريق المصانع و السيارات و المكيفات و التدفئة و غيرها، و التي تعطي كميات حرارة لا يستهان بها.

### I-2-4 قياس الحرارة:

لا يستطيع الإنسان أن يقيس درجة الحرارة عن طريق إحساسه بها، بل إنه يستعمل ميزاناً للحرارة يعرف باسم الترمومتر و هو نوعان<sup>[04]</sup>:

- الترمومتر المئوي و يرمز لدرجته بالحرف (م) أو بالحرف (°C) اختصار (سنتيجراد).

- الترمومتر الفهرنهايتي و يرمز لدرجاته بالحرف (F) اختصار (فهرنهايت).

### I-3 انتقال الحرارة:

يعرف انتقال الحرارة بأنه ذلك العلم الذي يهدف إلى حساب انتقال الطاقة من منطقة إلى أخرى نتيجة للفرق في درجات الحرارة بينهما. تسمى هذه الطاقة المنتقلة بالحرارة. و هذا العلم لا يبحث في كيفية انتقال الحرارة فقط و إنما أيضا يحسب المعدل (التغير مع الزمن) الذي تنتقل به هذه الحرارة. يختلف علم انتقال الحرارة عن علم الديناميكا الحرارية في أن الأخير يدرس الاتزان الحراري للمواد و يكتفي بحساب كمية الحرارة اللازمة لتغير حالة المادة من اتزان حراري معين إلى وضع آخر بينما يعطي علم انتقال الحرارة تصورا عن الكيفية التي انتقلت بها الحرارة لتغير وضع الاتزان هذا بالإضافة إلى حساب معدلات انتقال الحرارة أثناء تغير وضع الاتزان<sup>[05]</sup>.

هناك ثلاث طرق رئيسية لانتقال الحرارة هي:

1- انتقال الحرارة بالتوصيل: و يتم الانتقال في هذه الحالة عبر المواد الصلبة و خلال السوائل و الغازات في حالة السكون.

2- انتقال الحرارة بالحمل: تنتقل الحرارة بتيارات الحمل خلال السوائل و الغازات (في حالة حركة).

3- انتقال الحرارة بالإشعاع: لا يحتاج هذا النوع من الانتقال إلى وجود وسيط مادي على عكس التوصيل و الحمل.

و كل الطرق السابقة يشترط حدوثها وجود فرق في درجات الحرارة و يكون اتجاه انتقال الحرارة من الوسط الذي درجة حرارته عالية إلى الوسط ذي الحرارة المنخفضة.

## I-3-1 انتقال الحرارة بالتوصيل:

إن انتقال الحرارة بالتوصيل يعني انتقال الطاقة الحرارية من جزيئات المادة ذات الطاقة العالية إلى الجزيئات الأقل طاقة كنتيجة طبيعية لحركة هذه الجزيئات فيما بينهما. و يحدث التوصيل في المواد الصلبة، السائلة و الغازية. ففي السوائل و الغازات يحدث كنتيجة لتصادم الجزيئات في حركتها العشوائية. أما في المواد الصلبة فالتوصيل يحدث نتيجة لاهتزازات الجزيئات و انتقال الطاقة بواسطة الإلكترونات الحرة. و معدل انتقال الحرارة بالتوصيل خلال وسط معين يعتمد على الشكل الهندسي لذلك الوسط (سمكه و نوع مادة الوسط) و كذلك فرق درجات الحرارة عبر ذلك الوسط<sup>[05]</sup>.

قانون فوري للتوصيل الحراري:

$$q = - \frac{AdT}{dX} \quad (1)$$

أو:

$$q = - \frac{kAdT}{dX} \quad (2)$$

حيث أن k هو ما يعرف بمعامل انتقال الحرارة بالتوصيل و هي مقياس لمقدرة المادة لتوصيل الحرارة. و منه يتم تصنيف المواد إلى جيدة التوصيل الحراري و رديئة تبعاً لقيمة معامل انتقال الحرارة. فالأولى لها معامل انتقال حرارة مرتفع بينما المواد العازلة لها معامل انتقال حرارة منخفض. يبين الجدول التالي قيم معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لبعض المواد.

و يلاحظ من الجدول أن المواد جيدة التوصيل للحرارة كالنحاس و الفضة مثلاً لها معامل انتقال

حرارة مرتفع. أما المواد رديئة التوصيل للحرارة مثل المطاط و الخشب لها قيم منخفضة.

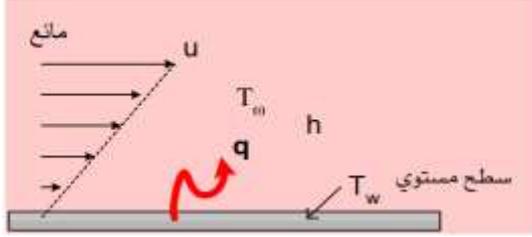
جدول (1-I): الموصلية الحرارية لبعض المواد الشائعة الاستخدام<sup>[05]</sup>.

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل k (w/m°C)	مواد عازلة	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل k (w/m°C)	مواد موصلة
0.78	الزجاج	2300	الدايموند
0.72	الطوب	429	الفضة
0.613	الماء	386	النحاس
0.54	الأمونيا	317	الذهب
0.17	خشب	237	الألومنيوم
0.13	مطاط ناعم	80	حديد مطاوع
0.072	فريون 12	8.9	الزئبق
0.026	هواء		

### I-3-2 انتقال الحرارة بالحمل:

كثيرا ما نستخدم المراوح في حياتنا العملية في التبريد فمثلا لو وضعنا لوحا ساخنا أمام مروحة فإن هذا اللوح سوف يبرد. و عندها نقول إن الهواء حمل الحرارة من على سطح اللوح إليه. و لكننا سوف نتساءل ما هو تأثير سرعة الهواء على معدل انتقال الحرارة؟ و هل إذا ضوعفت السرعة سوف يتضاعف معدل انتقال الحرارة؟ و هل معدل انتقال الحرارة سوف يتغير إذا استبدلنا الهواء بالماء؟<sup>[05]</sup>

انتقال الحرارة بالحمل هو انتقال الحرارة بين سطح صلب و المائع الذي يسري فوق ذلك السطح فهو يحمل تأثيرين الحمل و التوصيل معا. و من اليسير ملاحظة أن طبقة المائع الملاصقة للشريحة تكون ساكنة بينما طبقة المائع البعيدة عن الشريحة تمشي بسرعة المائع، أي أن طبقات المائع في الاتجاه العمودي على الشريحة تأخذ شكلا متشابها لتوزيع السرعة كما في شكل (1-I) حيث تساوي سرعة المائع عند السطح صفرا و عليه فإن عملية انتقال الحرارة عند النقطة تكون بالتوصيل. لذا يجب أن نتذكر دائما أن انتقال الحرارة عند السطح يتم دائما بالتوصيل كما أن انتقال الحرارة بالحمل دائما يتطلب حركة المائع.



شكل (1-I) انتقال الحرارة بالحرارة بالحمل من

سطح مستوي [05].

## 1-2-3-I الحمل الحر (الطبيعي):

إذا وضعنا لوحا ساخنا في غرفة بها هواء أبرد من اللوح فإن الهواء الملامس للوح سوف يسخن فيتحرك إلى أعلى نتيجة لانخفاض كثافته فيلامس طبقات الهواء الباردة التي تعلو اللوح فيبرد و تزداد كثافته فينزل مرة أخرى إلى اللوح الساخن، و هكذا حتى يبرد و بدون استخدام أي وسيلة خارجية.

## 2-2-3-I الحمل القسري (الجبري):

أما إذا استخدمت وسيلة ما لتحريك الهواء على سطح كمروحة مثلا يصبح الحمل حملا جبريا. هنا يكون لدينا تحكم مباشرة على حركة المائع و بالتالي نستطيع أن نحصل على سرعات أعلى بكثير في حالة الحمل القسري مقارنة بالحمل الطبيعي و بالتالي الحصول على معدلات أكثر لانتقال الحرارة. و للتعبير عن انتقال الحرارة بالحمل بين سطح ما و مائع يسري حوله نستخدم قانون نيوتن

للتبريد:

$$q = hA(T_w - T_{\infty}) \quad (3)$$

حيث h معامل انتقال الحرارة بالحمل ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )، إذ يقدم في الجدول (2-II) بعض قيم هذا المعامل حسب نوع و حالة المائع. و A هي مساحة سطح الشريحة التي تنتقل خلالها الحرارة ( $m^2$ ).

لنذكر فقط هنا بمفهوم العزل الحراري، حيث العازل الحراري هو مادة أو مجموعة مواد تستخدم أساسا لتقويم سريان الحرارة خلالها. و تصنع معظم المواد العازلة الحرارية من مجموعة مواد ذات موصلية حرارية منخفضة و غالبا ما تكون فيها جيوب هوائية.

الجدول (I-2): يوضح بعض القيم لمعامل انتقال الحرارة بالحمل  $h$  [05].

نوع الحمل الحراري	$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)
حمل حر ( هواء )	5 - 25
حمل جبيري ( هواء )	10 - 500
حمل جبيري ( ماء )	100 - 15000
غليان مياه	2500 - 25000
تكثيف بخار	5000 - 100000

### I-3-3 انتقال الحرارة بالإشعاع:

إذا وضعنا طرف قضيب معدني في لهب فإن الحرارة تصل لليد الممسكة به من الطرف الآخر. وضعت يدك فوق اللهب فإن الحرارة إلى يدك. و عند وضع اليد على أحد جانبي اللهب فإن الشعور بوصول الحرارة إلى اليد لا يزال قائماً. في الحالة الأولى الحرارة انتقلت بالتوصيل كما نعرف خلال مادة القضيب [05].

و في حالة الثانية فإن الحرارة تنتقل عن طريق تيارات الحمل المتجهة أعلى أما في الحالة الأخيرة فنقول أن الحرارة انتقلت بالإشعاع، و أسطح جميع الأجسام تشع طاقة حرارية تسمى بطاقة الإشعاع و تحمل هذه الطاقة بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية. هذه الموجات تنتقل في خطوط مستقيمة و بسرعة الضوء و لا تحتاج إلى وسيط للانتقال فيه، عكس الطرق الأخرى لانتقال الحرارة لا تحتاج لوسط مادي للانتقال فيه.

لقد أوضحنا أن انتقال الحرارة بالتوصيل و انتقال الحرارة بالحمل يتم دائماً من الجسم ذي درجة الحرارة العالية إلى الجسم ذي درجة الحرارة المنخفضة، لكن الشيء الجدير بالاهتمام في حالة الإشعاع الحراري هو أن انتقال الحرارة يمكن أن يتم بين جسمين مفصولين بوسط درجة حرارته منخفضة جداً، و

الدليل أن الإشعاع الحراري من الشمس يصل إلى سطح الأرض بعد أن يمر بطبقات باردة جدا من الهواء في طبقات الجو العليا.

هنا لابد من الإشارة إلى أن الجسم الأسود للإشعاع الحراري ليس بالضرورة أن يكون لونه أسود و لكنه يعني أن يمتص كل الضوء الواقع عليه، فمثلا الجليد هو أبيض للعين و لكنه أسود للإشعاع الحراري. بالرغم من أنه ليس هناك جسم أسود مئة بالمئة، إلا أن هناك بعض الأمثلة التي تقرب عملية (تعريف) الجسم الأسود.

عليه يمكن تعريف الجسم المثالي لابتعاث و امتصاص الحرارة . و عند درجة حرارة معينة و موجة معينة لا يوجد جسم يبعث حرارة أكبر من الجسم الأسود.

وجد ستيفان بولتزمان بالتجربة أن الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود لكل متر مربع كالاتي:

$$E_b = \sigma T^4 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

حيث  $\sigma$  هي ثابت ستيفان بولتزمان؛  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)$  و درجة الحرارة  $T$  هي درجة الحرارة المطلقة للسطح و  $E_b$  هي القدرة الانبعاثية للجسم الأسود.

حيث الانبعاثية هي إن أقصى معدل للإشعاع المنبعث من سطح درجة حرارته المنطقة  $T_s$  يعطى

بواسطة قانون سيبي فإن بولتزمان كالتالي:

$$q_{emit \max} = \sigma A T_s^4 \text{ W} \quad (5)$$

و هو الإشعاع المنبعث من جسم الأسود ( $\epsilon=1$ ).

إن الإشعاع المنبعث من أي جسم عند درجة حرارة  $T_s$  يعطى المعادلة.

$$q = \epsilon \sigma A T_s^4 \text{ W} \quad (6)$$

حيث  $\epsilon$  هي الانبعاثية للجسم.

حيث الانبعاثية و التي تتراوح قيمتها بين الصفر و الواحد الصحيح، ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ) هي مقدرة الجسم لمحاكاة الجسم الأسود ( $\epsilon=1$ ) في انبعاث الحرارة و تعرف الانبعاثية بأنها النسبة بين ما يبعثه السطح (أي سطح) من الحرارة إلى الإشعاع المنبعث بواسطة الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة.

الجدول (I-3): يوضح قيما للانبعاثية لبعض المواد<sup>[05]</sup>.

الانبعاثية $\epsilon$	المادة	الانبعاثية $\epsilon$	المادة
0.90	طلاء أبيض	0.07	شرائح الألمنيوم
0.85-0.93	إسفلت	0.03	نحاس مصقول
0.93-0.96	طوب أحمر	0.03	ذهب مصقول
0.82-0.92	خشب	0.02	فضة مصقول
0.96	الماء	0.17	حديد صلب مصقول
0.95	الجسم البشري	0.98	طلاء أسود

كما ذكرنا فإن الانبعاثية هي النسبة بين الحرارة التي يبعثها الجسم إلى الإشعاع المنبعث بواسطة الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة.

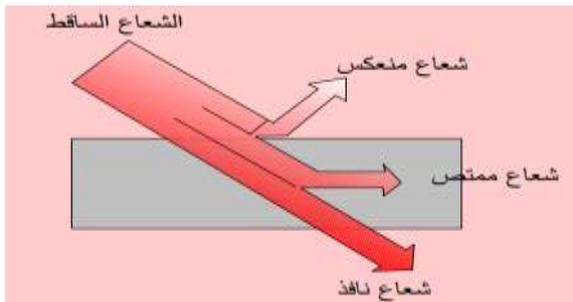
يمكننا أيضا التعرض هنا لمفهوم الامتصاصية الانعكاسية و النفاذية، فبالإشارة إلى شكل (I-2)،

فإن الإشعاع الحراري الذي يقع على أي جسم يمكن له أن:

1- يمتص بواسطة الجسم.

2- ينعكس من على الجسم.

3- ينفذ من خلال الجسم.



شكل (I-2) الشعاع الحراري

الساقط على الجسم جزء منه

ينعكس و آخر ينفذ<sup>[05]</sup>.

يسمى الجزء الممتص بواسطة الجسم بالامتصاصية و يرمز له بـ  $\alpha$  و الجزء المنعكس بالانعكاسية و يرمز له بـ  $\rho$  و الجزء النافذ بالنفاذية و يرمز له بـ  $\tau$  عليه فإن مجموع هذه الأجزاء المكونة للإشعاع الحراري تساوي الواحد الصحيح، أي أن:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (7)$$

و في الأجسام المصمتة فإن:  $\tau=0$  و بالتالي:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (8)$$

و حيث أن الجسم الأسود يمتص كل الإشعاع الساقط  $\rho=0$  و بالتالي:

$$\alpha = 1 \quad (9)$$

#### I-4 معادلات الحرارة:

أو معادلة الانتشارية أو معادلة توصيل الحرارة هي معادلة تفاضلية جزئية من الدرجة الثانية، و هي معادلة تصف التوصيل الحراري و تغير الحرارة في الأجسام. قبل أن يتقدم القارئ للمعادلة عليه أن يدرك المعنى الفيزيائي للحرارة و يفرق بينها و بين درجة الحرارة، و المثال المألوف في هذا السياق هو أن الحرارة المخزنة في حوض استحمام مملوء بالماء الدافئ أكبر من الحرارة المخزنة في كوب من الماء المغلي رغم أن درجة الحرارة في الكوب أعلى بكثير من درجة حرارة الماء في الحوض. لهذه المعادلة استعمالات في عدة مجالات من صناعة المحركات مروراً بعلم الأحياء حيث تعرف بمعادلة الانتشارية، لهذه المعادلة الصياغات الرياضية متعددة منها<sup>[06]</sup>:

1- المعادلة العامة، تكتب بالشكل<sup>[06]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + A - \rho C_p v \nabla T (+ \sigma: \dot{\epsilon} + \alpha T v \nabla P + \dots) \quad (10)$$

حيث:  $k$  - معامل الناقلية الحرارية ( $W/m.K$ )،  $A$  - منبع حراري ( $W/m^3$ )،  $C_p$  - السعة

الحرارية عند الضغط الثابت ( $J/kg.K$ )،  $\alpha$  - معامل الانتشارية الحرارية ( $1/K$ ).

## 1-4-I المعادلة الحرارية في ثلاثة أبعاد:

المعادلة (10) هي معادلة ثلاثية الأبعاد في الحقيقة، لكن أكيد أنها تأخذ عبارات مختلف بتغير الإحداثيات، إذ يعود الاختلاف في أصل إلى كفيات كتابة معامل لابلاس. حيث في الوسط لا متجانس مثل جسم الإنسان حيث تختلف الخواص الحرارية للجلد عن الخواص الحرارية في العضلات، عنها في الأحشاء، عنها في الدم، عنها في السوائل الموجودة في الجسم، فإن المعادلة تأخذ الصيغة التالية<sup>[07]</sup>:

- في الاحداثيات الكارتيزية تكتب بالشكل:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A \quad (11)$$

أما في وسط متجانس: في وسط متجانس يكفي اعتبار  $k_x = k_y = k_z = k$ ، كما سوف نعتبره

مع بقية أنواع الإحداثيات.

