الفصل الأول
منشأ الماغما وتطورها

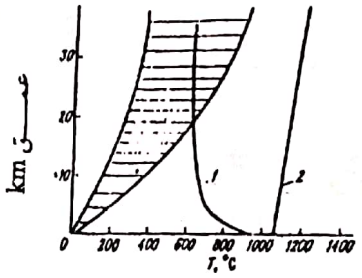
يتشكل الجزء الأكبر من المصاهير الماغماتية (المهل) —الأولية منها أم الثانوية في الجزء السفلي من القشرة الأرضية وفي الجزء العلوي من المعطف . ويمكن القول أن المصاهير الماغماتية الأولية (الماغما الأولية) تتشكل أثناء الانصهار الجزئي للصخور القديمة .أما المصاهير الماغماتية الثانوية (الماغما الثانوية)فتتشكل بنتيجة التبلور المجزأ أو بعض العمليات الأخرى التي تجري في الماغما الأولية .

ومن أجل مناقشة مسائل منشأ الصهارات الماغماتية مناقشة سليمة فإن الأمر يتطلب في المقام الأول التعرف على الطبيعة والخصائص الفيزيائية والكيميائية للمعطف العلوي (الجدول 1 ، 2) (الشكل 1،2).

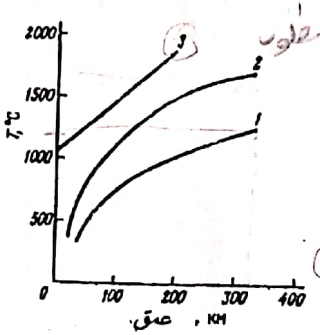
الوحدات القياسية المستخدمة	القشرة الأرضية	المعطف العلوي
العمق (كم)	0-70، يبلغ وسطياً تحت القارات 35 ،وتحت المحيطات 7	من حدود انقطاع موهو حتى 400
السرعة الوسطية كم/ ثا P- الأمواج الأولية S- الأمواج الثانوية	من 1.5 (القشرة الرسوبية) حتى 6.8 (الصخور الصلدة الكثيفة) حتى3.7 (الصخور الصلدة الكثيفة)	8.1 4.5
الكثافة غ/سم^3	1.5 (الصخور الرسوبية) 2.9 (الصخور الصلدة الكثيفة)	3.4
الضغط كيلو بار	0-16	2-150
الحرارة C	0-1000	200-1700
التركيب الكيميائي	من الغرانيت حتى البازلت (تحت القارات) بازلت (تحت المحيطات)	قريب من تركيب البيريدوتيت إكلوجيت وغيره ،ويتغير هذا التركيب في الاتجاهين الأفقي والشاقولي

الجدول (1): يتضمن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للقشرة الأرضية والمعطف العلوي

Scanned by CamScanner



الشكل(1). شروط انصهار القشرة والمعطف العلوي. وضعت الشروط الجيوحرارية (القطاع المخطط) المحتملة وفقاً لحسابات العديد من الباحثين. يمثل المنحني (1) الدرجات الدنيا لانصهار الغرانيت، ويفترض حالة من التوازن مع الماء. أما منحني السوليدوس (2) للبازلت اللامائي فيمثل درجة الحرارة العظمى التي يبدأ البازلت فيها بالانصهار. وفي وجود كمية كافية من الماء فان الانصهار يبدأ في الدرجة C750° في مجال واسع من الضغط، وبالتالي في مجال واسع من الأعماق. أخذت المعطيات المتعلقة بمنحني انصهار البازلت (Cohen وغيره، ١٩٦٧).



الشكل(2) : التوزع المفترض لحرارة المعطف العلوي: 1- للقارات، 2- للمحيطات. ان التصورات عن توزع حرارة المعطف مشروطة باحتمالات عديدة وبخاصة بتيارات الحملان وبتوزع العناصر المشعة وغيره، الذي أخذ بعين الاعتبار في حساب المنحنيين(1) و(2). ويمثل المنحني (3) السوليدوس البازلتي - الاكلوجيتي اللامائي(الحدود العليا لوجود الأطوار الصلبة فقط)، الذي يشير إلى بداية الانصهار. ووفقا للمعطيات المأخوذة من مؤلف L.H.Cohen (1967) فإن خطوط سوليدوس البيروليت اللامائي والبيريدوتيت الغرانيتي اللامائي تتوضع قريبة من المنحني (3) وتملك ميلا معادلاً أيضاً. وفي درجة عالية من ضغط الماء فإن البازلت يبدأ بالانصهار في درجة حرارة تعادل 750 C في مجال واسع من الضغط والعمق.

1- منطقة السرعات المنخفضة

إن فاصل (انقطاع) موهو الذي يفصل القشرة الأرضية عن المعطف العلوي يقع على عمق حوالي 7كم تحت المحيطات وعلى عمق(30-70 كم)(35 كم وسطياً) تحت القارات. ويتم الحكم على انقطاع موهو بواسطة المعطيات السيسمية، التي تتغير بموجبها سرعة الأمواج السيسمية الطولية (P) والعرضية (S) كثيراً على هذه الأعماق.

إن سرعة الأمواج السيسمية تزداد مع العمق بصورة عامة من السطح وحتى حدود المعطف والمعطف ذاته. غير أن هذه السرعة تتغير من مكان لآخر بالاتجاهين الأفقي والشاقولي.

والمنطقة الأكثر أهمية في هذا الشأن تقع على أعماق (60-250) كم، وتدعى بمنطقة السرعات المنخفضة. وهي تتميز في البداية بأن سرعة الأمواج السيسمية العرضية (S) فيها تتناقص، ثم ما تلبث أن تتزايد مع العمق. وتتميز مادة منطقة السرعات المنخفضة في ألها على الأرجح موجودة في حالة انصهار جزئي، وأكثر تركيبة بالمقارنة مع المادة الأرضية الواقعة فوقها. ومنطقة السرعات المنخفضة وللأسباب الآنفة الذكر كلها تعتبر منطقة تولد (إنتاج) غالبية الصهارات الماغماتية وهذا الافتراض قد تم التحقق منه بالعوامل التالية:

أولاً - إن في هذه المنطقة تتركز بؤر (مراكز) الهزات الأرضية.

ثانياً - إن قيم الضغط على هذه الأعماق تتفق مع قيم الضغط المحسوبة وفقا للتركيب الفلزي لصخور المعطف المفترضة التي حملت إلى السطح.

والسبب الأساسي للانصهارات الجزئية وبالتالي تشكل الماغما هو - تيارات الحمل على مايدو. إن توزع الأغلفة الخارجية للأرض المعتمد في تكتونيك الصفائح يبدو مختلفاً. فمنطقة السرعات المنخفضة ينظر إليها على ألها استينوسفير astenosphere، أما الصخور الحجرية الواقعة أعلاها، المكونة للقسم العلوي من المعطف (بسماكة تتراوح بين الصفر وحتى 50 كم)، اضافة إلى القشرة الأرضية (بسماكة 5-70 كم) فتعود إلى مايدعى - الليتوسفير lithosphere.

ووفقاً لهذا المبدأ، فان الصفائح التكتونية يمكن أن ينظر إليها على إلها أجزاء (بلوكات) لليتوسفير تدفع نسبيا الأستينوسفير.

2- تركيب القشرة والمعطف

إن الأنماط الرئيسية للصهارات الماغماتية الأولية يجب أن تعتبر تلك التي كانت أكثر تطوراً على مدار كامل التاريخ الجيولوجي للأرض، والتي تشكل منها اكثر الصخور النارية انتشاراً على سطح الأرض. فمن مثل هذه الصهارات الماغماتية تشكلت بالحد الأدنى ثلاثة أنماط بتروغرافية من الصخور:

أ- البازلت التوليتي

ب- البازلت القلوي الأوليفيني

ت- غرانيت الباتوليتات القارية

Scanned by CamScanner

وتستعلق طريقة تشكل وتطور مثل هذه الصهارات الماغماتية بتركيب القشرة والمعطف العلوي بشكل أساسي .

إن التركيب الوسطي للقشرة القارية يتفق علي الأرجح مع التركيب الوسطي لجميع الصخور النارية (أنظر الجدول 2) . أما الجزء السفلي من القشرة الأرضية والقشرة المحيطية قليلة السماكة فيمتلك على مايبدو تركيباً بازلتياً.

وانطلاقاً من التزايد العام لسرعة الأمواج السيسمية الأولية (P) مع الافتراض ، إن تركيب القشرة الأرضية يتغير مع العمق من تركيب غرانيتي إلى تركيب بازلتي . وتشير تغيرات سرعة الأمواج السيسمية أرضياً إلى عدم التوافق (التحانس) الأفقي في تركيب القشرة الأرضية. فسرعة الأمواج العرضية (S) والطولية (P) في المعطف العلوي ، وحسابات توزع الكثافة التي جرت على أساس قيم هذه السرعة ، إضافة إلى معطيات الجاذبية تدعم وجهة النظر القائلة باحتمال أن يكون المعطف العلوي مكوناً من صخور البيرودتيت ، التي تتكشف على سطح الأرض على شكل كسينوليت كيمبرليت ، وصخور بركانية أساسية تملك هي الأخرى تركيب البيريدوتيت أو الأكلوجيت. ويتألف هذان الأخيران مما يلي :

أ- البيريدوتيت : عبارة عن صخور فوق أساسية مكونة من الأوليفين إضافة إلى فلز واحد أو أكثر من فلزات البيروكسين.

ب- الاكلوجيت : يتكون من تركيب قريب للبازلت ، فهو يتألف من الغرانات والبيروكسين.

وهكذا ، فان انقطاع موهو يتفق مع تغير في التركيب الكيميائي من بازلت وغابرو إلى بيريدوتيت ، أو أنه يتفق مع انتقال طوري متحانس كيميائياً من غابرو أو بازلت (بلاجوكلاز + بيروكسين) إلى أكلوجيت (غرانات + بيروكسين).

إن الأبحاث الطورية لثبات الاكلوجيت وقيم كثافة المعطف العلوي تشير إلى ، أن المعطف العلوي يملك على الأرجح تركيب البيريدوتيت وليس الاكلوجيت. ومثلما هي الحال بالنسبة للقشرة كذلك بالنسبة للمعطف العلوي ، فانه من المفترض غياب التحانس الأفقي في المادة المكونة.

الانتشار الذري للعناصر في الطبيعة (الوفرة الذرية للسيليسيوم ذرة $Si=10^6$)

العدد الذري	العنصر	المحتوى			
		في الفضاء	في الكوندريتات	في الأرض	في القشرة الأرضية
1	H	$3{,}18\times10^{10}$	—	8 400	$1{,}4\times10^{4}$
2	He	$2{,}21\times10^{9}$	0,11	$3{,}5\times10^{-3}$	—
3	Li	49,5	~50	—	290
4	Be	0,81	0,69	—	31
5	B	350	6,2	—	93
6	C	$1{,}18\times10^{7}$	2 000	7 000	1 700
7	N	$3{,}74\times10^{6}$	90	20	140
8	O	$2{,}15\times10^{7}$	$3{,}7\times10^{6}$	$3{,}5\times10^{6}$	$2{,}9\times10^{6}$
9	F	2 450	~700	300	3 300
10	Ne	$3{,}44\times10^{6}$	0,0015	12×10^{-6}	—
11	Na	$6{,}0\times10^{4}$	$4{,}6\times10^{4}$	$4{,}6\times10^{4}$	$1{,}0\times10^{6}$
12	Mg	$1{,}061\times10^{6}$	$9{,}4\times10^{5}$	$8{,}9\times10^{5}$	$9{,}6\times10^{4}$
13	Al	$8{,}5\times10^{4}$	6×10^{4}	$9{,}4\times10^{4}$	$3{,}0\times10^{6}$
14	Si	$1{,}00\times10^{6}$	$1{,}00\times10^{6}$	$1{,}00\times10^{6}$	$1{,}00\times10^{6}$
15	P	9 600	5 300	1×10^{4}	3 400
16	S	$5{,}0\times10^{5}$	$1{,}1\times10^{5}$	1×10^{5}	810
17	Cl	5 700	700	3 200	370
18	Ar	$1{,}172\times10^{5}$	0,4	$5{,}9\times10^{-2}$	—
19	K	4 200	3 500	4 000	$5{,}3\times10^{4}$
20	Ca	$7{,}21\times10^{4}$	$4{,}9\times10^{4}$	$3{,}3\times10^{4}$	1×10^{6}
21	Sc	35	29	—	49
22	Ti	2 775	~2 600	2 000	$1{,}2\times10^{4}$
23	V	262	200	—	260
24	Cr	$1{,}27\times10^{4}$	6 600	8 000	190
25	Mn	9 300	7 400	4 000	1 700
26	Fe	$8{,}3\times10^{5}$	$6{,}9\times10^{5}$	$1{,}35\times10^{6}$	1×10^{6}
27	Co	2 210	1 300	3 500	42
28	Ni	$4{,}80\times10^{4}$	4×10^{4}	1×10^{5}	130
29	Cu	540	250	—	87
30	Zn	1 244	130	—	110
31	Ga	48	12	—	22
32	Ge	115	20	—	2,1
33	As	6,6	4,6	—	2,4
34	Se	67,2	19	—	0,063
35	Br	13,5	5	—	3,1
36	Kr	46,8	—	$0{,}6\times10^{-5}$	—
37	Rb	5,88	~5	—	110
38	Sr	26,9	20	—	430
39	Y	4,8	3,4	—	37
40	Zr	28	~37	—	180
41	Nb	1,4	1,0	—	22
42	Mo	4,0	2,5	—	1,6
44	Ru	1,9	1,5	—	—
45	Rh	0,4	0,25	—	—
46	Pd	1,3	~0,9	—	—
47	Ag	0,45	~0,09	—	0,055
48	Cd	1,48	0,079	—	0,18
49	In	0,189	0,001	—	0,087
50	Sn	3,6	0,56	—	1,7
51	Sb	0,316	0,11	—	0,16
52	Te	6,42	0,60	—	—
53	I	1,09	0,051	—	0,39

Scanned by CamScanner

العدد الذري	العنصر	المحتـــــوى			
		في الشمس	في الكوندريتات	في الأرض	في القشرة الأرضية
54	Xe	5,38	$0,7\times10^{-8}$	$0,05\times10^{-8}$	—
55	Cs	0,387	0,14	—	2,3
56	Ba	4,8	5,0	—	310
57	La	0,445	0,39	—	22
58	Ce	1,18	1,2	—	43
59	Pr	0,149	0,14	—	5,8
60	Nd	0,78	0,64	—	19
62	Sm	0,226	0,23	—	4,0
63	Eu	0,085	0,082	—	0,79
64	Gd	0,297	034	—	3,4
65	Tb	0,055	0,051	—	0,57
66	Dy	0,36	0,33	—	1,3
67	Ho	0,079	0,076	—	0,73
68	Er	0,225	0,23	—	1,7
69	Tm	0,034	0,031	—	0,28
70	Yb	0,216	0,18	—	1,7
71	Lu	0,036	0,031	—	0,29
72	Hf	0,21	0,17	—	1,7
73	Ta	0,021	0,016	—	1,1
74	W	0,16	0,12	—	0,82
75	Re	0,053	0,046	—	—
76	Os	0,75	0,54	—	—
77	Ir	0,717	0,35	—	—
78	Pt	1,4	1,30	—	—
79	Au	0,202	0,18	—	0,002
80	Hg	0,4	0,10	—	0,04
81	Tl	0,192	0,001	—	0,22
82	Pb	4	0,14	—	6,0
83	Bi	0,143	0,002	—	0,08
90	Th	0,058	0,027	—	4,1
92	U	0,0262	0,009	—	1,1

المعطيات حسب A.G. Kameron

3– الصهارات الماغماتية الأولية والمعطف العلوي

إن السؤال الذي يطرح نفسه وفقاً للمعلومات المعاصرة هو : كيف تتشكل الصهارات الماغماتية الأولية في المعطف ؟

إن كل افتراض بهذا الشأن يرتبط بشدة بالاختيار المحتمل لتركيب مادة المعطف العلوي . فالباحثان Green D. H Ringwood A. E (1968) مثلاً يقترحان للمعطف

العلوي تركيباً يدعى – البيروليت ، الذي يعتبر نظرياً مزيجاً من ثلاثة أجزاء من الغارتسبورغيت (بيريدوتيت وحيد البيروكسين) وجزء واحد من البازلت التوليتي.

أما O Hara M.J (1968) فيستخدم في نموذجه للمعطف العلوي تركيب اللرتسوليت الغرناتي الطبيعي (بيريدوتيت ثنائي البيروكسين).

وتشير دراسة التوازنات الطورية إلى ، أن توليد الماغما البازلتية ممكن في حالة الانصهار المتوازن لأي من المواد المذكورة أعلاه . والصهارات الماغماتية المتولدة على هذا النحو سوف تختلف بتركيبها قليلاً عن بعضها البعض وبخاصة بمحتواها من عناصر الأثر. وسلوك عناصر الأثر هذه في مجرى التبلور المجزأ اللاحق سيكون مختلفاً أيضاً.