- في الاحداثيات الاسطوانية تكتب بالشكل:

$$\frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{A}{k} \quad (12)$$

- في الاحداثيات الكروية تكتب بالشكل:

$$\frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{A}{k} \quad (13)$$

## 2-4-I المعادلة الحرارية في بعد واحد:

هي أبسط صيغ المعادلة و تصف معدل تغير الحرارة في قضيب نحيف و طويل لدرجة يمكن حينها غض الطرف عن إنتقال الحرارة في بقية الأبعاد نتيجة ضآلة تأثيرها. و تعطى المعادلة بحسب الصيغة التالية و هي مشتقة من قانون فورييه و قانون حفظ الطاقة<sup>[08]</sup>.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{C_p} \quad (14)$$

ملاحظة: حين تكون مشتقة الدالة بالنسبة للصفر حيث فإن المعادلة تأخذ شكل معادلة بواسون.

## الفصل الثاني:

# نماذج وصف البنية الداخلية للأرض

### 1-II المقدمة:

تم الكشف عن البنية العميقة للأرض بشكل خاص بطريقة غير مباشرة، و ذلك بفضل مساهمة العديد من تخصصات علوم الأرض نذكر من بينها<sup>[09]</sup>:

\* دراسة الآبار التي لا تكفي لأن عمقها لا يتجاوز 12 km، بينما نصف قطر الأرض يقدر بـ 6370 km. لذلك لا يمكن معرفة الجزء الداخلي من الكرة الأرضية، إلا بشكل غير مباشر.

\* علم الزلازل، حيث يتم دراسة الزلازل الطبيعية و الاصطناعية.

\* قياس الجاذبية، الذي يتم بدراسة تغيرات g، تسارع الجاذبية.

\* علم البراكين، المؤسس على دراسة البراكين و الأنشطة البركانية.

\* المغناطيسية الأرضية، التي يدور موضوعها حول دراسة المجال المغناطيسي للأرض.

\* الطاقة الحرارية الأرضية، المعتمدة على دراسة توزيعات درجة الحرارة داخل الأرض، الظواهر الفيزيائية

و الجيولوجية المرتبطة بها.

\* الجيوكيمياء، و ذلك عبر دراسة التركيب و الخصائص الكيميائية للصخور.

\* علم المعادن، عن طريق دراسة التركيب و الخصائص المعدنية للصخور.

\* الدراسات المخبرية عن طريق خلق الظروف الديناميكية الحرارية السائدة في أعماق الأرض بدراسة

المواد الأرضية.

\* دراسات النيازك و الكويكبات التي تشكلت في نفس وقت تشكل الأرض.

لا يمكننا التعامل بالتفصيل مع مساهمة كل من هذه التخصصات، لذلك سنقتصر فقط على الإشارة بإيجاز إلى مبدأ هذه الأساليب، مع إبراز النتائج الأساسية.

## II-2 نموذج علم الزلازل:

### II-2-1 البيانات الزلزالية:

أثناء الزلازل الطبيعية (التي تحدث بسبب انكسار الصخور الباطنية) أو الانفجارات القوية (النوية على سبيل المثال) هناك انبعاث لموجات زلزالية من بينها<sup>[10]</sup>:

\* موجات P، الموجات الطولية أو الموجات الأولية و التي تعبر جميع البيئات.

\* موجات S، الموجات العرضية أو الموجات الثانوية و التي تمر عبر الوسائط الصلبة و لا تمر عبر

السوائل.

بعد كل زلزال، النتائج التي يتم الحصول عليها فيما يتعلق بسرعات الموجات P و S كدالة لعمق الكرة الأرضية هي نفسها دائماً. يتم التعبير عنها في شكل رسم بياني لمنحنيات سرعات الموجة الزلزالية كدالة للعمق (الشكل (II-1)).

الزيادة المفاجئة في السرعات  $V_p$  و  $V_s$  عند أعماق معينة (بالإضافة إلى انخفاضها عند مستويات معينة) تعني أن موجات P و موجات S قد مرت من وسط إلى آخر بخصائص فيزيائية مختلفة جداً وأنهم عبرت الحدود، أي أن هناك أسطح الانقطاع داخل الأرض.

و هكذا تم تسليط الضوء على العديد من الأسطح المتقطعة و التي تحدد، داخل الأرض، طبقات كبيرة إلى حد ما متحدة المركز (مناطق زيادة السرعات) و التي تم تحسين طبيعتها الفيزيائية عن طريق الحساب من خلال الدراسات المخبرية. و في الواقع، أظهرت هذه الدراسات أن السرعات المقابلة  $V_p$  و  $V_s$  للموجات الزلزالية P و S تزداد بشكل حاد كدالة لعمق الأرض، و أنها تتعلق بثلاث معاملات لوسط

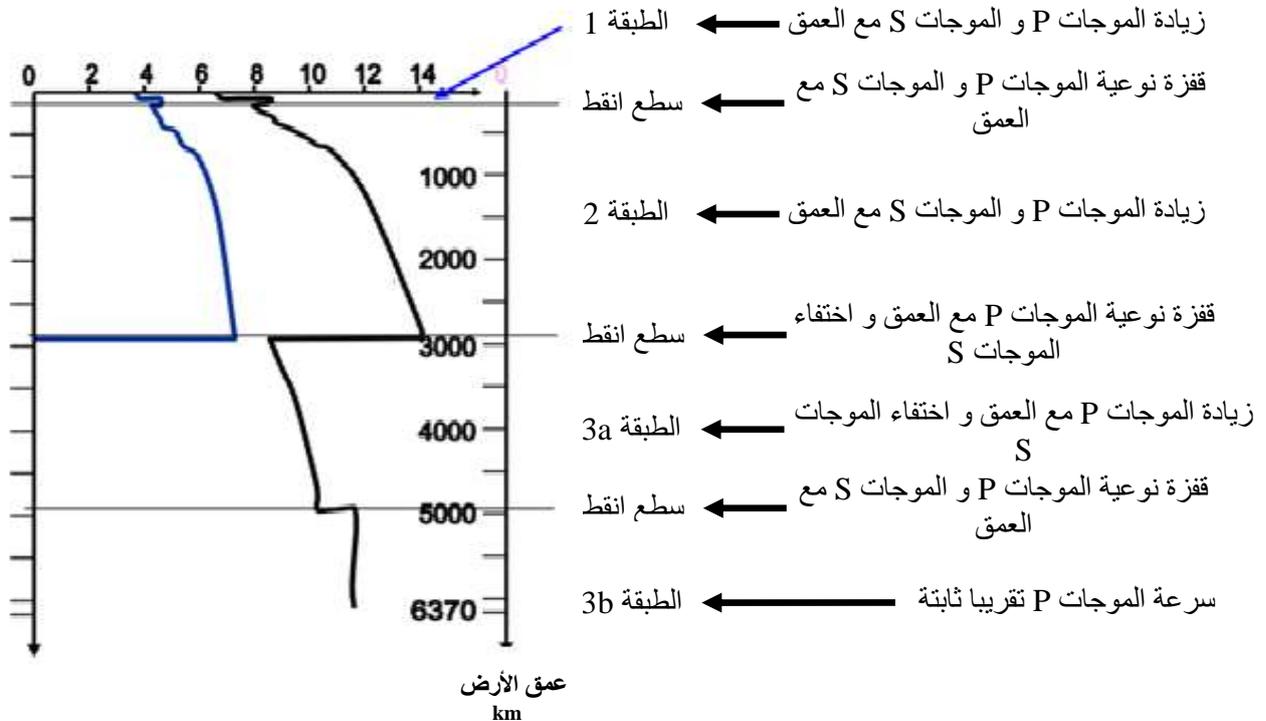
الانتشار مرتبطة بالعلاقات التالية<sup>[11]</sup>:

$$V_P = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\mu + k}{d}} \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{d}} \quad (15)$$

حيث:  $\mu$  - معامل الصلابة، الذي يقيس مقاومة الصخور لتغيير الشكل (للسوائل  $\mu = 0$ ، و بالتالي  $V_S = 0$ ، أي S لا تنتقل). و  $k$  - معامل عدم الانضغاط، الذي يقيس مقاومة الصخور للتغير في الحجم. بالإضافة أن  $d$  - هي كثافته (أو  $\rho$  كثافته).

لاحظ أنه في الواقع، كلما زاد الضغط مع زيادة العمق و انضغاط المواد، يجب أن تزداد الكثافة  $d$  مع العمق. هذا يعني أنه كلما زادت السرعة، زادت الكثافة  $d$  و كلما زادت سرعة الوسائط التي تعبرها الموجات P أصبحت أكثر صلابة و لا انضغاطية (لأن تغير  $\mu$ ،  $k$  أسرع من تغير  $d$ ).  
يسمح حساب  $\mu$  و  $k$  و  $d$  بإيجاد التركيبة التي تتوافق بشكل أفضل مع السرعة التي لوحظت أثناء الزلازل على أعماق مختلفة، يتضمن هذا الحساب أيضاً علم الزلازل التجريبي على العديد من المواد المعروفة التي تم فيها تحديد سرعة انتشار موجات P و S.

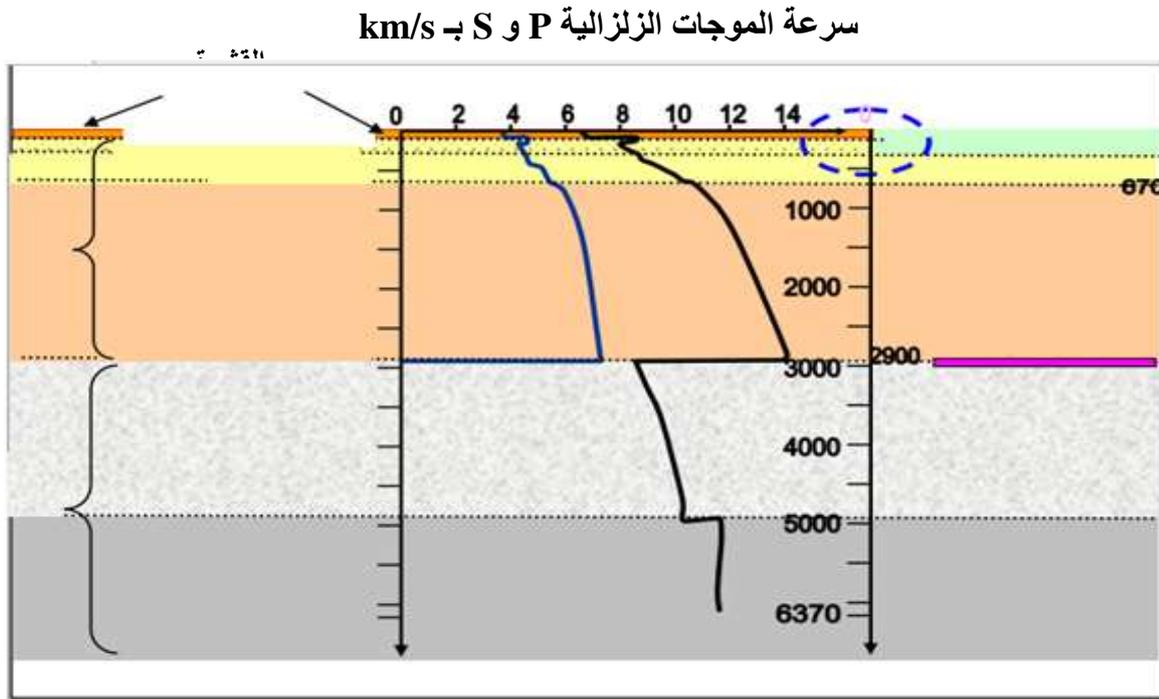
### سرعة الموجات الزلزالية P و S.



الشكل (II-1): رسم بياني لمنحنيات سرعات الموجة الزلزالية كدالة للعمق [12].

## 2-2-II البنية الداخلية للأرض:

من نتائج هذا العمل، سنقتصر على رسم الخطوط العريضة لهيكل الكرة الأرضية في شكل مخطط في (الشكل (2-II)) أدناه، يوضح فئتين من التقسيمات الفرعية المستخدمة بالتوازي للجزء الداخلي من الكرة الأرضية<sup>[13]</sup>.



الشكل (2-II): مخطط يوضح البنية الداخلية للأرض على أساس الانقطاعات الرئيسية في سرعات الموجات الزلزالية<sup>[12]</sup>.

- (أ) - على أساس الانقطاعات الرئيسية في سرعات الموجات الزلزالية؛ التي أبرزها التباين المفاجئ في سرعة الموجات الزلزالية للأرض، من الممكن التمييز من الخارج إلى الداخل (الشكل (2-II)):
- 1- القشرة: و هي الطبقة الخارجية التي تمثل 1.5% من حجم الأرض، و هي محدودة في القاعدة بسبب الانقطاع الكبير لمهوروفيتش (المعروف باسم موهو)، يجب أن نميز بين نوعين من القشرة:
    - القشرة القارية، يبلغ متوسط سمكها 35 km (و لكن يمكن أن يصل سمكها إلى 70 km تحت سلاسل الجبال العالية).

- القشرة المحيطية رقيقة جدا (من 5 إلى 8 كيلومترات تحت المحيطات).

ترتبط الاختلافات في سمك القشرة ارتباطاً وثيقاً بظواهر التوازنات التي تتطوي على اختلافات في

كثافة الصخور.

2- الوشاح: يمثل 82.5% من حجم الأرض، سمكها 2900 km، و هي محدودة في القاعدة

بسبب الانقطاع الرئيسي لجوتتبرج، يمكننا التمييز داخل هذا الوشاح وحدتين:

- الوشاح العلوي الذي يمتد حتى 670 km.

- الوشاح السفلي الذي يتراوح عمقه بين 670 و 2900 km.

3- النواة: تمثل 16% من الكرة الأرضية. يبلغ سمك النواة الأقصى 3300 km. تحتوي على:

- نواة خارجية، و يتراوح عمقها بين 2900 و 5150 km.

- نواة داخلية (أوبذور). يتراوح عمقها بين 5150 و 6370 km.

(ب) - بناءً على السلوك المادي للطبقات؛ عندما نأخذ في الاعتبار السلوك المادي للمواد، اعتماداً على

ما إذا كانت تتصرف مثل المواد الصلبة أو مثل المواد اللينة، فإننا نميز:

1- الغلاف الصخري (ليتوسفير) و هو عبارة عن كتلة صلبة و التي تشمل القشرة و الجزء

العلوي الصلب من الوشاح العلوي، يتراوح سمكها بين 5 km تحت المحيط و 100 km على مستوى

القارات (شكل II-3)). يتم تمييز حده الأدنى بانقطاع الموجة الزلزالية المعروفة باسم LVZ (منطقة

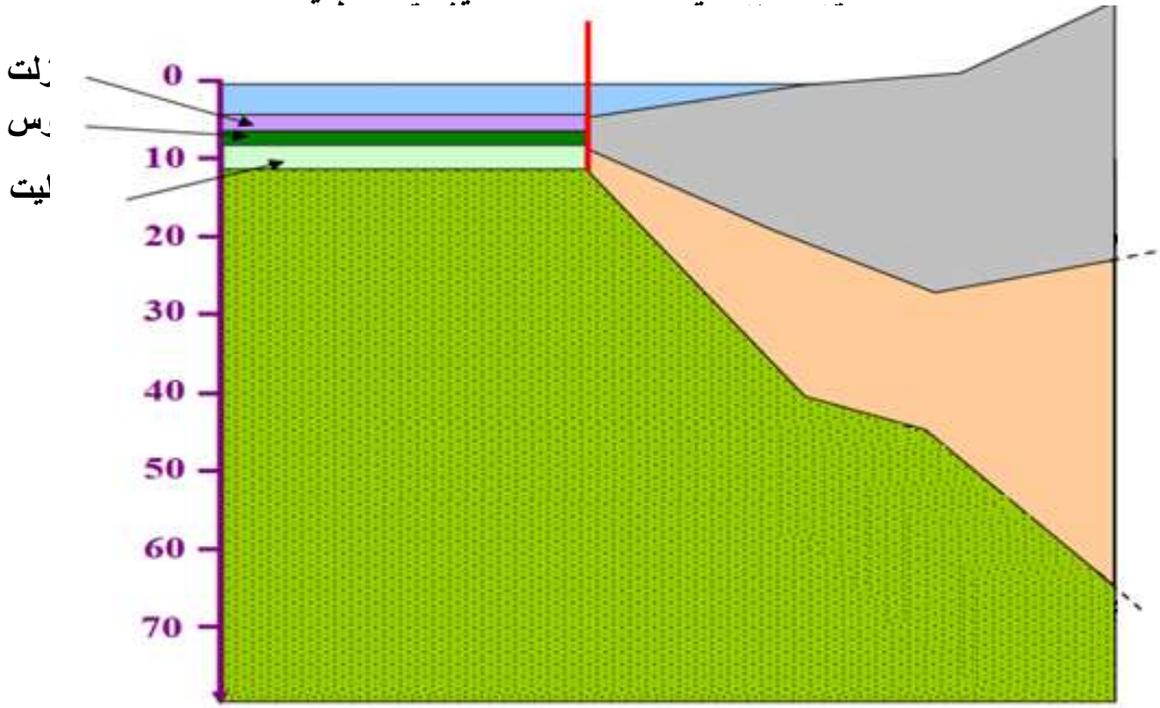
السرعة المنخفضة)، يتم توزيع كثافة الغلاف الصخري على النحو التالي:

- الجزء العلوي من القشرة القارية، الذي تقدر كثافته بـ  $(d=2.7 \text{ g/cm}^3)$ .

- الجزء السفلي من القشرة القارية، الذي تقدر كثافته بـ  $(d=3 \text{ g/cm}^3)$ .

- القشرة المحيطية، الذي تقدر كثافته بـ  $(d=3.2 \text{ g/cm}^3)$ .

- عند مستوى الوشاح العلوي الصلب، الذي تقدر كثافته بـ  $(d=3.4 \text{ g/cm}^3)$ .



الشكل (II-3): مخطط يوضح البنية الداخلية للأرض بناءً على السلوك المادي للطبقات [12].