والسؤال الآخر يكمن في كيفية تشكل نمطين مختلفين للماغما البازلتية الأولية بنتيجة انصهار صخور ذات تركيب بيريدوتيتي واحد ؟

يعتقد غرين و رينغوود بهذا الشأن ، بأن العوامل الأساسية في ذلك تعود إلى درجة الانصهار الجزئي وإلى عمق انفصال الصهارة .

أما درجة الانصهار الجزئي فتؤثر على تركيب الماغما وتغيراته ، بينما عمق انفصال الصهارة هام أيضاً ، لأنه تبعاً للضغط يتغير التركيب الفلزي لصخور المعطف، ويتغير معه نظام الانصهار .

ويرى الباحثان المذكوران آنفاً أن هناك عدة احتمالات بهذا الشأن كما يلي :

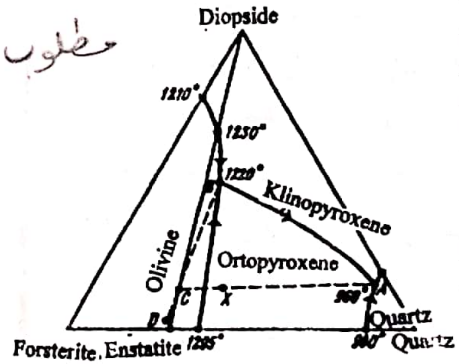
تؤدي درجة الانصهار غير الهامة إضافة إلى الانفصال اللاحق للصهارة على عمق أقل من 15 كم إلى تشكيل ماغما توليتية فوق مشبعة بالسيليكا . وفي الفاصل (15–35 كم) يمكن انصهار ماغما ذات تركيب مكون من التوليت الأوليفيني الحاوي على نسبة كبيرة من الألمنيوم Al_2O_3 . كما أن مماز الماغما على أعماق (35-70 كم) في درجة منخفضة من الانصهار الجزئي (أقل من 20%) يؤدي إلى ظهور بازلت أوليفيني قلوي. وفي حال انصهار أشد فان تركيب الصهارة سوف يتطور باتجاه تشكيل توليت غني بالأوليفين. فعلى أعماق أكثر من (100 كم) سوف تتولد ماغما

Scanned by CamScanner

غير مشبعة بالسيليكا. وإضافة إلى درجة الانصهار الجزئي ، وأعماق انفصال الماغما ، وشدة عمليات التبلور المجزأ اللاحقة ، فان التشكل النهائي لهذه الصخور او تلك سوف يتعلق بالتأثير المتبادل للماغما مع الصخور المحيطة أثناء اندفاعها للأعلى خلال المعطف والقشرة الأرضية. ولهذا يمكن النظر إلى المكافئات القريبة لمادة المعطف العلوي على أنها – تلك الصخور البازلتية التي لم تتأثر إلا قليلاً بعمليات التبلور المجزأ وعمليات التفاضل المتبادلة بين الماغما والصخور المحيطة . أما الصخور البازلتية الأخرى فتختلف عن الماغما الأم بتركيبها إلى حد بعيد . إن تصنيف صخور محددة ونسبها إلى أي من المجموعتين من الصخور البازلتية المذكورة آنفاً يتطلب دراسة دقيقة لعناصر الأثر ، وبخاصة تلك العناصر التي لا تدخل في تركيب الفلزات المكونة للصخور ، مثل العناصر الأرضية النادرة ، كما يتطلب أيضاً تحليلاً للعلاقات النظائرية المختلفة.

4 – إستخدام مخططات التكوين لتفسير آلية الإنصهار التفاضلي لصخور المعطف جملة (ديوبسيد – فورستريت – سيليكا)

من المرجح أنه على عمق محدد في ظروف الانصهار الجزئي لصخور واحدة يمكن أن يتشكل نوعان من الماغما مختلفان كثيراً من حيث التركيب . فقد اقترح Yoder H.S. (1973) آلية للانصهار التفاضلي لصخور المعطف يمكنها أن تفسر مثل هذا الاحتمال . واستخدم لهذا الغرض على سبيل المثال جملة (ديوبسيد – فورستريت–سيليكا) في شروط من الضغط المائي تبلغ p =20 K bar (الشكل 3) .



الشكل (3) . جملة ديوبسيد – فورستريت – كوارتز عندما يعادل الضغط المائي P=20 K.bar . في حالة الانصهار التفاضلي للصخر الأولي للتركيب X يمكن أن يتشكل نوعان من الماغما بتركيبين مختلفين A و B . والصخر المتبقي بعد انفصال الماغما في درجة من الحرارة تعادل (1220 C)يؤدي إلى تشكيل الصهارة(الماغما)B والصخر المتبقي D . إن النقاط A,X,C, وكذلك النقاط D,C,B تتوضع على استقامة واحدة.

إن انصهار صخور أولية منشئية بتركيب X (أنظر الشكل 3) يبدأ في الدرجة(960 C) والمصهور الأولي سوف يمتلك التركيب A ، في حين أن مثل هذه الماغما (الصهارة) يمكن أن تتشكل عند انفصال وابعاد الطور السائل المكون من نسبة تصل إلى 20 % من حجم الصخور الأولية .وسيكون للصخر المتبقي التركيب C.

ويتوقف الانصهار في الدرجة (960 C) عندما يتم استهلاك كامل الكوارتز في الصخر الأولي . فإذا ارتفعت الحرارة (من 960 إلى 1220 C) فإنه تتشكل صهارة (ماغما) بتركيب B .وبيئة ماغما بالتركيب B سوف ينفصل من الصخر بالتركيب C حوالي (22 %) من حجمه ، بعد ذلك ستبقى مادة بالتركيب D .هذا يعني ، أنه في مثل هذا النوع من العمليات من الممكن أن يتشكل نوعان متجانسان من المصاهير بتركيب وسطي .فالمصهور A سوف يكون له تركيب الليباريت ، أما المصهور B فسوف يملك تركيب الأنديزيت . وتبعاً لكمية وسلوك الفلزات الحاوية على الماء يمكن أن يتشكل بدلاً عن الماغما الأنديزيتية ماغما بازلتية التركيب.ويعتقد yoer H.S بأن هذه الآلية تفسر الانتشار الواسع لصخور متناقضة –صخور البازلت أساسية التركيب وصخور الليباريت حامضية التركيب.

5– الحدث الماغماتي وتكتونيك الصفائح

إن مناقشة منشأوتطور الماغما لا تكتمل بدون دراسة العلاقة بين العملية الماغماتية والتكتونيك .فبعض جوانب تشكل الماغما ،إضافة إلى خصائص انتشار الصخور النارية يمكن أن تفهم على أرضية مبدأ تكتونيك الصفائح ،الذي يفضل استخدامه الكثير من الجيولوجيين .

وتبعاً لفرضية تكتونيك الصفائح فإن طبقة الليتوسفير تقسم لعدة صفائح بسماكة (60-100 كم) ،تتحرك نسبياً بالنسبة لبعضها البعض فوق طبقة الأستينوسفير الواقعة تحتها .لقد أشير سابقاً إلى وجود علاقة عامة بين تركيب الصخور النارية من

Scanned by CamScanner

جهة وبين الوضع التكتوني لتشكل هذه الصخور من جهة أخرى .وتنعكس عملية انقسام طبقة الليتوسفير إلى صفائح على شكل حدود نسبية تفصل هذه الصفائح بعضها عن بعض ،وتحدد بدورها نطاقات (أحزمة) النشاط الزلزالي على سطح الأرض.

ينظر للأعراف المحيطية على أنها المناطق المميزة من سطح الأرض التي تتشكل فيها قشرة جديدة أرضية ،وتتفق خصوصية البازلت التوليتي للأعراف والقشرة المحيطية مع شروط الانصهار الجزئي للأستينوسفير على أعماق كبيرة

وأسباب الانصهار وحركة الصفائح التكتونية ليست واضحة بشكل كامل حتى الآن .ولكن يبدو أن كليهما يعود لحركة التيارات الحملانية لمادة المعطف. وعلى أية حال ، توجد هناك علاقة محددة بين أماكن البؤر الزلزالية ، ومنظومات التشقق للأعراف المحيطية والبازلت التوليتي .فالجزر البركانية التي تقع عادة بعيداً عن حدود الصفائح التكتونية تتميز بتطور للبازلت الأوليفيني القلوي .والماغما التي تشكلت منها صخور هذه الجزر يبدو واضحاً أنها تشكلت على أعماق كبيرة في الأستينوسفير مقارنة مع الماغما التوليتية للأعراف المحيطية. فالارتباط الوثيق بين الحدث الماغماتي القلوي وحدود الصفائح التكتونية وحركتها لم يتحقق بشكل نهائي .