- 2- الاستينوسفار و هو منطقة "ناعمة" أو "بلاستيكية" تمتد من الحد الأدنى للغلاف الصخري إلى عمق 670 km ، يتكون من بقية الوشاح العلوي، و الجزء العلوي منها عبارة عن منطقة ذات سرعة موجة زلزالية منخفضة (LVZ)، و التي يبلغ سمكها حوالي 200 km. كثافته حوالي  $3.3 \text{ g/cm}^3$ .
- 3- الميزوسفير كتلة "صلبة"؛ و هو مرادف للغطاء السفلي، يتميز الحد الأعلى (670 km) بالزيادة المفاجئة في سرعات الموجات الزلزالية إلى غاية انقطاع جوتنبرج (2900 km). تزداد كثافته أيضًا مع هذا العمق، من  $3.3$  إلى  $5.5 \text{ g/cm}^3$ .
- 4- المنطقة D تم تسليط الضوء عليها من خلال دراسة مفصلة لإرسالات الموجة P أثناء زلزال قوي، و هي منطقة ناعمة يتراوح سمكها بين 200 و 300 km بين الطبقة السفلية و النواة الخارجية، دورها غير معروف حالياً.

6- النواة الخارجية عبارة عن طبقة سائلة بين الطبقة 'D' و انقطاع ليمان (Lehman). كثافته تزداد مع العمق، ينتقل من 9.5 إلى  $11.5 \text{ g/cm}^3$ .

7- النواة الداخلية عبارة عن طبقة صلبة تسمى البذرة. كثافته  $d$  تساوي  $12 \text{ g/cm}^3$ .

## 3-II النموذج الجيوكيميائي و المعدني للأرض:

### 1-3-II مبدأ طرق الدراسة:

التركيب الكيميائي و المعدني للمواد داخل الأرض معروف جيداً لأول 250 km من عمق الأرض من خلال الدراسة المباشرة<sup>[14]</sup>:

- الزبرجد (نوع من الصخور) التي كانت ذات يوم صخور عميقة، لكنها الآن مرئية على السطح نتيجة لارتفاعها (بواسطة آلية الاعتراض) وتآكل الأرض التي أخفتها.

- البازلت و جيوبه من الزبرجد التي تقع الصحارة (الماغما) في الوشاح على أعماق مختلفة، بعد 250 km، التركيب الكيميائي و المعدني معروف حالياً بشكل غير مباشر من الدراسة.

- المواد عن طريق ضغط على سبيل المثال، الزبرجد بين خليتين من الألماس مع ضغوط و درجات حرارة مكافئة لتلك الموجودة في مناطق مختلفة من الوشاح.

- سرعات انتقال الموجات الزلزالية في المواد المختلفة بمقارنة النتائج مع السرعات التي تم الحصول عليها أثناء الزلزال.

- قدمت دراسة النيازك المتميزة و كذلك علم الزلازل التجريبية فكرة عن التركيب الكيميائي للنواة.

### 2-3-II النتائج:

1- القشرة: المكونات الرئيسية للقشرة هي السيليكا  $\text{SiO}_2$  (50 إلى 60% في المتوسط) و الألومينا  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15 إلى 16% في المتوسط). لهذا، يشار إلى القشرة باسم SIAL.

من المكونات الأخرى، التي تم تحديدها على أنها أكاسيد و التي تكون بنسبة مئوية أقل بكثير؛ قد يتم ذكرها بشكل رئيسي CaO و MgO و FeO، هذه الثلاثة الأخيرة أكثر وفرة في القشرة المحيطية و في الجزء السفلي من القشرة القارية منها في القشرة القارية العليا (الشكل II-4)).

لأن نسبة السيليكا  $y$  تتجاوز نسبة معينة، فإن القشرة القارية العليا يقال إنها "حمضية"، و يتكون بشكل أساسي من الكوارتز + الفلسبار + البيروكسين.

لأن نسبة السيليكا  $y$  هناك أقل من نسبة معينة من القشرة القارية السفلية و القشرة المحيطية منها ما يسمى "الأساسية". كوارتز + بيروكسين + أكاسيد.

يتكون الجزء السطحي من القشرة القارية العليا (بضعة آلاف من الأمتار) بشكل أساسي من رواسب و صخور رسوبية متحولة في قاعدة هذا الجزء، و لكن معظمها يتكون من صخور صخرية جرانيتية، و من هنا جاء اسم القشرة في بعض الأحيان "صخور الجرانيت" و الصخور المتحولة.

2- الوشاح: يحتوي الوشاح على نسبة أقل من السيليكا (40% فقط من تركيبته) مقارنة بالقشرة؛ لذلك فهو "أساسي" للغاية. يحتوي على نسبة عالية من المغنيسيوم، و من هنا جاء اسم SIMA للوشاح. يتكون الجزء العلوي من الزبرجد، و ربما يحتوي الجزء السفلي منه على نفس تركيبة الوشاح العلوي، لكن الذرات تتجمع في هياكل أكثر كثافة (أكثر إحكاما) بسبب زيادة الضغط.

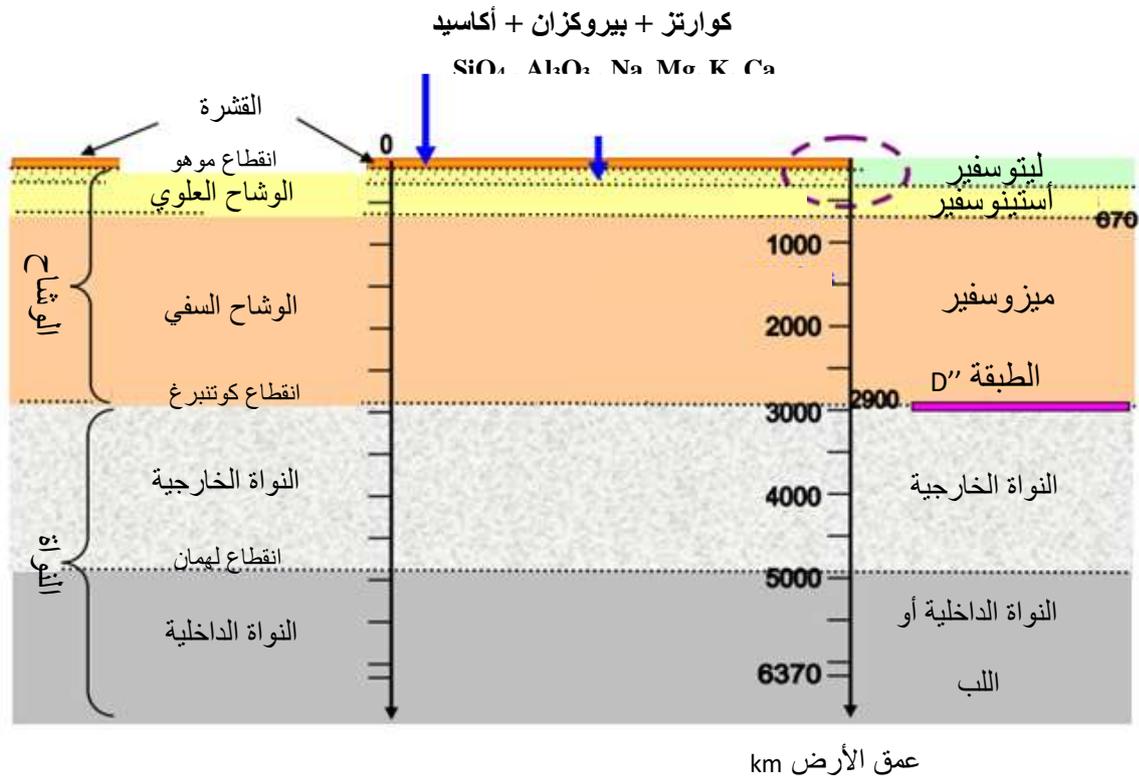
من وجهة نظر علم المعادن:

- الجزء العلوي من الوشاح العلوي مصنوع من أوليفين + بيروكسين + أكاسيد.
- تتكون قاعدة الوشاح العلوي من الإسبنيل (زيتون كثيف جدًا) + بيروكسين + أكاسيد.
- يتكون الوشاح السفلي من البيروفسكايت (أوليفين شديد الكثافة جدًا) + أكاسيد.

3- النواة:

- تتكون النواة الداخلية من عناصر محبة للحديد: الكثير من الحديد و النيكل و الكوبالت و الذهب و البلاتين، ... إلخ.

- تتكون النواة الخارجية ("السائل") من نسبة عالية من الحديد مرتبطة بعناصر خفيفة مثل الأكسجين و الكبريت؛ و قليل من السليكا.



الشكل (II-4): توزيع العناصر الكيميائية و المعادن داخل الأرض [12].

ملاحظة: هناك نموذجين الآخرين مهمين، و هما النموذج الحراري و النموذج الديناميكي. و نظرا لارتباطهما الوثيق من جهة، و أهميتهما في دراستنا من جهة أخرى، فضلنا تأجيل الاطلاع عليهما للفصل القادم.

# الفصل الثالث:

## الحرارة و الأرض

### III-1 مقدمة:

تصل درجة حرارة الأرض إلى حوالي 5270 K، و يتصف كوكب الأرض بسخونته الشديدة منذ 4.5 مليون سنة و حتى الوقت الحاضر، و هي مستمرة لفترة أطول. هذه الحرارة ترجع إلى النشاط الإشعاعي، التقلصات في الحجم و الإضطرابات بين الصفائح التكتونية. و تحتفظ الأرض بسخونتها نتيجة وجود القشرة السمكية حولها، و التي تمثل الغطاء المحكم الذي يمنع تسرب الهواء من خلالها. كما يلعب العديد من العناصر الموجودة في الأرض مثل: اليورانيوم، البوتاسيوم، الثوريوم و غيرها على زيادة استمرار انبعاث الحرارة من باطن الأرض<sup>[15]</sup>.

سنعالج في هذا الفصل كل ما يتعلق بالحرارة الباطنية للأرض؛ ابتداءً من مظهرها الخارجي إلى غاية الاطلاع على الطاقة الناتجة عن هذه الحرارة، مروراً بمصدرها، تدفقها، الحراري الديناميكي النموذجين التخلفين من الفصل السابق و انتشارها بالمكونات الأرض الباطنية، لكن قبل ذلك رأينا انه من الضروري الاطلاع على أهم المناطق الحرارية على سطح الأرض.

### III-2 المناطق الحرارية السطحية:

قسم العلماء سطح الأرض إلى عدة مناطق حرارية، ترتب على اختلاف درجات و هي كالتالي<sup>[04]</sup>:

1- المنطقة الحارة "المدارية": و تقع بين مدار السرطان و مدار الجدي و يمر بوسطها خط الاستواء، و تتميز بأنها حارة على مدار السنة تقريباً.

2- المنطقتان المعتدلتان "الشمالية و الجنوبية": و تتحصران بين كل من المدارين و الدائرتين القطبيتين (66 1/2 ش و ج) (1)، تقل فيهما الحرارة كلما ابتعدنا عن المدارين و اقتربنا من دائرتين القطبيتين، و بالتالي يمكن تقسيم كل منها إلى منطقتين متميزتين كالتالي:

أ- منطقة معتدلة دفيئة: توجد بين خطي عرض 23 1/2 و 40 ش و ج و تتميز بأنها حارة صيفاً و دفيئة شتاءً.

ب- منطقة معتدلة باردة تنحصر بين خطي عرض 40 و 66 1/2 ش و ج و تتميز بأنها معتدلة صيفاً باردة شتاءً.

3- المنطقتان القطبيتان " الشمالية و الجنوبية ": و تقعان بين الدائرتين القطبيتين و القطبين الشمالي و الجنوبي، و تتميزان بشدة البرودة و تراكم الثلوج طوال العام تقريباً.

### III-3 الحرارة الباطنية الأرضية:

#### III-3-1 المظهر الخارجي للحرارة الباطنية الأرضية:

ثمة ظواهر طبيعية تشير إلى سخونة باطن الأرض، أهمها النشاطات البركانية التي ترافقها انفجارات و أبخرة و غازات و مقذوفات بركانية و تدفق حمم (لابات) منصهرة و ينابيع معدنية حارة، و يتعرض الإنسان إلى حرارة باطن الأرض مباشرة حين يتعمق داخل الحفر المنجمية، مثل منجم و سترن ديب ليفل لاستثمار الذهب في جنوب إفريقيا، الذي تصل أعماقه إلى نحو 3500 m، إذ تقع الحرارة في أعماقه ما يقارب من 40 °C، على الرغم من استخدام أجهزة التهوية و التكييف. كما يلاحظ هذا التزايد الحراري بوضوح في عمليات الحفر البئري الآلي العميق في أثناء عمليات التنقيب عن النفط<sup>[16]</sup>.

#### III-3-2 التدفق الحراري في باطن الأرض:

بناء على قياسات أجريت في أثناء التعمق بالحفر في باطن الأرض يقدر العلماء تزايد درجة الحرارة مع العمق بنحو 3 °C لكل 1000 m، و هو ما يعرف بالتدرج الحراري الأرضي. و يزيد هذا

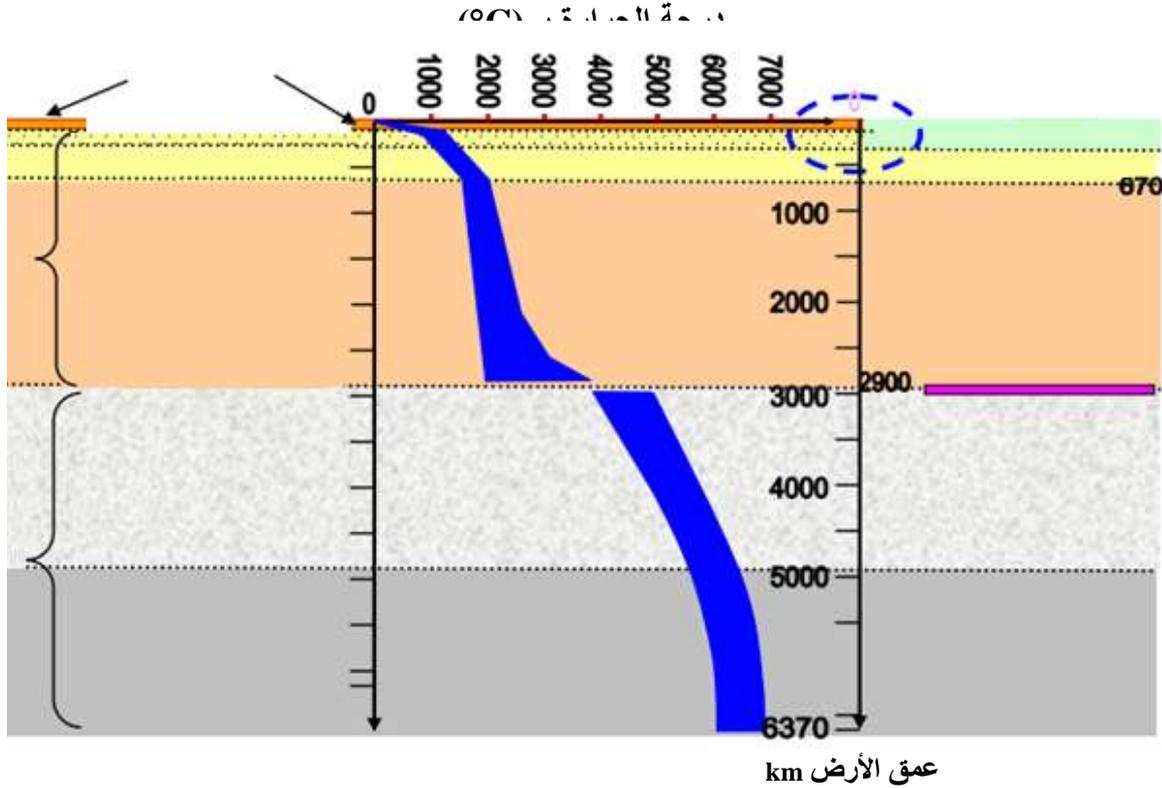
المعدل عادة أو يتضاعف في أماكن النشاط الناري الدسيس أو النشاط البركاني، فإذا كانت القياسات المباشرة لهذا التدرج الحراري تقتصر على أعماق سطحية جدا من الأرض، إذا إن عمق الآبار الآلية التي حفرت لا تزيد إلا قليلا على 100 m، فإنه يتوقع إذا استمر تزايد الحرارة وفق هذا المعدل أن تصل درجة الحرارة في مركز الأرض على عمق 6500 km إلى 2 مليون درجة، و هي درجة أعلى من درجة حرارة سطح الشمس. لذلك يعتقد أن معدل هذا التزايد الحراري، و في معظم أعماق الأرض أقل بكثير مما ذكر [17].

يحاول العلماء اعتمادا على مختلف المعطيات المتوفرة، التوصل إلى وضع صورة مقبولة لتدرج الحراري الأرضي. و يمثل الشكل (III-1) أدناه التدرج الحراري الأرضي الذي يعتقد وجوده في أعماق القارات و تحت المحيطات، إذ يلاحظ أن معدل هذا التدرج يزيد قليلا تحت المحيطات على ما هو عليه في أعماق القارات. و بما أن حرارة الحمم البركانية تراوح بين  $900 - 1200^{\circ}\text{C}$ ، فإن معدل ازدياد درجة الحرارة باطن الأرض مهما كان ضئيلا سوف يصل بالمواد الصخرية إلى درجة الانصهار على أعماق قليلة نسبيا، و تصبح درجة حرارتها في أعماق أكثر أعلى بكثير من درجة انصهارها، إلا أن خضوعها لضغوط عالية يبقياها في الحالة الصلبة و لا يبدأ فيها الانصهار الجزئي إلا حين ينحسر عنها الضغط نتيجة اقترابها من سطح الأرض أو حدوث فوالق عميقة [18].

### III-3-3 النموذج الحراري لباطن الأرض:

بالإضافة إلى ما جاء أعلاه، حول التدفق الحراري الباطني، يعتبر انتقال الحرارة من الداخل إلى الخارج عملية معقدة تحدث بشكل أساسي عن طريق التوصيل في طبقات الحدود الحرارية (الغلاف الصخري، حدود النواة -الوشاح)، و عن طريق الحمل الحراري على مقياس الوقت الجيولوجي في الطبقات. قدرة على التشويه عن طريق الزحف (الوشاح، النواة) كما سنرى بالتفصيل [19].

تم تقدير تغير درجة الحرارة كدالة للعمق الممثل في لشكل (1-III) أدناه بفضل التجارب التي أجريت على المعادن ذات الضغوط العالية، و التي جعلت من الممكن بشكل غير مباشر معرفة درجات الحرارة السائدة في أعماق الأرض.



الشكل (1-III): توزيع الحرارة في باطن الأرض [12].