ففي أماكن تصادم صفيحتين فإن إحداهما تنغرس في المعطف ،في حين أن الأخرى تغطيها . وتدعى المنطقة المنحنية من الصفيحة المنغرسة في المعطف التي يحدث التصادم على امتدادها بين الصفيحتين – نطاق الانغراس . ويعتقد بأن سماكة نطاق الانغراس تعادل (75 كم)). ومناطق نطاق الانغراس تكون على شكل حفر محيطية مائية عميقة ،وتتميز بصخور البازلت ،والأنديزيت ،وبصخور فوق أساسية – بيريدوتيت .والصخور البازلتية يمكنها أن تشكل في الأستينوسفير تحت الصفيحة المنغرسة مباشرة ،أما صخور الأنديزيت الأكثر حامضية فمن المرجح أنها تتشكل نتاجاً للانصهار الجزئي للقشرة المحيطية والرسوبات الخاضعة لفعل الصفيحة المنغرسة.

والصخور فوق الأساسية هي على ما يبدو عبارة عن كتل (بلوكات) تكتونية متحركة للمادة المتبقية من الانصهار الجزئي مغناة بالمغنيزيوم. والسبب الذي يجري بموجبه انصهار للمادة في نطاق الانغراس غير الواضح ،ولكن من المرجح أنه يعود لانغراس جزء الليتوسفير البارد في الاستينوسفير الأكثر حرارة، أو أنه يعود لحرارة الاحتكاك أثناء الحركة النسبية للصفيحة المنغرسة. ويمكن أن يكون هناك ارتباط محدد بين عمق توضع نطاق الانغراس في كل نقطة من نقاطه وبين الصخور البركانية المتشكلة على السطح في هذه المنطقة. وبصورة عامة يمكن القول، أنه كلما كان عمق نطاق الانغراس أكبر، كلما تشكلت أكثر ماغما قلوية التركيب في هذا المكان ويبدو،أن ذلك يرتبط إلى حد كبير بالتفاعل المتبادل للمصهورات الناهضة باتجاه الأعلى مع صخور القشرة الأرضيةالمتوضعة في الأعلى، التي تكون ذات سماكة كبيرة. ومن الواضح أنه في بعض الحالات فإن الصخور النارية للمناطق الجيوسينكلينالية القديمة كانت قد تشكلت عبر العلاقة مع وجود نطاقات الانغراس . ففي المناطق المطوية تكتونياً التي تعتبر مقعرات جيولوجية (جيوسينكلينالات) فإن الصخور البركانية وفوق الأساسية تكون مستطورة فيها ومشابهة للصخور النارية لأقواس الجزر البركانية المعاصرة.

ومثلما هي الحال في المناطق المحيطية ، كذلك الأمر فوق القارات ، فان بعض الصخور النارية يمكن أن يكون مرتبطاًبالصفائح التكتونية ، أما البعض الآخر فليس له علاقة بها . فالصخور البازلتية والقلوية لنطاقات الاهدام القارية من المحتمل أنها عبارة عن نواتج حدث ماغماتي قديم عائد إلى حدود الصفائح ، كان قد ظهر عندما بدأت القارات بالانفصال إلى كتل (بلوكات) منفصلة . ان منشأ الباتوليت الغرانيتي المستطور بمحاذاة حدود المحيط الهادي (مثل باتوليت سيرا-نيفادا) يمكن أيفسر بأنه انصهار جزئي للقشرة القارية أمكن له أن يحدث بفعل انغراس ماغما أساسية تشكلت على أعماق كبيرة في مناطق نطاق الانغراس التي تغوص تحت منطقة تطور الباتوليت .

Scanned by CamScanner

والأنديزيت يتجمع عادة مع الباتوليتات الغرانيتية ، ويعتبر على ما يبدو نتاجاً (أثراً) لانصهار المعطف الذي يحدث في وقت واحد مع تشكل الغرانيت على حساب انصهار القشرة المتوضعة في الأعلى . غير أن بعض الكتل الكبيرة من الصخور البركانية والغرانيتية مثل باتوليت Boulder يتوضع بعيداً عن نطاقات الانغراس المعاصرة . ولا يترافق النشاط التكتوني دوماً بالحدث الماغماتي . ويشير الباحث J . GILLULY (1971) إلى ، أن جبال الهيمالايا تعتبر منطقة نشاط تكتوني عالي ونطاق انغراس قديم، علماً أن مؤشرات الحدث الماغماتي هنا تغيب بشكل عملي .

وبالنتيجة يمكن القول ، أن مبدأ تكتونيك الصفائح قادر على تفسير منشأ وطبيعة توزع بعض الصخور النارية فقط ، في حين أن البعض الآخر من هذه الصخور يرتبط على مايبدو بالتكتونيك والحدث الماغماتي اللذين يحدثان في داخل الصفائح ، وليس بالامكان تفسير وجود هذه الصخور استناداً إلى قاعدة تكتونيك الصفائح .

Scanned by CamScanner

الفصل الثالث
قاعدة الأطوار ومخططات التكوين الجيولوجية

1- قانون جيبس Gibbs Rule

إن أول من عمل على اشتقاق قاعدة الأطوار هو العالم الأمريكي Willard Gibbs. وتمثل القانون الذي وضعه جيبس وسمي فيما بعد باسمه- قانون جيبس لقاعدة الأطوار ، بالصيغة التالية: $F = C + 2 - P$

ففي الجملة التي يكون فيها عدد الأطوار P يزيد بمقدار(2) عن عدد المكونات (C) فإن عدد درجات الحرية يكون معادلاً للصفر (معدوماً)، أي أن F= 0، أي أنه لايمكن في الجملة تغيير درجة الحرارة أو الضغط أو تركيز مكونات الجملة. وإذا حدث أي تغيير لأحد هذه العوامل فان توازن الجملة يختل لأن درجة الحرية معدومة في الجملة.

وعندما تكون F= 1، فإن أي من عوامل (الحرارة، الضغط، التركيز) يمكن تغييره في الجملة مع الاحتفاظ على توازن الجملة المدروسة.

واذا كانت F= 2، فإن بالامكان تغيير عاملين في نفس الوقت دون الاخلال بتوازن الجملة.

أما إذا كانت F= 3، فهذا يعني انه بالامكان تغيير العوامل الثلاثة دون الاخلال بتوازن الجملة.

ويشار هنا إلى ، أن العدد (2) في معادلة جيبس يستخدم فقط في الجملة التي تخضع لمتغيرين إثنين فقط هما: الحرارة والضغط.

فاذا كان عامل الضغط في الجملة مختلفاً (متغيراً) بالنسبة لمكونات الجملة (مثل حالة الصخور الحاوية على مياه حوفية ، فان الأطوار الصلبة في الجملة تكون

Scanned by CamScanner

خاضعة لضغط معين ، في حين أن الطور السائل – الماء يكون خاضعاً لضغط اخر) فان قانون جيبس يتمثل بصيغة أخرى مختلفة:

$$F = C+3-P$$

ولكن يمكن القول ، أنه بالنسبة للكثير من العمليات الجارية على سطح الأرض يمكن اعتبار الضغط ثابتاً، ويملك قانون جيبس في مثل هذه الحالة الصيغة التالية:

$$F=C+1-P$$

أمابالنسبة لعدد مكونات الجملة (C) فهو يمثل عدد المواد اوالمركبات أو العناصر التي تدخل في تركيب الجملة. ويتوقف اختيار عدد مكونات الجملة على تركيب أطوار الجملة المدروسة، أي أنه يتعلق بعدد العمليات (التفاعلات) الجارية في الجملة. وعدد مكونات الجملة يجب أن يعبر عن الحد الأدنى لعدد المركبات أو العناصر الداخلة اللازمة لوصف جميع التغيرات الممكنة في تركيب الجملة.

ففي الجملة المولفة من الأنهيدريت $CaSO_4$ والجيبس $CaSO_4.2H_2O$ والماء H_2O فان عدد مكونات الجملة يعادل (2) فقط ، وهما $CaSO_4$ و H_2O. ذلك أن كل طور من أطوار الجملة الآنفة الذكر يمكن التعبير عنه بهذين المكونين .فظهور إيونات الكالسيوم Ca^{++} والكبريتات SO_4^{--} في الماء نتيجة انحلال الجبس أو الأنهيدريت لا يزيد عدد المكونات (2)، ذلك أن نسبة Ca^{++}/SO_4^{--} تبقى ثابتة . وهكذا ، فإن اختيار عدد المكونات يرتبط بعدد التغيرات التي يمكن أن تجري في داخل الجملة المدروسة .

وبغية تمثيل تركيب الصخور النارية والمتحولة في جملة تخضع لقانون جيبس، فإن مكونات الجملة يمكن أن تختار من أكاسيد العناصر مثل K_2O, Al_2O_3, SiO_2 وغيرها.