### III-3-4 انتشار الحرارة عبر الطبقات الداخلية الأرضية:

العمليات الحرارية التي تحدث في باطن الأرض غالباً ما تحدث في الوشاح، الذي يشغل أكبر جزء من الحجم الكلي للكوكب. بينما القشرة تكون الأقل جزءاً، لكنها الأكثر تأثيراً مما يحدث في العمق من هذه العمليات، لهذا سوف نتطرق لتلك العمليات بالتفصيل أدناه. أما أحر الأجزاء و هو النواة، فنذكر فقط انه يحتوي على درجات حرارة و ضغوط كبيرة جداً لدرجة أن المعادن تتجمع معا و لا تكون قادرة على التحرك مثل السائل، و لكنها تضطر إلى الاهتزاز في مكانها كمادة صلبة [19].

قبل التطرق بالتفصيل لهذه العمليات، سوف نتطلع على مفاهيم أساسية و هي:

1- معادلة الطاقة:

بإعادة كتابة المعادلة الحرارة رقم(10) من الفصل الأول، و هي<sup>[12]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + A - \rho C_p v \nabla T + \dot{\epsilon} + T v \nabla P + \dots \quad (10)$$

تصف أجزاء معادلة الطاقة ما يلي:

I- تغيير درجة الحرارة مع مرور الوقت

II- نقل الحرارة بالتوصيل (والإشعاع)

III- إنتاج الحرارة (على سبيل المثال ، عن طريق الاضمحلال الإشعاعي)

IV- نقل الحرارة عن طريق التآفق

V- الحرارة الناتجة عن التبريد اللزج ، تسخين القص

VI- الحرارة المتولدة عن ضغط ثابت الحرارة

VII- أجزاء أخرى، على سبيل المثال، الحرارة الكامنة المتولدة أو الممتصة في انتقالات الطور

(صلب-مائع أو صلب-صلب).

سنركز فيما يلي على الأجزاء من الأول إلى الرابع، و هي أهم أجزاء درجات حرارة الوشاح و

نلقي نظرة فاحصة على كل منها.

2- التوصيل<sup>[21]</sup>:

نزيد على ما عرف سابقا في العنصر (1-3-1) من الفصل الأول، على أن التوصيل في صخور

الوشاح يتم عن هو نقل الحرارة عن طريق حركة الفونونات (حزم منفصلة من طاقة اهتزازية شعرية). إذ

يصف التوصيل أيضا كما جاء سابقا في نفس العنصر بقانون فورييه التالي:

$$q = -k\nabla T \quad (16)$$

حيث؛  $q$  هي الحرارة ( $W/m^2$ ).

تقول هذه المعادلة أن الحرارة تتدفق إلى أسفل تدرج لدرجة الحرارة (من الساخن إلى البارد)، قوة الحرارة يتم التحكم فيها عن طريق التوصيل الحراري. يمكن اشتقاق التغيير في المحتوى الحراري لحجم صغير  $V$  من المواد من خلال التوصيل على النحو التالي؛ بفترض التوصيل البسيط في الاتجاه الأفقي فقط، ثم يضاف التوصيل بالمقدار  $[q-(q + dq)]Sdt$  من الحرارة إلى الحجم عبر الجوانب مع المساحة  $S$  في الفاصل الزمني  $dt$ . هذا يغير المحتوى الحراري للحجم بواسطة  $VCpdT$ ، و يغير درجة حرارته بمقدار  $dT$ . إذن:

$$\rho VC_p dT = -Sdt \frac{\partial T}{\partial x} \quad (17)$$

أو:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (18)$$

في ثلاث أبعاد فإنها تأخذ:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T \quad (19)$$

III-3-4-1 انتشار الحرارة عبر القشرة الأرضية<sup>[22]</sup>:

أ- درجات حرارة الغلاف الصخري المحيطي:

يمكن استخدام هذه المعادلة لتحديد درجات حرارة الغلاف الصخري المحيطي، بافتراض أن الغلاف الصخري المحيطي يتشكل بتبريد الوشاح أثناء تحركه بعيداً عن سلسلة التلال المنتشرة و يبرد بشكل سائد في الاتجاه الرأسي. تسهل معادلة التوصيل الحراري بالتالي:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (20)$$

أين:

$$K = \frac{k}{\rho C_p} \quad (21)$$

هي خاصية حرارية أخرى للمادة، الانتشارية الحرارية (الوحدته  $m^2/s$ ).

من اجل الشرط الابتدائي  $t=0$  التي تكون فيها درجة الحرارة مساوية لدرجة حرارة الوشاح

الصاعدة؛ أي:  $T(z,0)=T_m$  و درجة حرارة السطح  $T(0,t)=0$  دائماً، ان يكون حل المعادلة (20) هو:

$$T(z, t) = T_m \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{Kt}} \quad (22)$$

حيث تكون دالة الخطأ:

$$\operatorname{erf}(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right) \int_0^x e^{-x^2} dx \quad (23)$$

تم إعطاء اشتقاق مفصل للمعادلة (22) في [ ]. يتم إعطاء تدفق الحرارة السطحي لتوزيع درجة

الحرارة هذا من خلال:

$$q(0, t) = \left[ -k \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{z=0} = \left[ \frac{-kT_m}{2\sqrt{Kt}} \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z^2}{4Kt}} \right) \right]_{z=0} = \frac{-kT_m}{\sqrt{\pi Kt}} \quad (24)$$

و هكذا يتغير تدفق الحرارة السطحية مع  $1/\sqrt{t}$ ، أي عكسياً مع الجذر التربيعي لعمر الغلاف

الصخري. هذا يتفق تماماً مع ملاحظات تدفق الحرارة المحيطية. علاوة على ذلك، فإن تبريد الغلاف

الصخري المحيطي سيؤدي إلى زيادة الكثافة مع تقدم العمر. بافتراض التساوي، يجب تعويض الغلاف

الصخري الأثقل بشكل متزايد عن طريق طبقة تيبكر بشكل متزايد من مياه البحر الخفيفة فوقها. يتم

الحصول على الوزن الإجمالي لعمود من الغلاف الصخري بدمج كثافته  $\rho = \rho_m(1 - \alpha(T - T_m))$  على

العمق، حيث يتم استبدال  $T$  بالمعادلة 1.7. يتم إعطاء تكامل دالة الخطأ من خلال:

$$\int_0^\infty \operatorname{erfc}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (25)$$

في ظل افتراض التساوي، من المتوقع أيضاً غرق الغلاف الصخري المحيطي مع  $1/\sqrt{t}$ . هذه

الملاحظات لقياس الأعماق في قاع البحر حتى عمر 70 إلى 80 مليون سنة. يقع الغلاف الصخري

الأقدم ضحلاً مما توقعته هذه العلاقة، أي يبدو أن هناك مدخلات حرارة إضافية. على الأرجح هذا المدخل الحراري موجود لجميع الأعمار و لكنه يصبح واضحاً في الغلاف الصخري الأقدم لأن فقد الحرارة بسبب التبريد قد انخفض بشكل كبير بحلول ذلك الوقت. لا يزال مصدر هذا المدخلات الحرارية قيد المناقشة، و الحمل الحراري الصغير تحت الألواح أو مدخلات الحرارة التراكمية بواسطة الأعمدة هي آليات مقترحة.

ب- درجات حرارة الغلاف الصخري القاري:

تعتبر الحرارة التي تنتجها العناصر المشعة مهمة في الميزانية الحرارية طويلة المدى لوشاح الأرض. إنه أيضاً مصدر حرارة مهم جداً في الغلاف الصخري القاري، إذ تحتوي القشرة القارية على حوالي 100 عنصر لإنتاج للحرارة أكثر من القشرة المحيطية، و معامل 1000 أكثر من الوشاح العلوي. جزء كبير من الغلاف الصخري القاري قديم (100 مليون و ما فوق)، و بالتالي يمكن وصف هيكله الحراري بأنه في حالة مستقرة ( $\partial T/\partial t=0$ ). بافتراض ثبات خصائص المواد مع العمق، يصبح حل معادلة التوصيل الحراري مع إنتاج الحرارة (الجزء الثالث):

$$T(z) = T_s + \frac{q_s z}{k} - \frac{Az^2}{2k} \quad q(z) = q_s - Az \rightarrow q_s = q_m + AD \quad (26)$$

حيث يشير الحرف السفلي إلى السطح، فإن الحرف السفلي m للوشاح و D هو سمك الطبقة مع عناصر إنتاج الحرارة. في الواقع، يتناقص تركيز العناصر المنتجة للحرارة مع العمق في القشرة و غالباً ما يتم تقريبه بـ:

$$A(z) = A_0 e^{-\frac{z}{D}} \quad (27)$$

حيث:  $A_0$  يقدر بحوالي  $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^3$  و D يكون من رتبة 10 كم. مع هذا التوزيع لمصادر الحرارة، وجد أن حوالي 50% من التدفق الحراري للسطح القاري ينتج في القشرة العلوية و 50% من التدفق الحراري مشتق من مستويات أعمق، أي القشرة السفلية و الوشاح. تم العثور على كل من A و  $q_s$

في القارات يتناقصان مع تقدم العمر الحراري (على الرغم من أن هذا الاتجاه أقل وضوحًا بكثير من المحيطات).

### III-3-4-2 انتشار الحرارة عبر الوشاح الأرضي<sup>[19]</sup>:

#### 1- الإشعاع:

يحدث انتقال الحرارة من خلال الإشعاع بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية في جزء الأشعة تحت الحمراء من الطيف، و لا يتطلب وسيطاً للانتقال إليه. يصبح تأثير الإشعاع مهماً فقط عند درجات حرارة أعلى الأكبر من حوالي 1000 K، عند حساب درجات الحرارة في الوشاح. عادة ما يتم تضمينه كجزء إضافي في الموصلية  $k = k_L + k_R$ ، حيث يصف  $k_L$  الموصلية من خلال الاهتزازات الشبكية و  $k_R$  من خلال الإشعاع.

#### 2- التأخير:

نحن نعلم أنه بسبب الموصلية المنخفضة لصخور الوشاح و السمك الكبير للوشاح، فإن التوصيل الحراري هو وسيلة غير ملائمة لتبريد الوشاح. على الرغم من اللزوجة الكبيرة للوشاح، تبين أن الحمل الحراري هو وسيلة أكثر فاعلية لفقدان حرارة الوشاح. نحن نميز التأخير عن الحمل الحراري: التأخير؛ نقل الحرارة بالحركة الجماعية، بغض النظر عن الدافع وراء الحركة. الحمل؛ النقل الحراري عن طريق التأخير، حيث حركة الكتلة مدفوعة بالطفو الداخلي.

إذا افترضنا وجود تعويم جماعي في الاتجاه الأفقي من خلال حجم صغير  $V$ ، فيمكننا حساب كيفية تعديل هذا المحتوى الحراري لهذا الحجم. ينقل التدفق حرارة  $\rho C_p T v S dt$  إلى الحجم عبر الجانب مع المنطقة  $S$  في الفاصل الزمني  $dt$ . على الجانب الآخر، يتم نقل  $\rho C_p (T+dt) v S dt$  و بالتالي فإن صافي التغير في الحرارة هو  $(\partial T / \partial x) v S dt \rho C_p$ . إذن:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho C_p v_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (28)$$

في ثلاث أبعاد فإنها تأخذ:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho C_p v \cdot \nabla T \quad (29)$$

3- الوشاح الكظوم:

في الأعماق الحمل الحراري لدرجات حرارة المتوسطة يتبع برودة ثابتة الحرارة. في الجزء العلوي و السفلي من طبقة الحمل الحراري تتشكل طبقات حد حرارية ذات تدرجات حرارية كبيرة، إذ يتم خلط الداخل جيداً حرارياً و بالتالي فهو متساوي الحرارة بشكل أساسي، مع زيادة طفيفة في درجات الحرارة مع العمق بسبب تأثير الضغط. على سبيل المثال، في غلاف الأرض، يكون التدرج الحراري الأرضي  $\partial T/\partial z$  حوالي  $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  بالقرب من السطح و حوالي  $0.3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  في الجزء الداخلي من الوشاح. هذا التدرج الصغير في الداخل هو التدرج الثابت، إذا تم نقل حجم صغير من المادة إلى عمق ضحل، فسيحدث زيادة طفيفة في الحجم بسبب انخفاض الضغط و يصاحب ذلك انخفاض طفيف في درجة الحرارة. هذا التغيير في درجة الحرارة هو تغير درجة الحرارة الثابتة.

يمكن تحديد التدرج الثابت من خلال علاقة الديناميكا الحرارية بين الأنتروبي S لكل وحدة كتلة و

درجة الحرارة T و الضغط P:

$$dS = \left[\frac{dS}{dT}\right]_P dT + \left[\frac{dS}{dP}\right]_T dP = \frac{C_p}{T} dT - \frac{\alpha}{\rho} dP \quad (30)$$

في حالة وجود عملية ثابتة انعكاسية، يكون التغيير في الأنتروبي صفراً، و بالتالي يكون التدرج

الثابت ثابتاً هو:

$$\left[\frac{dT}{dP}\right]_S = \frac{\alpha T}{\rho C_p} \quad (31)$$

يمكن أيضاً التعبير عن التدرج اللوني من حيث العمق، مع ذكر أن  $dp = \rho g dz$  في مائع

هيدروستاتيكي:

$$\left[\frac{dT}{dz}\right]_s = \frac{\alpha g T}{C_p} \quad (32)$$

بالتالي لتحديد التدرج الكظوم يجب معرفة إلى قيم  $\alpha$  و  $C_p$  مع العمق، التي يتم الحصول عليها من التجارب المعملية، كما يجب تقدير الكثافة كدالة للعمق. يتم تحديد الكثافة بشكل عام من علم الزلازل (كما رأينا سابقا). تكامل التدرج الكظوم يتعلق بالضغط، ثم ينتج تغير درجة الحرارة كدالة للضغط. يتم الحصول على درجة الحرارة كدالة للعمق من خلال دمج توزيع الكثافة للحصول على  $g$  كدالة للعمق. يمكن الحصول على العديد من المعاملات الحرارية في معامل واحدة، و هو المعامل التيرموديناميكي (Grüneisen) الذي ليس له وحدة ذو العبارة  $\gamma = \alpha K_s / \rho C_p$ .

يتميز هذا المعامل أنه قريب من 1 في جميع أنحاء الوشاح، ثم تصبح التدرجات الكظومة:

$$\left[\frac{\partial T}{\partial P}\right]_s = \frac{\gamma T}{K_s} \quad (33)$$

و

$$\left[\frac{\partial T}{\partial z}\right]_s = \frac{\gamma g T}{\phi} \quad (34)$$

حيث؛  $\phi = K_s / \rho$  و  $K_s$  معامل الانضغاط الحجمي أو عدم الانضغاط (وحدته Pa)، و الذي يحسب كالتالي:

$$K_s = \rho \left[\frac{\partial P}{\partial \rho}\right]_s = V \left[\frac{\partial P}{\partial V}\right]_s \quad (35)$$

يحسب معامل الانضغاط الحجمي خلال قيم السرعات الزلزالية (كما رأينا سابقا)، هذه العلاقة تجعل من البيانات الزلزالية مهمة فاضة قيودا على الحالة الحرارية (و التركيبية) للوشاح. من خلال تعريف  $K_s$ ، يمكن أن يرتبط التغير في درجة الحرارة و الكثافة بشكل مباشر و يتم توضيح فائدة معامل  $\gamma$  بشكل أكبر:

$$\frac{dT}{T} = \gamma \frac{d\rho}{\rho} \quad (36)$$

هذا يعطي:

$$T = T_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (37)$$

علاقة يمكن استخدامها لحساب درجات الحرارة من الكثافة و الاعتماد كثافة و درجة الحرارة  $T_0$  الابتدائيتين في طبقة ثابتة الحرارة، هذه العلاقة غير صالحة عند المرحلة أو التحولات الكيميائية الحادثة. توفر درجة حرارة انصهار البازلت وسط المحيطات درجة حرارة البداية في الجزء العلوي من الوشاح، كما توفر درجة حرارة انصهار الحديد درجة حرارة البداية للنوى الخارجية و الداخلية، حيث توفر بيانات المختبرات تقديرات لكثافات البداية.

يختتم هذا ملخصاً للقيود المفروضة على المنحنى الحراري أحادي البعد للوشاح، ستصبح أوجه الشك في درجات الحرارة تحت الغلاف الصخري أكثر وضوحاً عند مناقشة الشروط الزلزالية. حتى الاختلافات في هذا التصميم أحادي الأبعاد بترتيب 100-200 °C، مهمة لأن ريولوجيا الوشاح تعتمد بشدة على درجة الحرارة. علاوة على ذلك، تؤثر الانحرافات الجانبية عن توزيع درجة الحرارة أحادي الأبعاد على ديناميكيات الوشاح (المساحات العلوية و السفلية).

#### 4- ميزانية الحرارة:

لفهم الحالة الحرارية للوشاح، نحتاج إلى تغطية موضوع آخر. يعتمد التطور الحراري للوشاح بشكل خاص على ماهية مصادر الحرارة و كيفية توزيعها. كما ذكرنا من قبل، يعد إنتاج الحرارة المشعة مصدرًا مهمًا لحرارة الوشاح. ترتبط تقديرات كمية الحرارة المشعة الناتجة بتقديرات تكوين الأرض، و بالتحديد مع تقديرات كمية العناصر المشعة المنتجة للحرارة. تأتي الشروط الأخرى على الميزانية الحرارية الإجمالية و المصادر المختلفة من تدفق الحرارة السطحية.