فالسيانيت النيفيليني المكون من فلزات النيفيلين والأورتوكلاز والألبيت والموسكوفيت والكورووندوم يمكن أن يتألف من المكونات (الأكاسيد) التالية: K_2O, Na_2O Al_2O_3, SiO_2, H_2O. وهذه المكونات ذاتها يمكن التعبير عن تركيب الفنايس المكون من الكوارتز، والأورتوكلاز، والألبيت، والموسكوفيت والكيانيت.

2- الصيغة الجيولوجية لقاعدة الأطوار وفق Shmidt (الجملة المغلقة)

كان العالم الروسي شميدت منذ عام (1911) قد وضع صيغة جيولوجية لقاعدة الأطوار. وقد أثبت ، بأن تشكل غالبية الصخور يجري في شروط محددة من الضغط والحرارة، وان وجود تجمعات فلزية محددة يشير إلى عملية تشكل جرت في شروط (ظروف) متوازنة . ولهذا فإن غالبية الصخور يمكنها أن تمتلك بالحد الأدنى درجتين من الحرية (الحرارة والضغط).

فعندما تكون $F = 2$، فإن عدد الأطوار يعادل عدد مكونات الجملة أي أن :

$$P = C$$

أما إذا كانت $F > 2$ فإن عدد أطوار الجملة يكون أقل من عدد المكونات الداخلة فيها أي أن: $P < C$.

وتثبت قاعدة شميدت لقانون الأطوار الفلزي، بأن عدد الفلزات في الصخور (في حالة التوازن) يكون أقل أو يعادل عدد المكونات المشكلة لهذه الصخور.

– وفي مثل هذه الحال ، فإن قاعدة الأطوار قليلة الإ ستخدام عند إجراء دراسات تفصيلية للصخور. ولكن رغم ذلك، فإنها تفسر لنا وجود العدد غير الكبير نسبياً من الفلزات في غالبية الصخور. وعادة ما تحتوي الصخور (من خمسة إلى عشر مكونات أساسية)، كما أن ظروف التشكل تؤمن على وجه التقريب ما تتطلبه حالة التوازن.

إن عدد الفلزات المكونة للصخور يتراوح بين الخمسة والعشر فلزات، وكان يمكن للأبحاث الجارية على الصخور أن تصبح أكثر تعقيداً لو أمكن لهذه الصخور أن تضم أربعين أو خمسين فلزاً.

2-1- جملة كالسيت – كوارتز

نمثل هذه الجملة مثالاً تطبيقياً لقاعدة الأطوار ، الشكل (4).

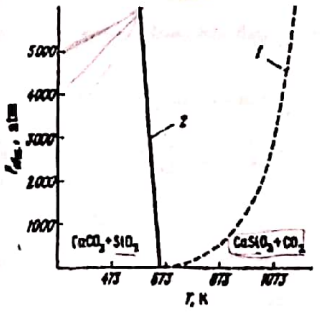
Scanned by CamScanner

فعندما تكون الجملة مغلقة، فإنه على طول المنحني المنقط تتواجد أربعة أطوار هي على التوالي: كوارتز، وللاستونيت ، كالسيت، ثاني أكسيد الكربون. ويمكن التعبير عن تركيب هذه الأطوار الأربعة بثلاث مكونات فقط هي: SiO_2, CaO, CO_2، وبالتالي فإن درجة حرية الجملة وفقاً لقاعدة الأطوار يمكن أن تكون على النحو التالي:

$$F=C+2-P$$
$$F=3+2-2$$
$$F=1$$

أي أن الجملة في مثل هذه الحال تملك درجة واحدة من الحرية فقط، وهذا يعني أنه ببساطة يمكن تغيير درجة الحرارة بوجود ضغط ثابت تكون فيه الأربعة أطوار الخاضعة له موجودة بحالة توازن.

وبعبارة أخرى، يمكننا الإبقاء على خط التوازن إما بتغيير درجة الحرارة (الضغط يكون ثابتاً)، أو بتغيير الضغط (الحرارة تكون ثابتة). غير أن أي تغيير لكل من الحرارة والضغط في ذات الوقت لايتيح الفرصة للإبقاء على خط التوازن.



الشكل (4) ويمثل العلاقة بين الضغط العام ودرجة الحرارة للتفاعل التالي:

$$CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2$$

إن خط التوازن بالنسبة لغالبية الصخور سوف يقع بين الخطين (1) و (2) بالنسبة للشكل. 1- الجملة مغلقة ، وضغط غاز CO_2 يعادل ضغط الجملة العام. 2- الجملة مفتوحة (يمكن بحرية إبعاد CO_2 من الجملة) ، وضغط CO_2 يعادل واحد بار.

3- الصيغة الجيولوجية لقاعدة الأطوار وفق D.S.Korjinski (الجملة المفتوحة)

اقترح العالم كورجينسكي (1936) صيغة جيولوجية متطورة للجملة التي يمكن أن يحصل فيها تفاعل متبادل لمكوناتها مع المحيط (الجملة المفتوحة). وهي على عكس الجملة المغلقة التي يفترض فيها عدم حدوث تفاعلات بين مكونات الجملة والمحيط الذي تجري فيه الجملة.

فالكثير من الجمل الجيولوجية يجب النظر إليها على أنها جمل مفتوحة يمكن للمادة فيها أن تخرج من الجملة أو تدخل فيها. وهذا ينطبق بالفعل على عمليات التحول الجارية في الطبيعة.

صنّف كورجينسكي مكونات المادة الصخرية إلى :

أ- مكونات متحركة

ب- مكونات خاملة (ثابتة)

تساهم المكونات المتحركة في عمليات التفاعل المتبادلة التي يمكن أن تجري بين الجملة والوسط المحيط. أما المكونات الخاملة فإنها لاتشارك في هذه العمليات.

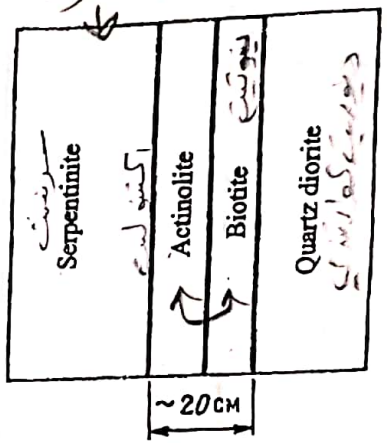
فثنائي أكسيد الكربون CO_2 مثلاً برفقة الكلس الحاوي على حبيبات من الكوارتز (أنظر الشكل 4) يعتبر مكوناً متحركاً، ذلك أن هذا الغاز يمكن إبعاده عبر التشققات في الصخر. وهناك مكون متحرك آخر يمكن أن يؤخذ بعين الاعتبار وهو- الماء- في عمليات التحول الجيولوجية. واقترح كورجينسكي في هذا الشأن، بأن طاقة الكمون الكيميائي للمكونات المتحركة تتحدد بالوسط المحيط، ولهذا فإن المكونات المتحركة يجب أن لا تتعارض مع قاعدة الأطوار وفي هذه الحال فإنه وفقاً للقانون الفلزي للأطوار فإن عدد الفلزات في الصخر يساوي أو أقل من عدد المركبات الخاملة.

لقد أوضح كورجينسكي ذلك في مثال الصخور المتحولة التي يبدو واضحاً أنها تشكلت بنتيجة عمليات الإستعاضة (التغير تحت تأثير الموقع). ومثل هذه الصخور يملك عدداً من المركبات الأساسية وتتألف ليس اكثر من ثلاثة أطوار. والمثال

Scanned by CamScanner

العيني يمكن أن تمثله نطاقات التفاعل أحادية الفلز أوثنائية الفلز بين الصخور فوق الأساسية والصخور الحامضية المحيطة بها (أنظر الشكل 5).

والمثال الآخر للتماسات الحادة مع النطاقات التي تضم طوراً أوطورين يمكن أن تلعبه قشرات التحوية ونطاقات التغير في محيط العروق الخامية.



الشكل (5)نطاقات أحادية الفلز التماسية المتشكلة بالتفاعل بين السربنتينيت والديوريت الكوارتزي . إن تغير علاقة Mg/(Mg+Fe)في عينات الأكتينولايت والبيوليت يشير إلى ، أنه أثناء تشكل النطاقات التماسية لم يبلغ التوازن الكيميائي حالته المثلى. ومن المحتمل أن غالبية المركبات في النطاقات التماسية متحركة.
حسب H.Brownlow (1961)

— ولكن هناك من الباحثين من يشير إلى وجود صعوبات في استخدام قاعدة الأطوار لحل المسائل الجيولوجية . فمثلاً، لايجوز تسمية أوتحديد هذه المركبات أوتلك ووصفها بأنها خاملة أومتحركة. فتحديد عدد الأطوار في الصخر يمكن أن يتعقد بفعل تمنطق الفلزات أوغيره من العوامل. فبعض العناصر في الفلزات يمكن أن يستبدل بسهولة بغيره من العناصر، مثل استبدال الحديد بالمغنيزيوم في الفلزات الحديدية المغنيزية. فهل يمكن أن ننظر إلى التركيب O(Mg/Fe) على أنه مركب واحد ، أم أنه يتكون من مركبين منفصلين ؟ ولاتقل أهمية عن ذلك حقيقة أن قاعدة الأطوار — ضرورية، ولكنها غير كافية لتكون مقياساً للتوازن. (إن كفاية مقياس توازن الجملة تعبر عن نفسها على نحو، أن أي تغيير مهما كان ضئيلاً يشكل في الجملة تغيراً عكوساً).فالصخور التي لا تختل فيها قاعدة الأطوار يمكنها هي الأخرى أن لا تكون متوازنة .ففي الكثير من الصخور يأخذ

التوازن فيها طابعاً محلياً يعبر عن نفسه بظهور بلورات فلزية بمقاييس عدة سنتيمترات. أما الأجزاء الأخرى من هذه الصخور فسوف لن تكون متوازنة بالنسبة لبعضها البعض.

ويمكن القول بثقة، بأن الصخور التي لم تؤخذ فيها قاعدة الأطوار بعين الاعتبار في ظروف حساب دقيق لمركباتها وأطوارها قد تشكلت في ظروف غير متوازنة.

4-المخططات الطورية Phase Diagrams

تعرف المخططات الطورية بأنها خطوط بيانية تعبر عن العلاقة الطورية لجملة مؤلفة من مكون واحد أو أكثر تخضع لمتغير واحد أو عدة متغيرات.

والمخططات الحرارية في الجملة يمكن النظر إليها على أنها التعبير البياني عن قاعدة الأطوار. وتقام المخططات الحرارية بالتناسق مع المخططات الطورية.

وتقسم المتغيرات الطورية إلى نوعين أساسيين:

أ- متغيرات الخصائص :

وهي متغيرات لا تتعلق بكمية المادة في الجملة، وإنما تتعلق بمجموعة من المتغيرات التي يمكن أن تخضع لها الجملة مثل الحرارة، والضغط، والكثافة.

ب- متغيرات الحجم، والكتلة، والطاقة الداخلية

وهي متغيرات تتعلق بكمية المادة في الجملة بشكل أساسي .

1.4- الجملة وحيدة المكون Al_2SiO_5

إن أكثر نماذج المخططات الطورية بساطة- تلك التي تتضمن مكوناً واحداً وتخضع لعاملين متغيرين هما الضغط والحرارة (الشكل 6).

Scanned by CamScanner

وتبعاً لقاعدة الأطوار ، يمكن القول بأن هذه الجملة المولفة من مكون واحد هو Al_2SiO_5 من الممكن أن يظهر فيها ثلاثة أشكال فلزية مختلفة هي: الكيانيت، والسليمانيت، إضافة إلى الأندلوزيت. حيث يظهر كل طور من أطوار الجملة تبعاً لتغيرات كل من الضغط والحرارة (P,T).

ويمكن من الشكل (6) تحديد القطاعات التالية:

أ- قطاع الكيانيت kyanite

وفقاً لقاعدة الأطوار $F=C+2-P$

C– تمثل مكوناً واحداً

P –تقابل طوراً واحداً هو الكيانيت

F – هي عدد درجات الحرية وتعادل:

$$F=1+2-1=2$$

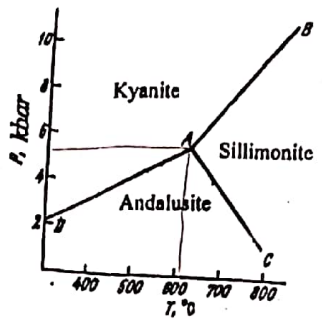
وهما درجة الحرارة والضغط، أي أنه يمكن تغيير كل من الضغط والحرارة حتى لحظة التقاطع مع الخطين AB أو AD.

وذات الحال بالنسبة لقطاع الأندلوزيت وقطاع السليمانيت فإن F=2 .

ب- المنحنيات AB أو AC أو AD.

يتضح من الشكل السابق أن كلاً من هذه المنحنيات يمثل خط التوازن بين طورين.

فالمنحني AB يمثل خطاً بين طوري (كيانيت–سليمانيت)، AC (سليمانيت– أندلوزيت)، AD (أندلوزيت–كيانيت).



الشكل (6) مخطط طوري لجملة وحيدة المكون Al_2SiO_5 . يملك هذا المخطط أهمية كبيرة أثناء دراسة الصخور المتحولة. حسب : S.W.Richardson وغيره (1969)

حيث يمكن وفق الخطوط المذكورة آنفاً تغيير إما الضغط فقط، أو الحرارة فقط، ذلك أن درجة الحرية هنا هي: (F=1)، وهذا ما يتيح الفرصة للإحتفاظ بوجود طورين متوازنين على طول كل خط. فمثلاً ، يتواجد الكيانيت والسليمانيت في توازن عند ضغط يعادل (8 كيلو بار) ودرجة حرارة تعادل(725 مْ). فإذا تم رفع درجة الحرارة حسب الرغبة إلى (825 درجة مئوية)، فإنه للحفاظ على التوازن بين الطورين يجب رفع الضغط حتى (10 كيلو بار).

ج–النقطة الثلاثية (A)

وهي تمثل نقطة تتواجد فيها ثلاثة أطوار في حالة توازن حيث أنك

C– تمثل مكوناً واحداً

P– تمثل ثلاثة أطوار موجودة في حالة توازن

F– هي عدد درجات الحرية وهي تنعدم وفقاً لقاعدة الأطوار أي أن:

$$F=1+2-3=0$$

أي انه لايمكننا تغيير أي من الحرارة أو الضغط دون الإخلال بتوازن الأطوار الثلاثة في الجملة.

• فالنقطة الثلاثية A في الشكل (6) تعبر عن غياب درجة الحرية . وهذا يعني أن الصخور التي تتضمن الأشكال الفلزية الثلاثة للمركب (المكون) Al_2SiO_5 يجب أن تصادف بشكل نادر للغاية، ذلك أن تواجدها المتوازن محدد للغاية بدرجة معينة من الضغط والحرارة. أما الوجود المتواقت لطورين إثنين للمكون الذكور فتكون فرصته أكبر في الصخور . ولهذا تتوفر إمكانية وجود منطقة استقرار على طول خطوط الحدود الطورية.

غير أن الوجود الأكثر احتمالاً في الصخور يمكن أن يكون لطور فلزي واحد من الأشكال الثلاثة للمكون Al_2SiO_5 يكون مستقراً في مجال واسع من الحرارة والضغط (المناطق الفاصلة بين خطوط الحدود الطورية).

Scanned by CamScanner

2-4 – الجمل اليوتكتكية Eutectic Systems

تعرف الجمل اليوتكتيكية بانها مزيج لمادتين مختلفتين بالبنية والتركيب، حيث يمكن لهما التواجد في طور واحد في الحالة المنصهرة فقط، أما في حالة التبلور والتصلب فتنفصلان عن بعضهما البعض.

والمثال عن الجمل اليوتكتيكية هو- جملة ثنائية المكون مؤلفة من فلزين مختلفين هماالأنورتيت $CaAl_2Si_2O_8$ والديوبسيد $CaMgSi_2O_6$. حيث يمثل الأنورتيت الطرف الكلسي في زمرة البلاجوكلاز، بينما يمثل الديوبسيد أحد فلزات البيروكسين.

AY – يمثل خط الجمود للأنورتيت، وهو يمثل 100% من الأنورتيت في الجملة.

DEA – يمثل منحنى السيولة Liquidus curve أو الإنصهار لكل من الديوبسيد DE والأنورتيت EA.

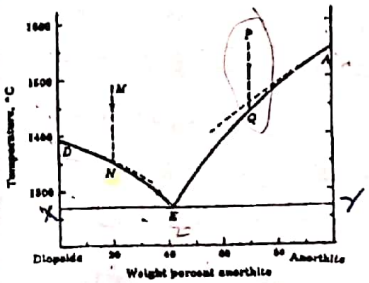
DXE– يمثل قطاع البلورات الصلبة من الديوبسيد إضافة لمصهور سائل (أنورتيت – ديوبسيد).

AYE– يمثل قطاع البلورات الصلبة من الأنورتيت إضافة لمصهور سائل (أنورتيت – ديوبسيد).