4-أ تدفق الحرارة السطحية: لنبدأ بالقيود الناجمة عن تدفق حرارة السطح، تمت مناقشة حرارة الأرض في الغلاف الصخري من قبل ملاحظات تدفق الحرارة السطحية المتطابقة و يمكن استخدامها لاستقراء

المناطق التي لا تتوفر فيها قياسات. توفر نماذج التبريد المحيطي تقديرات تدفق الحرارة السطحية في كل مكان، حيث يُعرف عمر قاع المحيط (و هو كل قاع المحيط باستثناء بعض المناطق ذات الغطاء الرسوبي الكثيف للغاية). يبلغ متوسط تدفق حرارة سطح المحيط المرصود  $57 \text{ MW/m}^2$ ، يبلغ متوسط التدفق الحراري النموذجي، و الذي يصحح بشكل خاص تأثير الدورة الحرارية المائية بالقرب من التلال حوالي  $100 \text{ MW/m}^2$ . يعطي التدفق الحراري النموذجي تدفقاً حرارياً إجمالياً من خلال قاع المحيط  $3.1 \cdot 10^{13}$ ، بينما تغطي المحيطات حوالي 61% من مساحة السطح، فإنها تساهم بحوالي 70% من إجمالي تدفق الحرارة السطحية. بطريقة مماثلة، يمكن تقسيم القارات إلى مقاطعات تدفق حراري على أساس العمر الحراري و نوع القشرة، اين يبلغ متوسط التدفق الحراري القاري حوالي  $65 \text{ MW/m}^2$ ، و يساهمون بإجمالي  $3.1 \cdot 10^{13}$ . و هكذا على الرغم من إنتاج الحرارة المرتفعة في القشرة القارية، فإن القارات تساهم فقط بحوالي 30% من إجمالي التدفق الحراري السطحي. يقدر إجمالي كمية تدفق الحرارة عبر سطح الأرض بهذه الطريقة ليكون  $44-41 \text{ TW}$  ( $10^{12}$  واط)، اذ يتم توليد حوالي 10-15% من هذا الإجمالي في القشرة، و 85-90% مشتق من الوشاح.

4-ب إنتاج الحرارة المشعة: يُقدَّر أن إنتاج الحرارة المشعة يساهم بنسبة 50-80% من إجمالي فقد الحرارة من الوشاح. يتم توليد هذه الحرارة في الغالب من نظائر ذات نصف عمر طويل من 1-10 Ga، أهمها  $U_{238}$ ،  $U_{235}$ ،  $Th_{232}$  و  $K_{40}$ . يتم تقدير المبلغ الحالي من النماذج التركيبية للأرض.

4-ج مصادر الحرارة الأرضية الباطنية: من هذه النماذج التركيبية يتم تقدير كمية العناصر المنتجة للحرارة، إذا كل من الوشاح مثل الوشاح العلوي حرارياً 10-15% فقط من إجمالي تدفق الحرارة السطحي سيكون بسبب إنتاج الحرارة المشعة. و مع ذلك، تتنبأ النماذج الغضروفية بتركيز أعلى بكثير من العناصر المنتجة للحرارة في الوشاح. لذلك، غالباً ما يُفترض أن الوشاح الأعمق (السفلي) يكون أكثر غنى

بالعناصر المنتجة للحرارة. سيكون الغنى إما بدائيًا ميزة و / أو بسبب إعادة التخصيب بسبب إعادة تدوير قشرة المحيطات.

يجب أن يكون تبريد الوشاح مصدرًا رئيسيًا آخر لحرارة الوشاح منذ تكوين الأرض. تتراوح تقديرات مساهمتها بشكل عام بين 30-50%، و لكنها ليست مقيدة جيدًا لأنها تعتمد على تقديرات الحرارة الأصلية و الحرارة المنبعثة من تكوين اللب و نماذج التطور الحراري للوشاح. يُفترض أن يكون جزء صغير من تدفق الحرارة السطحية من القلب، هذه المساهمة تقدر بحوالي 10%، و هو تقدير يعتمد مرة أخرى على النمذجة، و لكنه يتوافق مع ناتج الحرارة من خلال تضخم المحيطات التي ترتبط عمومًا بالأعمدة. حيث الحرارة الأساسية عبارة عن مزيج من الحرارة البدائية و الحرارة الناتجة عن التجميد البطيء لللب الداخلي. يُعتقد أن المصادر الأخرى، مثل التبدد الاحتكاكي (بسبب تفاعل الأرض و القمر) هي مساهمات ثانوية. الحرارة الكامنة المنبعثة من انتقالات الطور في الوشاح و التبدد اللزج المرتبط بتدفق الوشاح يعيدان توزيع الحرارة في الوشاح.

### III-3-5 النموذج الديناميكي للأرض:

#### II-3-5-1 التصوير المقطعي الزلزالي<sup>[22]</sup>:

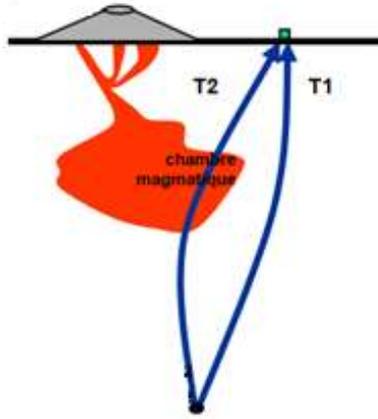
في السنوات الأخيرة، بدأ الحصول على مزيد من التفاصيل حول بنية الكرة الأرضية، و ذلك بفضل الزيادة الكبيرة في عدد البيانات الزلزالية الرقمية.

تتيح هذه البيانات إمكانية إنشاء التصوير المقطعي الزلزالي، أي نوع من الماسح الضوئي لأعماق الأرض.

يعتمد مبدأ التصوير المقطعي الزلزالي على استعادة البواقي أوقات وصول الموجات الزلزالية و التي ستتحول - بفضل استخدام الكمبيوتر - إلى صور ثلاثية الأبعاد.

$\Delta t$  الوقت المتبقي =  $\Delta t$  النظري -  $\Delta t$  الممتص = قياس الانحرافات في سرعة انتشار الموجات مقارنة

بالبنية المتوسطة للكرة الأرضية (الشكل (III-2)).



$$\Delta T_1 = \Delta T_1 \text{ théorique} - \Delta T_1 \text{ observée} = 0$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_2 \text{ théorique} - \Delta T_2 \text{ observée} \neq 0$$

$$\text{si } \Delta T_2 < 0 \rightarrow \Delta T_2 \text{ théorique} < \Delta T_2 \text{ observée}$$

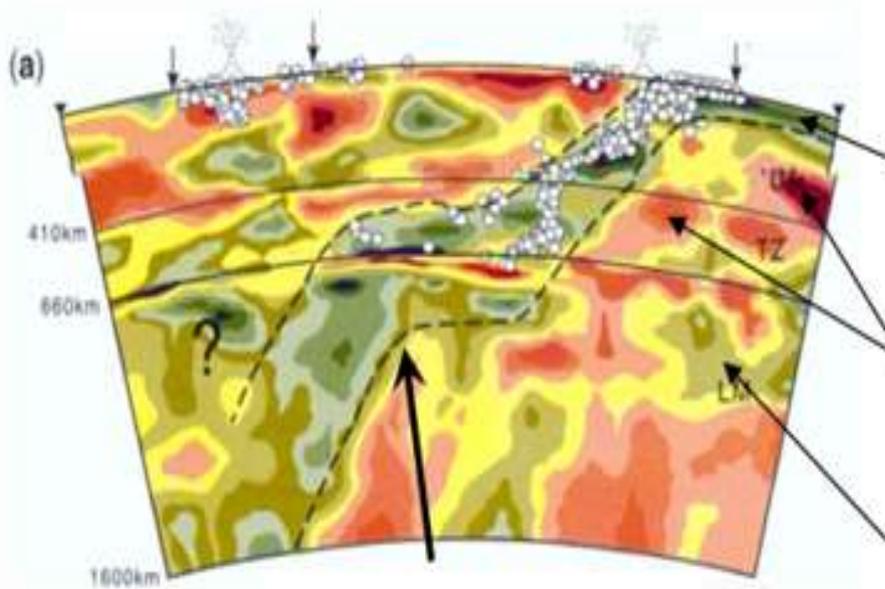


الشكل (III-2): رسم بياني يشرح مبدأ التصوير المقطعي الزلزالي [22].

من خلال إظهار التباين في سرعة الموجة بالتفصيل داخل الكرة الأرضية؛ مع العلم أن الموجات

الزلزالية تتباطأ في المناطق الحارة و متسارعة في المناطق الباردة (شكل (III-3))، يكشف التصوير

المقطعي الزلزالي أن الوشاح ليس متجانسًا، وأنه في بعض الأماكن حار بشكل غير عادي.



مسار سريع للموج  
الزلزالية في عباءة

مسار بطيء للموج  
الزلزالية في عباءة

الشكل (III-3): صورة مقطعية لجزء من الأرض في جنوب آسيا [22].

II-3-5-2 ديناميكا النواة<sup>[23]</sup>:

النواة الخارجية السائلة، المنصهرة و الموصلة، هي مقر حركات المادة بواسطة التيارات الحرارية. تحدث هذه الحركات في المجال المغناطيسي الأرضي الموجود مسبقاً؛ ينتج عن هذا تيارات كهربائية تحفز بدورها مجالاً مغناطيسياً و ما إلى ذلك. بعبارة أخرى، هذا دينامو مثير ذاتياً (مكتفٍ ذاتياً) من الواضح أن بدايته (في الأيام الأولى من تاريخ الأرض، بمجرد تشكل النواة) تطلبت الوجود المسبق لمجال مغناطيسي (المجال الأولي) الذي لا تزال ولادته لغزاً.

يوفر المجال المغناطيسي للأرض حماية جيدة للكوكب من الرياح الشمسية. نتيجة لذلك، يتشوه ثنائي القطب بالفعل بواسطة الرياح الشمسية.

## III-4 الطاقة الحرارية الأرضية:

تكن الحرارة الباطنية التي يمكن أن يستفيد منها الإنسان باستخدامها كطاقة بديلة في الأجزاء السطحية، التي يمكن أن تصل إليها أعمال الحفر البئري الآلي. و بما أن مخزون هذه الطاقة مبعثر جدا فإنه لا يمكن التوصل في الوقت الحاضر، إلى تحديد إمكان استخدام هذا المخزون اقتصادياً. فمناطق التدفق الحراري العالي هي التي تحتوي أهم الخزانات الحرارية، و هي على العموم مناطق تبركن أو بناء الجبال. أي تلك التي تتوزع على هوامش صفائح الغلاف الصخري الرئيسية و في كلتا الحالتين تولد الماجما و تحدث النشاطات النارية الدسيسة و البركانية، تقع حقول الطاقة الحرارية الأرضية المعروفة أو التي هي قيد الكشف في ثلاثة تكوينات جيولوجية رئيسية؛ على امتداد أعراف التوسع، مناطق انغماس الصفائح التكتونية و فوق نطاق الانغاز (انظر الشكل (III-4))<sup>[16]</sup>.

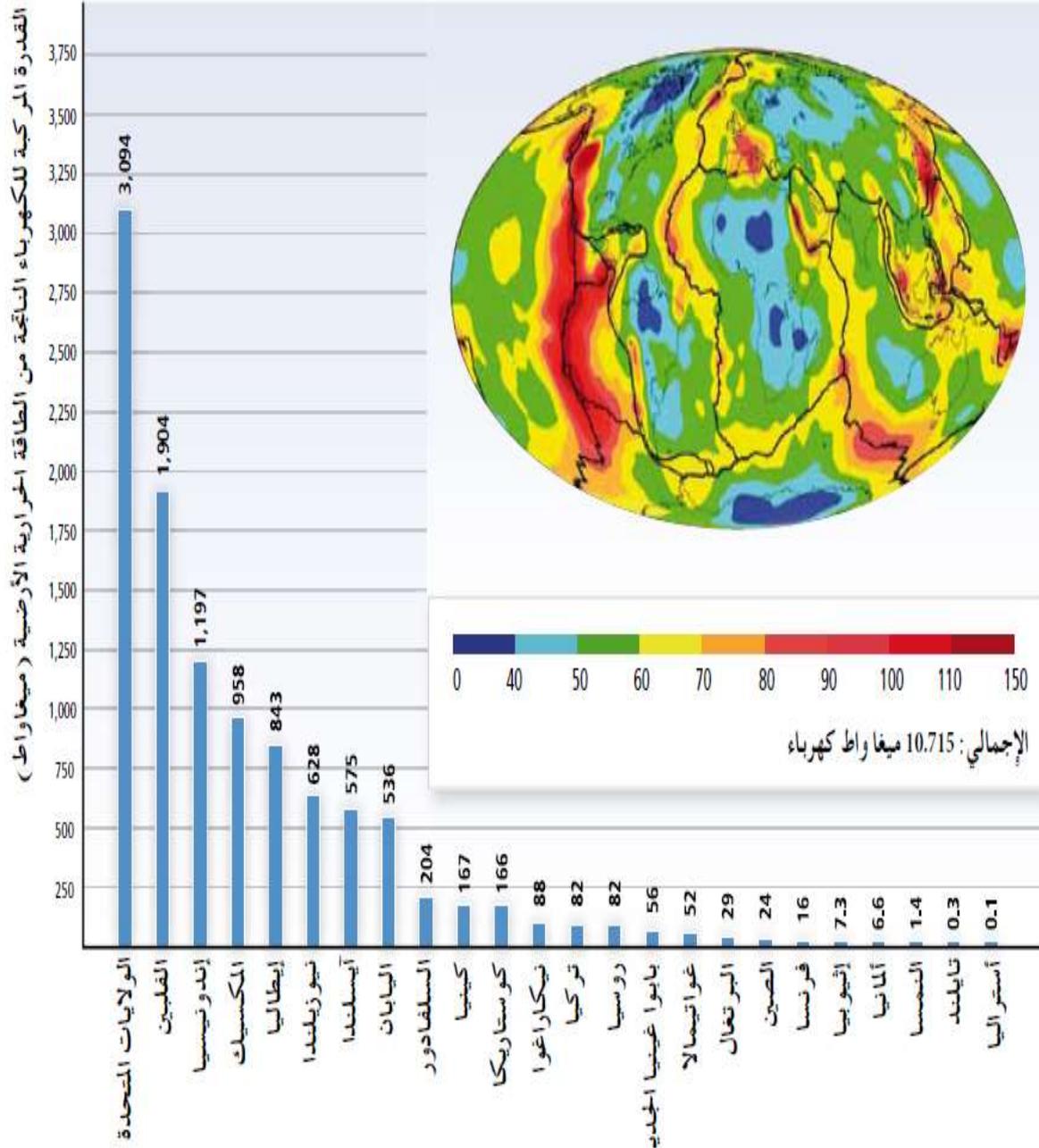
و يقوم الماء في الأنظمة الحرارية الأرضية بدور وسط حامل جيد النقل للحرارة من الأعماق إلى السطح. و توفر الفوالق العميقة فتشققات الصخور و الفتحات المسامية المتصلة بها الممرات اللازمة لتسرب المياه السطحية و تغلغلها في باطن الأرض و صعودها نحو سطح السطح حين تسخن و نقل

كثافتها. ففي النظام الحراري الأرضي يدور الماء عند اقترابه من مصدر حراري (مثلا تجمع مغماتي أو صخور نارية متبردة أو صخور عميقة تخضع لاستحالة شديدة )، إذ يمكن أن تصبح درجة حرارته بين 40° و أكثر من 380° درجة سيلزيوس فيتمدد و يصعد نحو الأعلى و حين يصادف ممرات سهلة توصله إلى السطح يتفجر ينابيع حارة من الماء أو من الماء مع البخار أو من البخار. أما حين تعترض سبيله طبقات صخرية كثيفة أو قليلة النفوذية فإنه يحتجز ضمن صخور خازنة<sup>[16]</sup>.

و قد اعتقد عدد من العلماء في الماضي أن مياه الأنظمة الحرارية الأرضية تعود في أصلها إلى النشاطات النارية في الأعماق. إلا أن الدراسات الحديثة باستخدام نظائر الهروجين و الأكسجين فيها، أظهرت أن ما لا يقل 95 من هذه المياه مستمد من الغلاف الجوي.

بدأ إيطالية منذ عام 1904 باستغلال البخار الطبيعي المتفجر في حقل لازدرلو، و منذ ذلك الوقت أصبحت الطاقة الحرارية الأرضية موضع اهتمام و استعادة في كثير من بلدان العالم مثل اليابان و آيسلندا و نيوزيلاندا و الولايات المتحدة الأمريكية، و أصبحت تستغل بوصفها طاقة بديلة لتوليد الكهرباء و التدفئة المنزلية و غيرها. و تتوسع استخدامات الطاقة الحرارية الأرضية باطراد مع تطور تقانة المبادلات الحرارية<sup>[16]</sup>.

و مع أن الطاقة الحرارية الأرضية أقل كلفة من أي مصدر آخر للطاقة، إلا أنها قابلة للاستنفاد، و قد تخلق مشكلات بيئية. فهي حين تستنفد في منشأة ما تؤدي إلى ضياع المنشأة كلها. كلما يصدر عن بعض المنشآت كميات كبيرة من الكبريت يمكن أن تعادل ما تطلقه منشآت مماثلة في الحجم تستخدم وقود الفحم الحجري ذي المحتوى العالي من الكبريت. و مع أن تطبيقات الاستفادة من الطاقة الحرارية الأرضية سوف تتوسع في المستقبل، إلا انه لا يتوقع منها أن تغطي أكثر من 5 - 10% من الاحتياجات العالمية للطاقة، و يمكن أن يعزى ذلك في الدرجة الأولى إلى عدم توافر أنظمة مائية حملانية في كثير من بقاع العالم<sup>[16]</sup>.



الشكل (III-4): يمثل الملخص الفني لقدرة الكهرباء الحرارية الأرضية المركبة حسب البلدان في

2009 بين الشكل متوسط تدفق الحرارة على النطاق العالمي بالميللي واط للمتر المربع و

حدود الصفيحة التكتونية<sup>[16]</sup>.