D– تمثل نقطة إنصهار الديوبسيد النقي وهي تقابل (1391 C)

A–تمثل نقطة إنصهار الأنورتيت النقي وهي تقابل (1550 C)

يلاحظ من الشكل (7) أن منحني نقطة الإنصهار لكل من الأنورتيت والديوبسيد يتقابلان في النقطة E(نقطة اليوتكتيك) المقابلة للدرجة الحرارية (1270 C) والتركيب (42% An، 58% Di).



الشكل (7) جملة يوتكتيكية ثنائية (أنورتيت _ ديوبسيد) في مخطط يحتوي درجة الحرارة والتركيب.

ويشار هنا إلى ، أن بلورات الديوبسيد في المصهور الغني بالديوبسيد ستكون أكثر من بلورات الأنورتيت ، وهي أولى البلورات التي تتشكل وتنتقل من الطور السائل إلى الطور الصلب أثناء انخفاض درجة الحرارة في القطاع DXE، حيث يمثل DE خط انصهار مزيج غني بالديوبسيد .

أما المصهور الغني بالأنورتيت فإن أولى البلورات المتشكلة فيه أثناء التبريد ستكون مكونة من الأنورتيت ، فالمنحني AE يمثل خط انصهار المزيج الغني بالأنورتيت. وتكون النقطة E في هذه الحال هي نقطة إلتقاء خطي إنصهار كل من الديوبسيد والأنورتيت .

عند تبريد مصهور مؤلف من An %20 و Di %80 (أنظر النقطة M في الشكل7) فإنه سيعطي بلورات من الديوبسيد مبكرة التشكل في النقطة N(C 1350) وعندما تزال بلورات الديوبسيد من المصهور فإن تركيب المصهور سيتغير وتنخفض درجة حرارة تميعه (أوتصلبه). وبستمر تغير المصهور حتى النقطة E، حيث يبدأ الأنورتيت في هذه النقطة بالتبلور إلى جانب ما تبقى من الديوبسيد وتبقى درجة الحرارة ثابتة حتى إنتهاء التبلور.

أما عند تبريد مصهور أغنى بالأنورتيت مؤلف من An %70 وDi %30 فإنه سيتبع في تبرده وتصلبه الخط PQ، حيث تبدأ بلورات الأنورتيت مبكرة التشكل بالترسيب من المصهور في النقطة E التي يبدأ عندها الديوبسيد بالتبلور إضافة إلى تبلور ما تبقى من الأنورتيت، وستبقى درجة الحرارة ثابتة حتى انتهاء التبلور.

وتتبع عملية انصهار مزيج صلب من الأنورتيت والديوبسيد أثناء التسخين نفس التسلسل السابق ولكن بشكل معكوس. فالمصهور سيظهر أولاً بدرجة الحرارة اليوتكتيكية ويكون له تركيب يوتكتيكي. وسوف لن يكون هناك تغير في الحرارة أو التركيب حتى ينصهر أحد الفلزين ويذوب في الآخر. وعندئذ سترتفع درجة الحرارة

Scanned by CamScanner

حين انصهار ماتبقى من الفلز الآخر، وتتغير درجة الحرارة عندها حسب ED أو ED وذلك حسب تغيرات تركيب المصهور.

ويمكن الإشارة هنا إلى أن إنتزاع أوترسيب البلورات مبكرة التشكل لأي من الأنورتيت والديوبسيد لن يؤثر على سير تبريد أي مزيج مهما كان تركيبه.

4–3 – جمل المحاليل الصلبة Solid Solutions

تعرف جملة المحاليل الصلبة بأنها مزيج لمادتين تتفقان بالبنية والتركيب وتتوفر فيهما إمكانية الإستبدال بين عناصرهما المكونة (المتقاربة من حيث أنصاف أقطارها الذرية)، وتتواجدان معاً في طور واحد في الحالتين المنصهرة والصلبة، والمثال على ذلك يمكن أن تكون جملة الأوليفين (فياليت Fe_2SiO_4 – فورستريت Mg_2SiO_4) وجملة البلاجوكلاز (أنورتيت $CaAl_2Si_2O_8$ – ألبيت $NaAlSi_3O_8$).

4–3 – 1 – جملة محلول صلب الأوليفين (فياليت – فورستريت)

يشكل الفياليت مع الفورستريت محلولاً صلباً . فإذا كشف الأوليفين عن نفسه بسلوك مثالي ، فإن استبدال أيونات المغنيزيوم بأيونات الحديد سيتسبب في إحداث تغير طبيعي في خواص هذا الفلز وهذا التغير سيتناسب طردا مع تغير الجزء المولي للفورستريت. فمثلاً ، إن الحجم المولي لعينة الأوليفين يجب أن يحقق المعادلة التالية:

$$V(Olivin) = \frac{n1}{n1+n2}.V(Forstrite)+\frac{n2}{n+n2}.V(Fayalite)$$

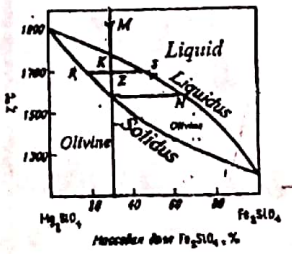
حيث : n1 – عدد مولات الفورستريت في العينة

n2 – عدد مولات الفياليت في العينة

$\frac{n1}{n1+n2}$ – الجزء المولي للفورستريت

$\frac{n2}{n1+n2}$ – الجزء المولي للفياليت

إذا بردنا مصهوراً بتركيب 30% فياليت (النقطة M) حتى الدرجة (1780 C) تبدأ بلورات الأوليفين بالتشكل ، وإذا استمر

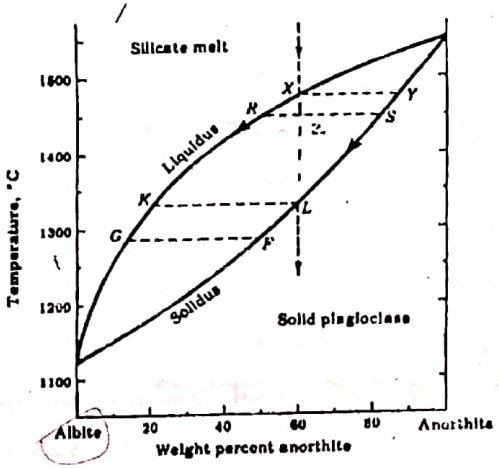


الشكل (8) مخطط درجة الحرارة والتركيب لجملة الأوليفين (فياليت – فورستريت)

التبريد حتى النقطة Z(1700 C) فإن تركيب المصهور السائل يعبر عنه بالنقطة S، أما تركيب الصلب فيعبر عنه بالنقطة R. ويلاحظ من الشكل (8) أن تركيب الصلب أغنى بالفورستريت مقارنة بتركيب المصهور المنشئي، بينما تركيب السائل أفقر بالفورستريت بالمقارنة مع المصهور المنشئي. وعند وصول التبريد حتى النقطة L فإن بلورات الأوليفين الصلبة سوف تكون بنفس تركيب النقطة L على خط السوليدوس، في حين سيكون تركيب المصهور السائل في هذه النقطة موافقاً للنقطة N على خط الليكويدوس. وعند استمرار التبريد في النقطة L سيتحول كامل المزيج إلى أوليفين صلب كما هو واضح من الشكل السابق.

4–3 – 2 – جملة محلول صلب البلاجوكلاز (أنورتيت – ألبيت)

يلاحظ في جملة المحلول الصلب للبلاجوكلاز أن درجة إنصهار فلز الأنورتيت النقي هي (1552 C)، والألبيت (1118 C). ويتم إنصهار مزيجهما بين هاتين الدرجتين من الحرارة (الشكل 9).



Temperature-composition diagram for the plagioclase feldspars. After Bowen (1928)

الشكل (9) مخطط درجة الحرارة والتركيب لجملة محلول صلب للبلاجوكلاز (أنورتيت – ألبيت)

Scanned by CamScanner

عند تبريد مصهور مكون من 40% من الألبيت حتى الدرجة (1470C) (النقطة X) تبدأ بلورات البلاجوكلاز الصلبة بالتشكل . فهي إذاً ليست بلورات نقية من الألبيت وليست بلورات نقية من الأنورتيت، بل هي بلورات بلاجوكلاز غني بالأنورتيت، لأن نسبة الأنورتيت تعادل 60%. واذا استمر التبريد حتى النقطة Z فإن تركيب المزيج يعبر عنه كما يلي: يعبر عن تركيب المصهور بنقطة على منحني السيولة R، أما تركيب الصلب فيعبر عنه بالنقطة S(على منحني التصلب).

إذا بقيت البلورات الأولى المتشكلة معلقة في المصهور فإنها لن تكون متوازنة عند انخفاض درجة الحرارة، ولهذا فإنها تتفاعل مع المصهور.