## الفصل الرابع:

### المحاكاة عددية لظاهرة انتقال الحرارة في الطبقات الأرضية

#### 1-IV مقدمة:

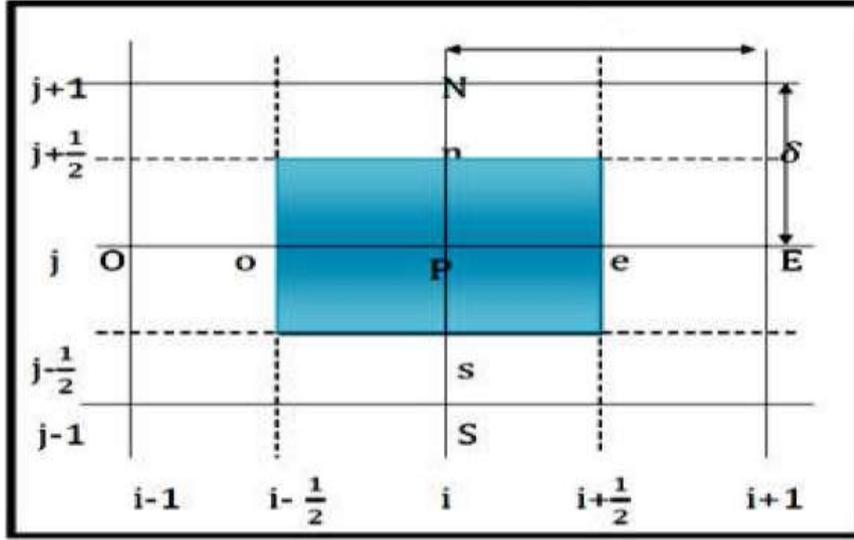
في هذا الفصل سوف نحاول تقديم محاكاة عددية لظاهرة انتقال الحرارة على مستوى الطبقات الأرضية الداخلية، حيث نعلم على العديد من الفرضيات مع اختيار النموذج المادي اللازم. حيث فضلنا القيام بالبرمجة باستخدام بيئة التطوير ماتلاب، بينما نعلم في حل المعادلة التفاضلية على طريقة الفروق المنتهية و التي سوف تكون انطلاقة هذا الفصل.

#### 2-IV طريقة الفروق المنتهية:

تعتبر طريقة الفروق المنتهية من أقدم الطرق العددية في حل المعادلات التفاضلية، و التي لا تزال تستخدم لبعض التطبيقات غالبا إذ تستعمل في دراسة انتقال الحرارة، الإنشاءات الهندسية الضخمة،... وغيرها. بينما الإنشاءات الميكانيكية و مسائل ميكانيك الموائع يفضل التعامل بالطرق العددية الأخرى مثل؛ العناصر المنتهية و الحجوم المنتهية<sup>[24]</sup>.

#### 1-2-IV المفهوم العام لطريقة الفروق المنتهية:

تعتمد طريقة الفروق المنتهية على افتراض انه عندما يقسم المجال المكاني إلى عدد محدود من الشرائح  $\Delta x$ ، و المجال الزمني إلى عدد محدود من الخطوات الزمنية، و المجهول داخل من نقطة تقع على المستوى المتوسط للشريحة (عقد الشبكة) يمكن تمثيلها وفقا لمجهول في النقاط المجاورة (انظر الشكل أدناه)<sup>[24]</sup>.



شكل (1-IV): تقطيع مستوي حسب طريقة الفروق المنتهية<sup>[24]</sup>.

الجدول (1-IV): يقدم أنواع التقطيعات الخاصة بطريقة الفروق المنتهية<sup>[24]</sup>.

المشتق الجزئي	التقطيع	نوع التقاضل	درجة التقاضل
$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_{i+1}^{n+1} - U_i^{n+1}}{\Delta x}$	قبل	أول
$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_i^{n+1} - U_{i-1}^{n+1}}{\Delta x}$	وراء	أول
$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_{i+1}^{n+1} - U_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x}$	مركزي	أول
$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_{i-1}^{n+1} - 2U_i^{n+1} + U_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2}$	تناظري	ثاني
$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t}$	ضمني	أول
$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_i^n - U_i^{n-1}}{\Delta t}$	صريح	أول
$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_i^{n+1} - U_i^{n-1}}{2\Delta t}$	مركزي	أول
$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right)_i^{n+1}$	$\frac{U_i^{n-1} - 2U_i^n + U_i^{n+1}}{\Delta t^2}$	تناظري	ثاني

في هذه الطريقة يتم تقريب كل مشتق جزئي من خلال تغيير تقريبي يسمى المخطط العددي عن طريق تقريبات تايلور. و هكذا يتم استبدال المعادلات التفاضلية بنظام من المعادلات الجبرية بمعاملات ثابتة (خطية) أو متغير (غير خطية)، هذا النظام يمكن حله بسهولة بالاعتماد على الطرق التكرارية. يتم تمثيل المخططات العددية المختلفة التي تقترب من الجزئية في الجدول التالي، أين العداد  $i$  و  $n$  يحددان إحداثيات الفضاء و الزمن على التوالي.

#### IV-2-2-2 المفهوم الرياضي لطريقة الفروق المنتهية:

لنعتبر المسألة التالية<sup>[25]</sup>:

هل توجد دالة  $y(x)$  معرفة على  $[a, b]$  و قيمها في  $\mathcal{R}$  و التي تكون مستمرة و قابلة للاشتقاق مرتين على  $[a, b]$  و التي تحقق:

$$(I) \begin{cases} y''(x) = F(x, y, y', \dots, y'(x)); & x \in (a, b) \dots \dots \dots (1) \\ y(a) = \alpha, y(b) = \beta \dots \dots \dots (2) \end{cases}$$

هذه المسألة تسمى بمسألة حدية أو (مسألة جريكلي).

نفرض أن المسألة (I) تقبل حلا وحيدا  $y(x)$  و نحاول تقديم طرق عددية لتقريب هذا الحل

تعريف:

المعادلة التفاضلية (1) للمسألة (I) نقول عنها أنها خطية إذا كانت  $F(x, y, y')$  من

الشكل:

$$p(x, y)y'(x) + q(x)y(x) + r(x)$$

في هذه الحالة المسألة الحدية (I) حيث  $\alpha$  و  $\beta$  ثوابت نقول عنها أنها خطية .

نظرية:

المسألة الحدية التالية:

$$\begin{cases} y''(x) = p(x, y)y'(x) + q(x)y(x) + r(x); x \in (a, b) \\ y(a) = \alpha, \quad y(b) = \beta \dots \dots \dots \end{cases}$$

تقبل حلا وحيدا إذا كان:

$$(1) \quad p(x), q(x) \text{ و } r(x) \text{ مستمرة على المجال } [a, b]$$

$$(2) \quad q(x) > 0 \text{ على المجال } [a, b]$$

من بين الطرق العددية المستعملة لإيجاد حل تقريبي للمسألة (I) طريقة الفروق المنتهية.

و هذه الطريقة تتمثل في تعويض المشتقات في المعادلة (1) من المسألة (I) باستعمال دساتير

تايلور و لهذا نقوم بتقسيم المجال  $[a, b]$  إلى  $(N + 1)$  مجال طوله  $h = \frac{b - a}{N + 1}$  حيث نقاط

التقسيم معطاة بـ:

$$x_i = a + ih, \quad i = 0, 1, \dots, N + 1$$

المعادلة التفاضلية (1) من المسألة (I) صحيحة من أجل كل  $x$  المجال  $[a, b]$ .

و بصورة خاصة من أجل كل  $x_i$  حيث  $i = 0, \dots, N + 1$ .

و منه من أجل كل  $x_i, i = 0, \dots, N + 1$  لدينا:

$$y''(x_i) = p(x_i)y'(x_i) + q(x_i)y(x_i) + r(x_i) \dots \dots \dots (1)'$$

نفرض أن  $y \in C^4([a, b])$  و منه حسب دستور تايلور لدينا:

$$y(x) = y(x_i) + (x - x_i)y'(x_i) + \frac{(x - x_i)^2}{2} y''(x_i) + \frac{(x - x_i)^3}{3!} y'''(x_i) + \frac{(x - x_i)^4}{4!} y^{(4)}(\xi_i)$$

حيث  $\xi_i$  محصورة بين  $x$  و  $x_i$  بتعويض  $x$  بـ  $x_{i+1}$  ثم  $x_{i-1}$  نحصل على:

$$y(x_{i-1}) = y(x_i) + hy'(x_i) + \frac{h^2}{2} y''(x_i) + \frac{h^3}{3!} y'''(x_i) + \frac{h^4}{4!} y^{(4)}(\xi_i^1)$$

$$\xi_i^1 \in [x_{i-1}, x_i]$$

$$y(x_{i+1}) = y(x_i) + hy'(x_i) + \frac{h^2}{2} y''(x_i) + \frac{h^3}{3!} y^{(3)}(x_i) + \frac{h^4}{4!} y^{(4)}(\xi_i^2)$$

$$\xi_i^2 \in [x_i, x_{i+1}]$$

بجمع هاتين المعادلتين نحصل على:

$$y''(x_i) = \frac{y(x_{i+1}) - 2y(x_i) + y(x_{i-1}))}{h^2} - \frac{h^2}{4!} (y^{(4)}(\xi_i^2) + y^{(4)}(\xi_i^1))$$

حسب نظرية القيم المتوسطة يوجد  $\xi_i \in [x_{i-1}, x_{i+1}]$  حيث:

$$\frac{y^{(4)}(\xi_i^2) + y^{(4)}(\xi_i^1)}{2} = y^{(4)}(\xi_i)$$

و منه:

$$y''(x) = \frac{y(x_{i+1}) - 2y(x_i) + y(x_{i-1}))}{h^2} - \frac{h^2}{12} y^{(4)}(\xi_i) \dots \dots \dots (2)'$$

ب طرح المعادلتين السابقتين نحصل على:

$$y(x_{i+1}) - y(x_{i-1}) = 2hy'(x_i) + \frac{h^3}{6} (y^{(3)}(\eta_i^2) + y^{(3)}(\eta_i^1))$$

$$= 2hy'(x_i) + \frac{h^3}{3} \frac{y^{(3)}(\eta_i^2) + y^{(3)}(\eta_i^1)}{2}$$

$$\approx 2hy'(x_i) + \frac{h^3}{3} (y^{(3)}(\eta_i))$$

حيث:  $\eta_i \in [x_{i-1}, x_{i+1}]$  و منه:

$$y'(x_i) = \frac{y(x_{i+1}) - y(x_{i-1}))}{2h} - \frac{h^2}{6} y^{(3)}(\eta_i) \dots \dots \dots (3)'$$

نعوض في المعادلة (1)' على عبارة  $y'$  و  $y''$  حسب (2)' و (3)' نحصل على:

$$\frac{y(x_{i+1}) - 2y(x_i) + y(x_{i-1}))}{h^2} - \frac{h^2}{12} y^{(4)}(\xi_i) = p(x_i) \frac{y(x_{i+1}) - y(x_{i-1}))}{2h} - p(x_i) \frac{h^2}{6} y^{(3)}(\eta_i) + q(x_i)y(x_i) + r(x_i)$$

بإهمال المقادير:

$$\frac{h^2}{12} y^{(4)}(\xi_i) \quad \text{و} \quad \frac{h^2}{6} y^{(3)}(\eta_i)$$

و بوضع  $w_i \approx y(x_i)$  نحصل على:

$$\begin{cases} -\left(1 + \frac{h}{2} p(x_i)\right)w_{i-1} + (2 + h^2 q(x_i))w_i - \left(1 - \frac{h}{2} p(x_i)\right)w_{i+1} \\ = -h^2 r(x_i); \quad i = 1, 2, \dots, N \\ w_0 = \alpha; w_{N+1} = \beta \end{cases}$$

لدينا إذا  $N$  معادلة بـ  $N$  مجهول  $w_1, w_2, \dots, w_N$  و على الشكل المصفوفي هذه

المعادلات يمكن كتابتها على الشكل:

$$AX = F$$

حيث:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 - c_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -b_2 & a_2 - c_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -b_3 & a_3 - c_3 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -b_{N-1} & a_{N-1} & c_{N-1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -b_N & a_N \end{bmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_N \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{pmatrix}$$

حيث:

$$a_j = 2 + h^2 q(x_j); \quad j = 1, \dots, N$$

$$b_j = 1 + \frac{h}{2} p(x_j); \quad j = 2, \dots, N$$

$$c_j = 1 - \frac{h}{2} p(x_j); \quad j = 1, \dots, N - 1$$

$$F_1 = -h^2 r(x_1) + (1 + \frac{h}{2} p(x_1)) w_0$$

$$F_j = -h^2 r(x_j); \quad j = 2, \dots, N-1$$

$$F_N = -h^2 r(x_N) + (1 + \frac{h}{2} P(x_N)) w_{N+1}$$

نظرية:

نفرض أن:  $p, q, r$  دوال مستمرة على المجال  $[a, b]$  إذا كانت  $q(x) \geq 0$  على

المجال  $[a, b]$  فإن الجملة السابقة تقبل حلا وحيدا إذا كان  $h$  حيث:

$$L = \max_{a \leq x \leq b} |p(x)| \quad \text{و} \quad h \leq \frac{2}{L}$$

### 3-IV نمذجة انتقال الحرارة في الطبقات الداخلية لأرض:

#### 1-3-IV نمذجة الطبقات الداخلية لأرض:

كما جاء في الفصل الثاني، سوف نفترض هنا أن الطبقات الأرضية مكونة من طبقات مختلفة

في خصائصها الفيزيائية من نواحي متعددة. أهمها تلك المدونة في الجدول (2-IV) أدناه الذي يتضمن

درجات الحرارة عند حدود هذه الطبقات مع ذكر عمق بداية كل منها.

الجدول (2-IV): يقدم درجات الحرارة عند حدود هذه الطبقات و العمق الموافق.

العمق (km)	درجة الحرارة (°C)	الطبقة
30	700	القشرة المحيطية
70	1000	القشرة القارية
100	1350	الغلاف الصخري
670	1600	حد الوشاح السفلي / العلوي
2900	5500-4700	حد الوشاح السفلي / نواة
5100	7200-5500	حد النواة الخارجية / الداخلية
6370	6600±1000	مركز الأرض

## IV-3-2 المعادلة الكلية لانتقال الحرارة على مستوى كل طبقة:

تنتقل الحرارة على مستوى كل طبقة بنفس المعادلات الاعتيادية لانتقال الحرارة، و هي تلك المعادلات المذكورة في الفصلين الأول و الثالث. فباختيار الشكل الكروي للأرض، فإننا نفضل استخدام الإحداثيات الكروية، حيث معادلة انتقال الحرارة تكتب بالشكل التالي:

$$\frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right) + \frac{A}{k} \quad (38)$$

## IV-3-3 فرضيات التبسيط المعتمدة في هذه الدراسة:

في الوقت الراهن يمكن اللجوء إلى عدد من الفرضيات، التي تمكننا من اختصار المعادلة (38).

هذه الفرضيات هي:

أ- اختيار الشكل الكروي بدلا من الشكل الجيوديزي الحقيقي، مع فرض أنه لا يوجد انتقال

حراري إلا على مستوى المتغير  $r$ .

ب- افتراض تجانس الطبقات.

ج- إهمال الفواصل الحدودية الموجودة فعلا، إذ نكتفي بالطبقات المذكورة في الجدول (IV-2).

د- التدفق دائم للحرارة، أي أنها لا تتعلق بالزمن.

هـ- نفرض أنه لا يوجد مصدر حراري.

و- نفرض أن انتقال الحرارة بالإشعاع مهمل.

بتطبيق الفرضيات تصبح معادلة انتقال الحرارة (38) من الشكل:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (38)$$

و هي عبارة عن معادلة بواسون:

$$\nabla T = 0 \quad (40)$$

## 4-3-IV خوارزمية الحساب:

لحل هذه المعادلة نعتمد على طريق الفروق المنتهية، و ذلك حسب المخطط الانسيابي الموضح في الصفحات الموالية، و قد اخترنا بيئة تطوير ماتلاب من أجل برمجة هذه المخططات. اين يمكن كتابة معادلات التقطيع كالتالي:

$$T(1,j)=(r(j)^2*pas^2*T(i-1,j)+(r(j)^2*pas^2+r(j)*dr*pas^2)*T(i,j)+dr^2*T(1,j-1)+dr^2*T(1,j+1))/(2*r(j)^2*pas^2+r(j)*dr*pas^2+2*dr^2);$$

$$T(i,j)=(r(j)^2*pas^2*T(i-1,j)+(r(j)^2*pas^2+r(j)*dr*pas^2)*T(i,j)+dr^2*T(1,j-1)+dr^2*T(1,j+1))/(2*r(j)^2*pas^2+r(j)*dr*pas^2+2*dr^2);$$

$$T(no,j)=(r(j)^2*pas^2*T(i-1,j)+(r(j)^2*pas^2+r(j)*dr*pas^2)*T(i,j)+dr^2*T(1,j-1)+dr^2*T(1,j+1))/(2*r(j)^2*pas^2+r(j)*dr*pas^2+2*dr^2);$$

في الحقيقية البرنامج مقسم إلى قسمين رئيسيين، و هما:

- القسم الخاص بكل طبقة، و القسم المستعمل للمعادلات التقطيع سابقة الذكر و المخططات

الانسيابية التالية:

أ- المخطط الانسيابي العام: الموضح في الشكل (2-IV)، و هو الذي يشمل جميع خطوات البرنامج.

ب- المخطط الانسيابي للجزء I الخاص بحساب درجة الحرارة عند حدود كل طبقة، و هو الموضح في الشكل (3-IV).

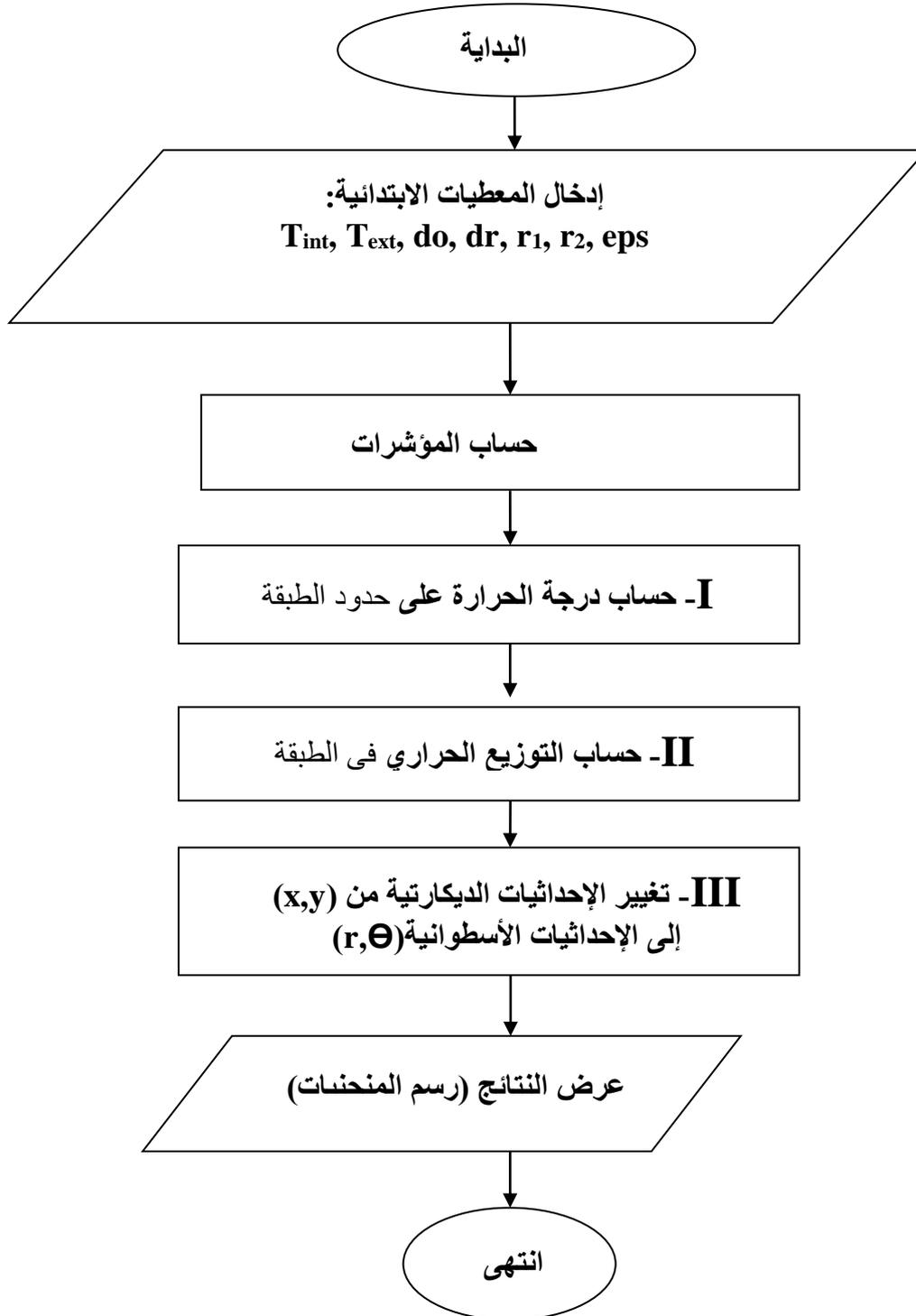
ج- المخطط الانسيابي للجزء II الخاص بحساب درجة الحرارة داخل كل طبقة، و هو الموضح في الشكل (4-IV).

د- المخطط الانسيابي للجزء III الخاص بتغيير الإحداثيات من القطبية إلى الكارتيزية، و هو الموضح في الشكل (5-IV).

- القسم الخاص بالحساب الكلي، و عبارة عن تكرار القسم السابق على جميع الطبقات.

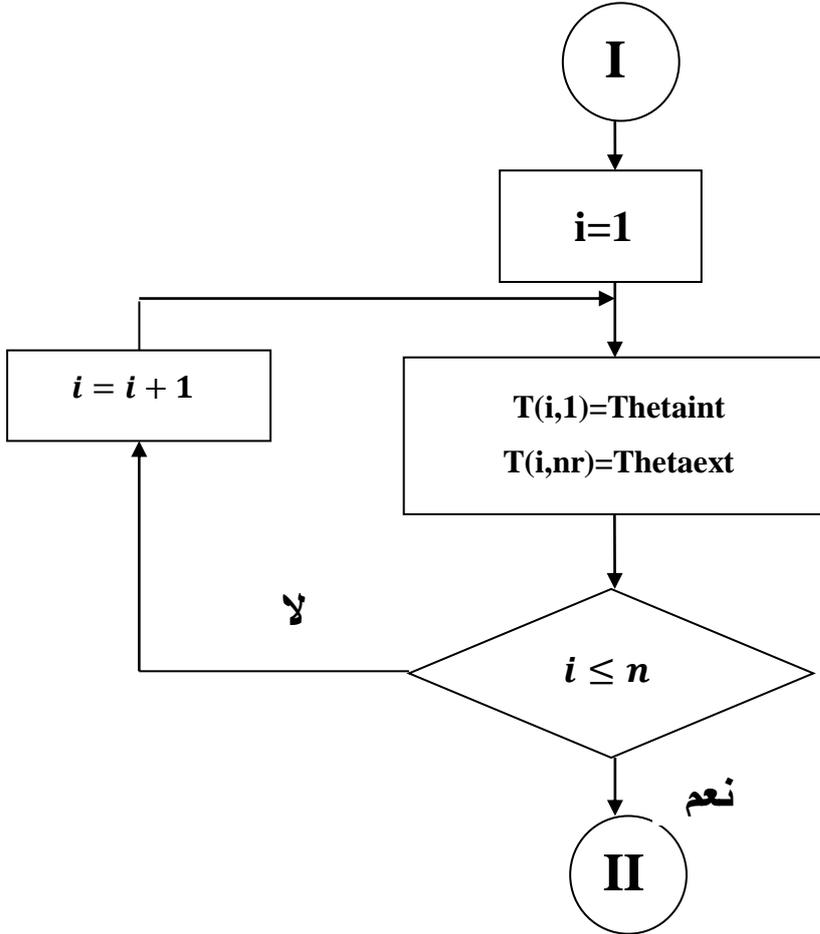
العملية هذه سوف تتكرر على سبع طبقات مختلفة، التي تم عرض قيم شروطها الحدودية

الجدول (2-IV).

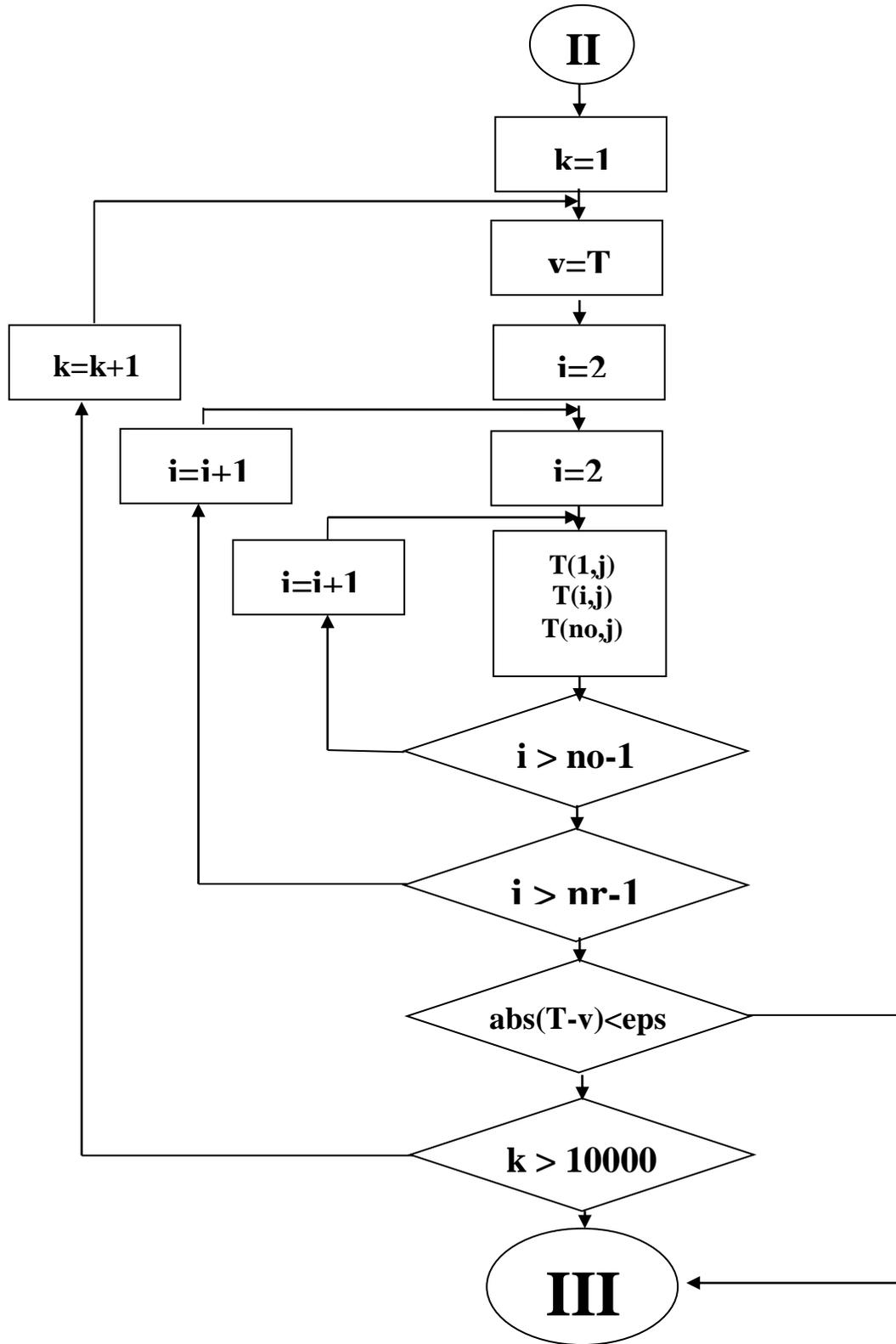


الشكل (2-IV): المخطط الانسيابي العام

الجزء I:

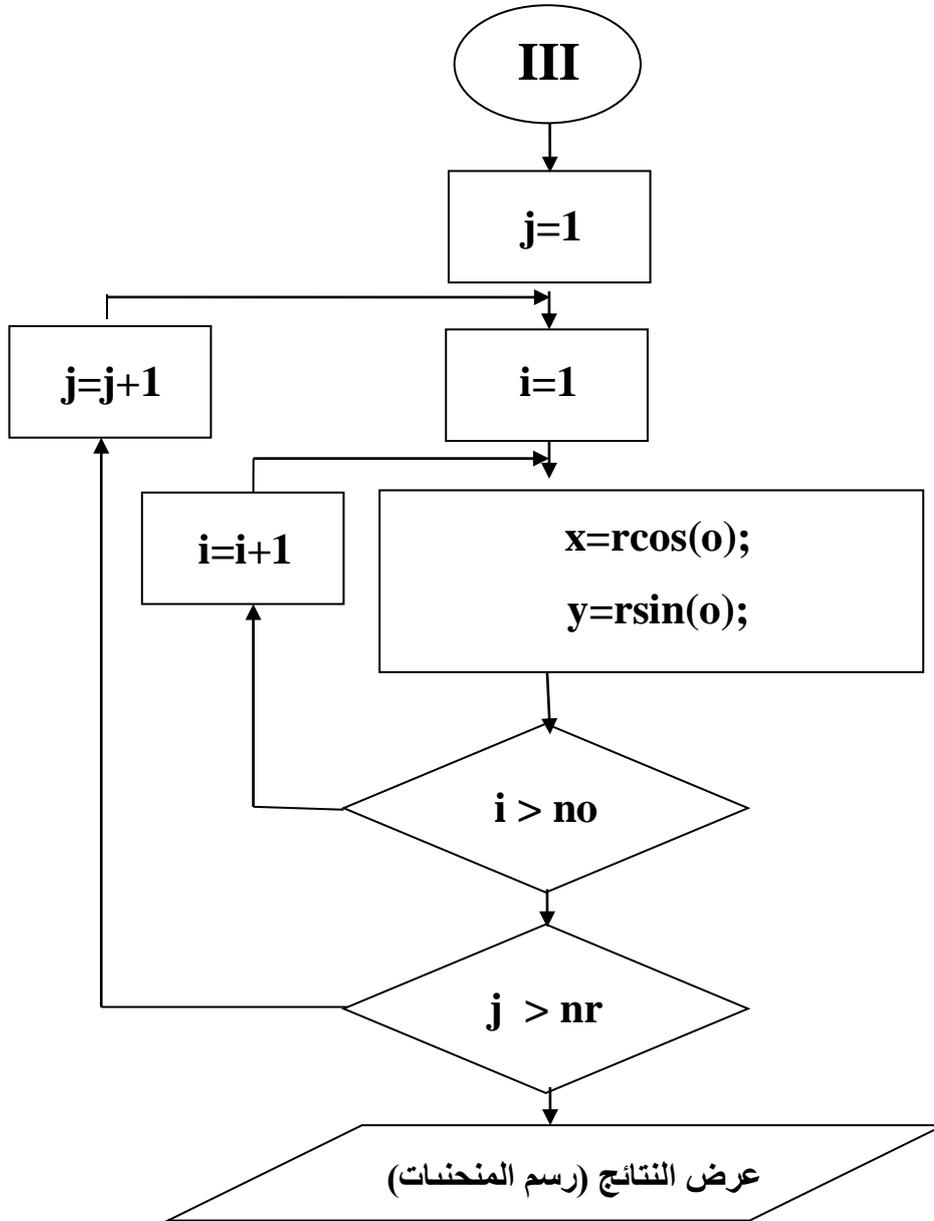


الشكل (3-IV): المخطط الانسيابي للجزء I الخاص بحساب درجة الحرارة على حدود الطبقات



الشكل (4-IV): المخطط الانسيابي للجزء II الخاص بحساب درجة الحرارة

داخل كل الطبقة



الشكل (5-IV): المخطط الانسيابي للجزء III الخاص بتغير الإحداثيات.

## 4-IV عرض و مناقشة نتائج النمذجة:

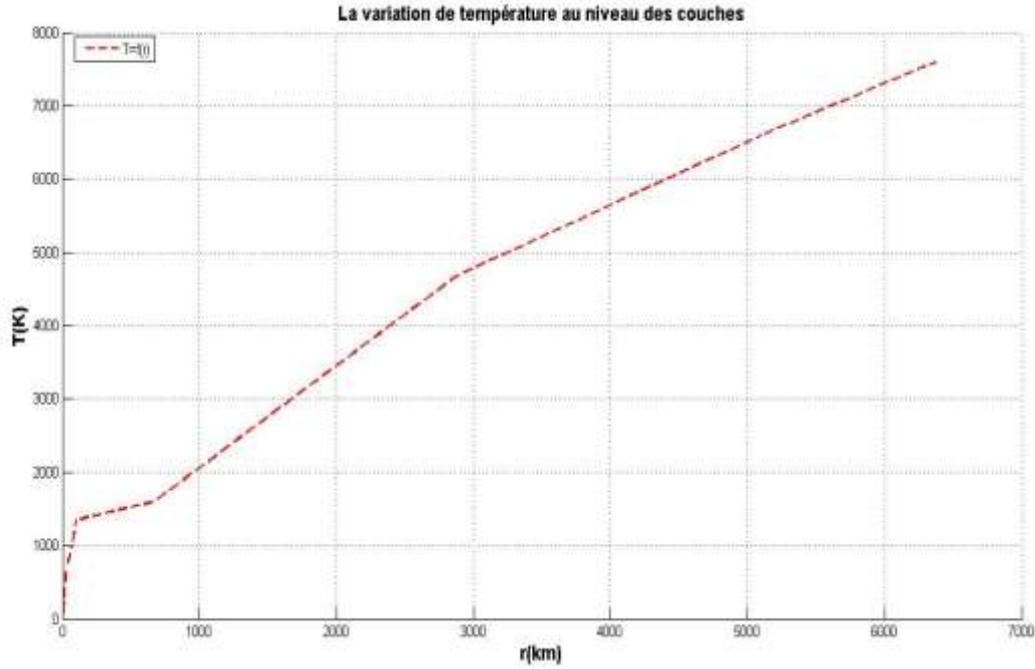
## 1-4-IV عرض النتائج:

أنتجت نمذجة ظاهرة انتقال الحرارة في الطبقات الأرضية، النتائج الموضحة في الشكلين (6-V و 7). حيث يمثل الشكل الأول تغيرات درجات الحرارة بدلالة العمق، أما الشكل الثاني فيبين التدرج الحراري و قيمها في الطبقات الأرضية. و لكن بمأن هناك تغيرات لا تكون واضحة في بعض النطاقات نظرا لسمكها المهمل مقابل غيرها، فضلنا تقسيم كل من الشكلين السابقين إلى شكلين آخرين. أي نحصل على شكلين لكل منهما، بحيث يتضمن كل شكل تلك الطبقات ذات السمك المتقارب.

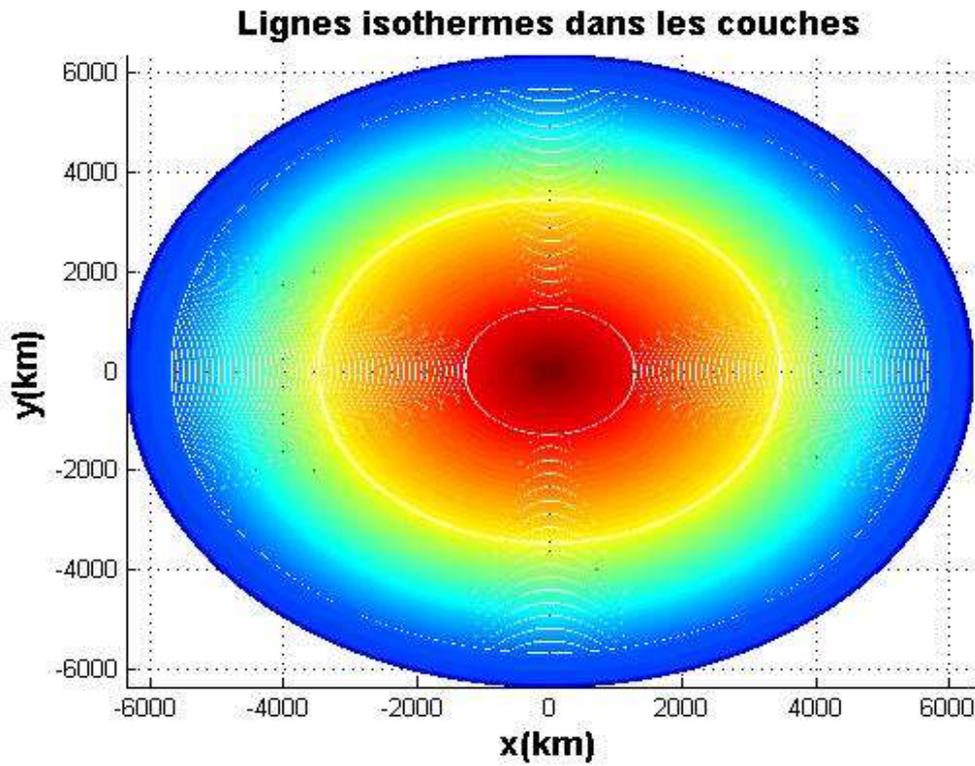
## 2-4-IV مناقشة النتائج:

من خلال الأشكال المعروضة، بالأخص الشكلين (6-IV) و (8-IV-أ-) نلاحظ أن:

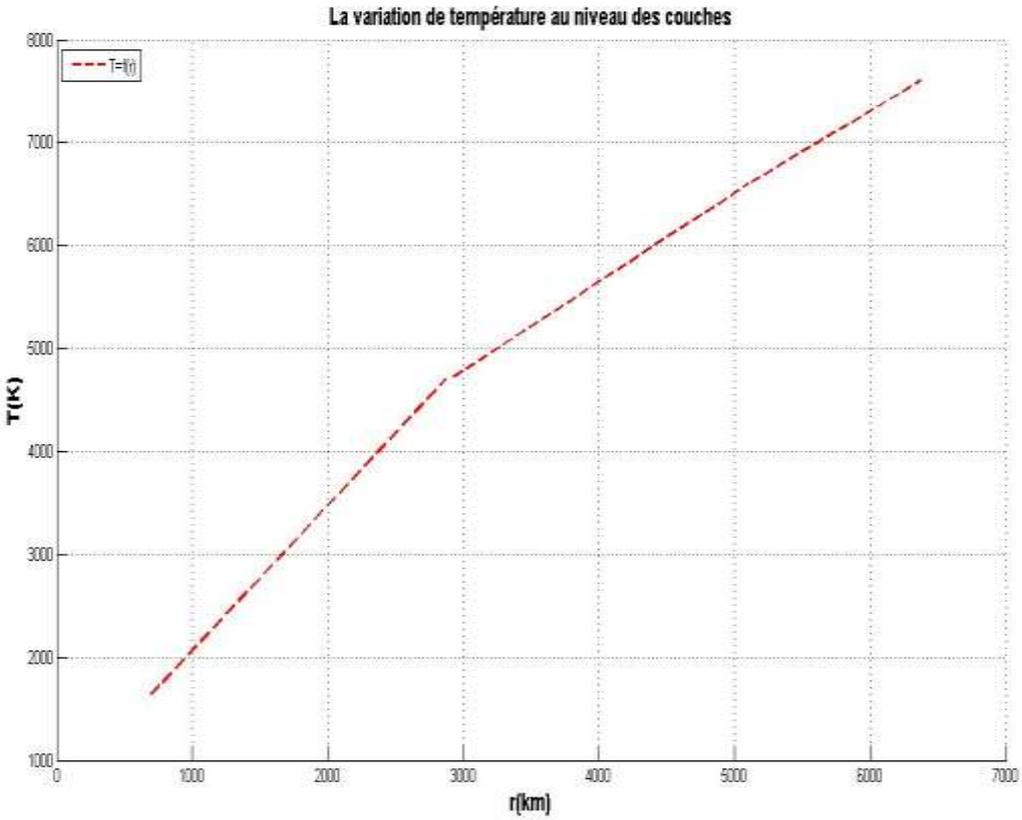
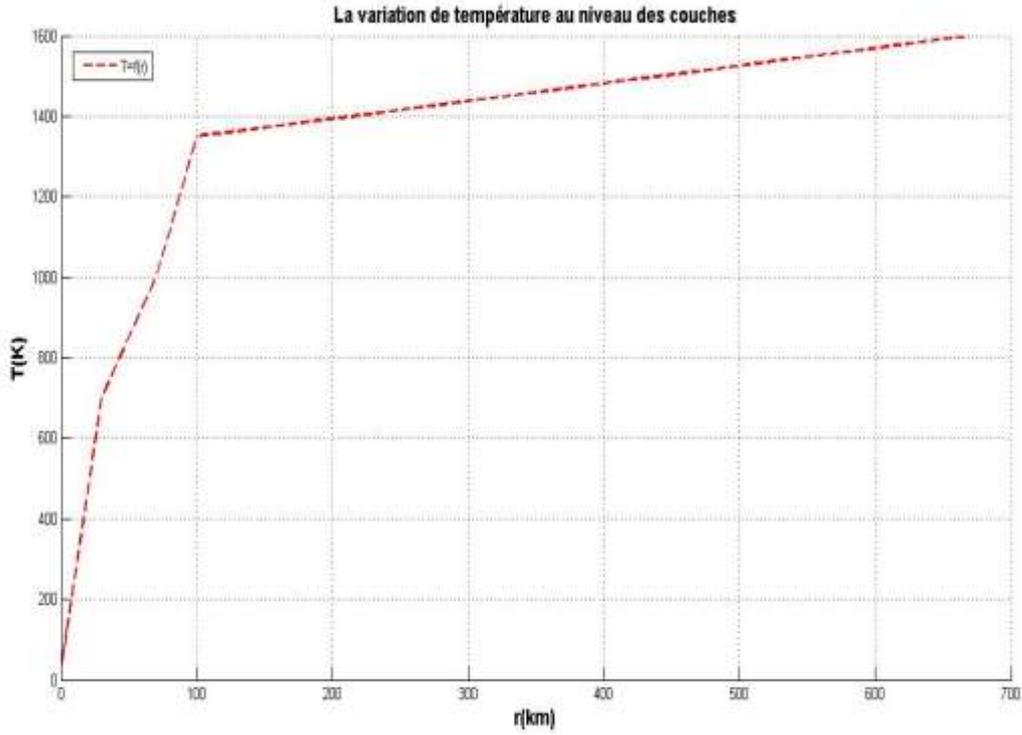
- 1- درجة الحرارة تزداد مع تزايد العمق في كل طبقة، هذا التزايد يكون خطي. هو مؤكد أي أن التدفق يكون ثابت في كاملة الطبقة.
- 2- يكون أعلى تزايد في القشرة المحيطية، حيث الميل يكون كبير جدا. لان القشرة بتكوينها الصخري تكون غلاف يشبه العازل، مما يجعل هذه باطن الأرض شبه كظوم تقريبا.
- 3- كذلك يكون التزايد عالي في الوشاح السفلي، لكن اقل مما هو عليه في القشرة. أي أن هذه الطبقة كذلك تعزل بشكل ما الحرارة الخارجة من اللب، إذن فهي تكظم كذلك ما بأسفلها.
- 4- التزايد في كامل النواة متساوي تقريبا، حيث من الواضح تساوي الميلين بين قسمي النواة. على الرغم من اختلاف تباين الطبيعة المادية لهذين القسمين، إلا أن هناك تساوي في التدفق الحراري. قد يعود هذا إلى وجود عنصر الحديد بوفرة، أي لتأثير المجال المغناطيسي الناشئ منه.
- 5- اقل زيادة في درجة الحرارة تكون في الوشاح العلوي، الذي يكون فيها اقل ميل. مما يعني أن هذه الطبقة تسمح بنفاذية عالية للحرارة، قد يعود أيضا لطبيعة تركيبها المادي.



الشكل (6-IV): يمثل تغيرات درجات الحرارة بدلالة العمق.



الشكل (7-IV): يبين التدرج الحراري و قيمها في الطبقات الأرضية.



الشكل (8-IV): يمثل تغيرات درجات الحرارة بدلالة العمق؛

أ- للطبقات الأربعة الأولى بداية من القشرة.

ب- للطبقات الثلاث الأخيرة.

## الخلاصة:

من خلال عملنا هذا تمت دراسة انتشار الحرارة في الطبقات الأرضية الباطنية، ذلك باعتبار العديد من الفرضيات للوصول بالمعادلة التفاضلية إلى معادلة بواسون في الإحداثيات الكروية. باستخدام طريقة الفروق المنتهية، ببرمجتها بواسطة بيئة التطوير ماتلاب.

حيث تمت البداية بالتطرق للحرارة من وجهة نظر العديد من مفاهيمها، بالإضافة لطرق انتقالها و معادلاته. كما تعرفنا عن النماذج الواصف للأرض، من حيث؛ تحديد الطبقات الباطنية و تكوينها المينرالوجي، مركزين على النموذج الحراري و الديناميكي مرورا بتوزيع الحرارة على سطح الأرض و وصولا للطاقة الباطنية التي يستفاد منها ألان و لو بشكل ضئيل نسبيا.

حيث تمكنا من الحصول على نتائج كثيرة، من أهمها و على سبيل الحصر:

- ثبوت التدفق الحراري في كل طبقة، و اختلافه من طبقة لأخرى. ماعدا في طبقتي النواة، التي تتوفر على عنصر الحديد الموفر لمجال مغناطيسي يؤثر في ذلك. ثبوت هذا التدفق كان واضح من خطية تزايد الحرارة، مع تزايد العمق.

- كما تبين أن القشرة الأرضية توفر غلاف عازل لهذه الحرارة، هذا واضح من التزايد الكبير في درجة الحرارة رغم السمك المتدني لها. هذا التصرف يظهر كذلك في الوشاح السفلي، الذي يظهر نوع من العزل للحرارة الخارجة من النواة.

- أما الوشاح العلوي فيبيدي نفاذية كبيرة للحرارة مما يسمح للغلاف الصخري من امتصاصها، هذا يتضح من التزايد الضعيف في دراجة الحرارة بين جانبيه.

ككل بحث تعاني دراستنا نقائص و سلبيات، و التي تعديلها و اقتراح حلول لها يعد أفاق مستقبلية و بوابات بحث جديدة تستدعي بنا أو بقرء الموضوع لطرقها، حيث نطرح منها:

- يمكن اعتماد النموذج الجيوديسي الأكثر تعقيدا، أي يمكن اعتبار تغير أكثر من نصف قطر

في المعادلة التفاضلية لانتقال الحرارة.

- يمكن اعتبار عدم التجانس في كل طبقة، اي بالتعرف على معاملات الانتقالية من خلال المواد المشكلة لكل طبقة فعليا.
- بالإمكان اعتبار النواة الخارجية منبعاً للحرارة، بدلا من افتراض عدم وجود المنبع أساسا.
- يمكن اعتبار انتقال الحرارة عبر الإشعاع، بالأخص لتضمن الوشاح مواد مشعة بدلال من إهمال تأثيره.
- كذلك يمكن الاعتماد على انتقال الحرارة بواسطة الحمل، و الذي يحدث فعلا في الوشاح الأرضي.
- في الأخير، يمكن إعادة الدراسة على اعتبار عامل الزمن بدلا من إهماله، نظرا لتأثيره على الكثير الدلالة كعمر المواد المشعة المكونة للوشاح.

## المراجع

### مراجع باللغة العربية:

- [03] د. سعود يوسف عياش، تكنولوجيا الطاقة البديلة، عالم المعرفة، الكويت 1978.
- [05] تخصص تبريد و تكييف، أساسيات الحرارية و المواع، وحدة انتقال الحرارة، الكتب المتخصصة، المملكة العربية.
- [06] روبرت ل إيفانز، شحن مستقبلنا بالطاقة باستخدام الطاقة المستدامة، ترجمة د. فيصل حردان، مدينة الملك فيصل للعلوم و التقنيات، السعودية 2011.
- [08] د.حسن مصطفى العوضي، المعادلات التفاضلية، الجزء الثاني، مكتبة الرشد، الرياض، السعودية سميعي، تخزين الطاقة الشمسية. ربيع الثاني 1412 هـ. العدد34.
- [16] الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، مصادر الطاقة المتجددة و التخفيف من آثار تغير المناخ، التقرير الخاص للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ 2011.
- [16] الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، مصادر الطاقة المتجددة و التخفيف من آثار تغير المناخ، التقرير الخاص للهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ 2011.
- [25] بلعاب نضرة و المولودة بوعرّوج، الإرسال الثاني الخاص بالتكوين عن بعد لأساتذة التعليم الأساسي، المدرسة العليا للأساتذة التعليم التقني بوهران.

- [01] " temperature ", www.nationalgeographic.org, Retrieved 2-1-2018. Edited.
- [02] Chet Carrie (24-4-2017), "What Are the Elements of Weather & Climate?", sciencing.com, Retrieved 3-1-2018. Edited.
- [04] "Solar Radiation And Temperature", www.britannica.com, Retrieved 2-1-2018. Edited.
- [07] Gordon C. Everstine, Numerical Solution of Partial Differential Equations, 21 January 2010.
- [09] Fowler, C. M. R. (1990). The solid Earth: An introduction to global geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, U.K, 472 pp.
- [10] Bullen, K. and Bolt, B. (1985). An introduction to the theory of seismology. Cambridge University Press, Cambridge U.K., 499 pp.
- [11] Du\_y, T. S. and Anderson, D. L. (1989). Seismic velocities in mantle minerals and the mineralogy of the upper mantle. J. Geophys. Res., 4:1895{1912.
- [12] Poirier, J.-P. (2000). Introduction to the Physics of the Earth's Interior, 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 312 pp.
- [13] Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L. (1981). Preliminary reference earth model. Phys. Earth Planet. Inter., 25:297{356.
- [14] McDonough, W. F. and Sun, S.-S. (1995). The composition of the earth. Chem. Geol., 120:223{253.
- [15] O'Connell, R. J. and Hager, B. H. (1980). On the thermal state of the earth. In Dziewonski, A. and Boschi, E., editors, Physics of the Earth's interior, pages 270{317.
- [17] Stacey, F. D. (1992). Physics of the Earth, 3rd edition. Brook\_eld Press, Brisbane Australia, 513 pp.
- [18] Turcotte, D. L. and Schubert, G. (2002). Geodynamics, Applications of continuum physics to geological problems, Second Edition. Cambridge University Press.

- [19] Jackson, I. and Rigden, S. (1998). Composition and temperature of the mantle: seismological models interpreted through experimental studies of mantle minerals.
- [20] Drake, M. J. and Richter, K. (2002). Determining the composition of the earth. Nature, 416:39{44.
- [21] Lowrie, W. (1997). Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge U.K., 354 pp.
- [22] Davies, G. F. (1999). Dynamic Earth: plates, plumes, and mantle convection. Cambridge University Press.
- [23] R. C., Masters, G., and Stixrude, L., editors, Earth's Deep Interior: Mineral Physics and Tomography from the Atomic to the Global Scale, pages 115{131. Am. Geophys. Un.
- [24] ABBOTT, M.B: "An introduction to the method of characteristics".Thames and Hudson, 1966.

## ملخص:

معظم الدراسات التي تبحث في باطن الأرض و تكوينها تعتمد الضغط كعامل مؤثر نظرا لتغيره السريع بالمقارنة بدرجة الحرارة، إلا إن هذه الأخيرة لم تهمل في دراسات أخرى. و حيث أن أعماق باطن الأرض مكون من طبقات متعددة، لذلك استهدفنا في هذا البحث التعرف على المعادلات التفاضلية التي تحدد انتقال و توزع درجة الحرارة فيها و تحديد الشروط الحدودية في كل طبقة. حيث تم الحل باستخدام طريقة الفروق المنتهية، و البرمجة بالاعتماد على بيئة التطوير ماتلاب. التدفق الحراري ثابت في كل طبقة، و اختلافه من طبقة لأخرى. ماعدا في طبقتي النواة، التي تتوفر على عنصر الحديد الموفر لمجال مغناطيسي يؤثر في ذلك. كما تبين أن القشرة الأرضية توفر غلاف عازل لهذه الحرارة، هذا واضح من خلال التزايد الكبير في درجة الحرارة رغم السمك المتدني لها. هذا التصرف يظهر كذلك في الوشاح السفلي، الذي يظهر نوع من العزل للحرارة الخارجة من النواة. أما الوشاح العلوي فيبيدي نفاذية كبيرة للحرارة مما يسمح للغلاف الصخري من امتصاصها، هذا يتضح من التزايد الضعيف في دراجة الحرارة بين جانبيه.

## Résumé:

La plupart des études portant sur le proendeur de la Terre et sa composition dépendent de la pression comme paramètre influent en raison de son évolution rapide par rapport à la température, mais cette dernière n'a pas été négligée dans d'autres études. Et comme les profondeurs de l'intérieur de la Terre sont composées de plusieurs couches, nous avons donc cherché dans cet article à identifier les équations différentielles qui déterminent le transfert et la distribution de la température, et à définir les conditions aux limites dans chaque couche. Où la solution a été réalisée en utilisant la méthode des différences finies, et la programmation en fonction de l'environnement de développement Matlab. Le flux thermique est constant dans chaque couche et varie d'une couche à l'autre. Sauf dans les deux couches de noyaux, qui ont l'élément de fer fournissant un champ magnétique qui l'affecte. Il a également été constaté que la croûte **terrestre** fournit une couverture isolante pour cette température, et cela est évident grâce à la forte augmentation de la température malgré sa faible épaisseur. Ce comportement apparaît également dans le manteau inférieur, qui présente une sorte d'isolation pour la chaleur sortant du noyau. Quant au manteau supérieur, il montre une grande perméabilité à la chaleur, permettant à la lithosphère de l'absorber, cela se traduit par la faible augmentation de la température du vélo entre ses flancs.

## Abstract:

Most of the studies investigating the deep Eath and its composition depend on pressure as an influential parameter due to its rapid change in comparison to temperature, but the latter was not neglected in other studies. And since the depths of the Earth's interior is made up of multiple layers, so we aimed in this paper to identify the differential equations that determine the transfer and distribution of temperature in it and to define the boundary conditions in each layer. Where the solution was done using the finite difference method, and programming depending on the development environment Matlab. The heat flow is constant in every layer, and it varies from one layer to another. Except in the two nuclei layers, which have the iron element providing a magnetic field that affects that. It was also found that the earth's crust provides an insulating cover for this temperature, and this is evident through the great increase in temperature despite its low thickness. This behavior also appears in the lower mantle, which exhibits a kind of insulation for the heat coming out of the core. As for the upper mantle, it shows great heat permeability, allowing the lithosphere to absorb it, this is evidenced by the weak increase in the temperature bike between its sides.