- فإذا لم تترع البلورات الصلبة المتشكلة ذات التركيب S من المصهور فإن الفرصة تتاح لتفاعل هذه البلورات مع المصهور المتبقي R، عندها سيقترب تركيبهما المشترك من التركيب المبدئي (النقطة Z). ولهذا فإن التبلور سيتبع الخط XZ تقريباً ، وستكون البلورات متجانسة التركيب إلى حد ما طالما أنها تتشكل في وسط هادئ.

- ويشار هنا إلى ، أن البلورات الصلبة المتشكلة أثناء التبريد (بدءاً من مصهور النقطة X) على الخط (XL) ستكون في أية نقطة أغنى بتركيبها بالأنورتيت، أما تركيب المصهور السائل وبنفس النقطة فسيكون أغنى بالألبيت.

- وعند وصول التبريد إلى النقطة L فإن بلورات البلاجوكلاز الصلبة ستكون بنفس تركيب النقطة L على خط السوليدوس Solidus، بينما سيكون تركيب المصهور السائل في هذه النقطة موافقاً للنقطة K على خط الليكويدوس، وعند استمرار التبريد في النقطة L سيتحول كامل المزيج إلى بلاجوكلاز صلب كما هو واضح في الشكل (9).

فإذا تم إقصاء البلورات الصلبة البلاجوكلازية بسرعة أثناء التبريد فإن التوازن لن يتحقق وسنحصل على كمية من بلورات البلاجوكلاز مختلفة التركيب غنية بالأنورتيت في القاع وبالألبيت نحو السطح.

أما إذا تم إبعاد بلورات البلاجوكلاز المتشكلة بسرعة أثل فستتوفر الإمكانية لتفاعل هذه البلورات جزئياً مع المصهور، وسيؤدي ذلك إلى تشكل بلورات البلاجوكلاز المتمنطقة .

لنفترض الآن حالة معاكسة لعملية تبريد المصهور البلاجوكلازي ، أي حالة تسخين لبلورات البلاجوكلاز . فعندما نسخن هذه البلورات فإن أول سائل يمكن أن يتشكل سيكون أغنى بسيليكات الألمنيوم الصودية مقارنة مع البلورات ذات التركيب. فمثلاً لو أن البلورات كانت بتركيب (50% Ab) (النقطة F) ، فإن المصهور الأولي الناتج عند عملية التسخين سيكون بتركيب (87% Ab(النقطة G)، وسيتغير تركيب الجسم الصلب عند رفع درجة الحرارة على طول خط السوليدوس بدءاً من النقطة Fباتجاه النقطة Y . كما أن تركيب السائل سيتغير عند رفع الحرارة بدءاً من النقطة Gباتجاه النقطة Xحتى تنصهر البلورات النهائية وتعطي سائلاً بتركيب (50% Ab)، أي نفس تركيب الجسم الصلب – المنشأ.

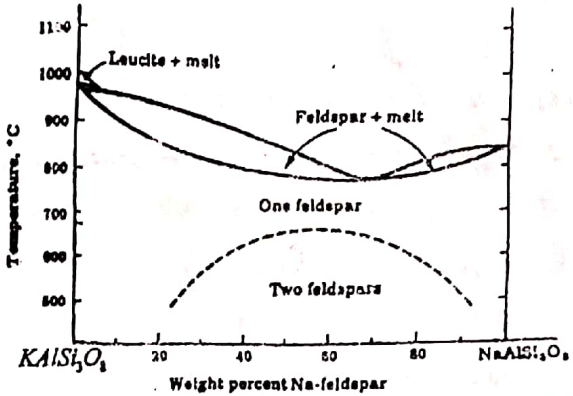
4 – 3 – 3 – جملة محلول صلب ذات درجة إنصهار دنيا(ألبيت – صفاح بوتاسي)

يشكل الألبيت والصفاح البوتاسي الطرفين الصودي والبوتاسي لعائلة الصفاح. فهما يشكلان مجموعة متصلة من المحاليل الصلبة كما هي الحال في مجموعة البلاجوكلاز التي سبق ان ذكرنا أنها تشكل مجموعة متصلة من المحاليل الصلبة لفلزي الألبيت – أنورتيت.

غير أن التراكيب الإنتقالية في مجموعة المحاليل الصلبة الصودية – البوتاسية لها نقاط إنصهار أدنى من نقاط إنصهار جملة (البيت – صفاح بوتاسي (الشكل 10).

وجملة(ألبيت – صفاح بوتاسي)خاضعة لضغط مائي يعادل(2000Kg/Cm2) بدلاً من أن تكون جملة بحافة، ذلك أن الجملة الجافة يمكن أن تتضمن تعقيدات إضافية بشأن درجة الانصهار الدنيا تنجم عن تشكل اللوسيت في المصاهير الغنية بالصفاح البوتاسي.

Scanned by CamScanner



الشكل (10) مخطط لجملة محلول صلب ذات درجة انصهار دنيا (ألبيت-صفاح بوتاسي)
تحت ضغط لبخار الماء يعادل $2000\ Kg/Cm^2$

يمثل المنحني السفلي في مخطط الجملة (ألبيت – صفاح بوتاسي)، أي المنحني المنقط المقوس باتجاه الأسفل، خط السولفوس Solvus الذي يمثل حدود عدم الامتزاج للصفاح الصودي مع الصفاح البوتاسي بالحالة الصلبة. ذلك أن المحلول الصلب يكون ثابتاً فقط في درجات الحرارة العالية، بينما يتفكك هذا المحلول بانخفاض درجة الحرارة إلى بلورات منفصلة يقترب تركيبها من تركيب حدي الجملة – الألبيت والصفاح البوتاسي.

ويشار هنا إلى إمكانية أن يؤدي انفصال طورالألبيت الصلب عن طور الصفاح البوتاسي الصلب إلى نمو متداخل ملتحم دقيق الحبيبات تشبه الحبيبات المؤلفة للأنورتوكلاز Anorthoclase أو إلى تداخل أخشن للحبيبات يعطي البيرثيت Perthite .

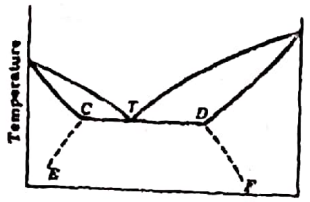
وفي حالة التبريد السريع للجملة قد يحافظ الصفاح الغلوي على حالته باعتباره محلولاً صلباً زائف الثبات. وتعتبر بلورات السانيدين Sanidine في اللافا المتدفقة على السطح مثالاً جيداً عن مثل هذه الحال.

4-4- الجمل الثنائية المعقدة Complex Binary Systems

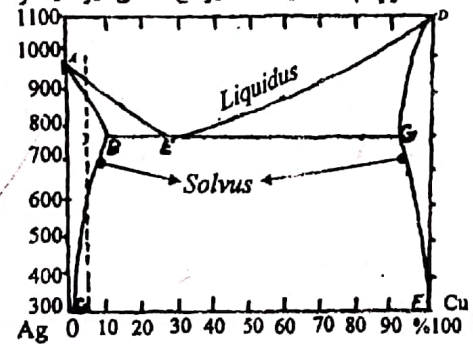
4-4-1- جملة يوتكتيكية مع محلول صلب

لا تمثل هذه الجملة نموذجاً للفلزات المكونة للصخور في الطبيعة. ولهذا يمكن الاكتفاء بإيراد نموذج بديل، إنه جملة (النحاس- الفضة) (الشكل 11)

تمثل هذه الجملة إنحلالاً محدوداً للنحاس في الفضة والفضة في النحاس . ويمكن إستناداً للشكل (11- أ) تحديد القطاعات التالية:



الشكل (11 – أ) مخطط نظري لجملة ثنائية معقدة يوضح كلاً من اليوتكتيك والمحلول الصلب



الشكل (11 – ب)مخطط جملة يوتكتيكية مع محلول صلب (فضة-نحاس)

AED – يمثل خط السيولةLiquidus في الجملة

ABEGD– يمثل خط التصلب Solidus في الجملة

BC– يمثل خط إنحلال النحاس في الفضة في الحالة الصلبة بدرجات حرارة مختلفة .
ويلاحظ أن هذا الخط يقع تحت خط التصلب .

GF– يمثل خط إنحلال الفضة في النحاس في الحالة الصلبة بدرجات حرارة مختلفة.

Scanned by CamScanner

فالـنحاس مـثلاً ، يمكـنه التواجد منحلاً في الفضة بأية درجة حرارة وبأي تركيـب في المـنطقة الفاصلة بين الإحداثي الرأسي والخط ABC ويعبر عنه بالمحلول الصلب α.

أمـا انحـلال الفضـة في النحاس فيعبر عنه بالمحلول الصلب β الذي يشغل المنطقة المحصورة بين الإحداثي الرأسي والخط DGF.

E– تمثل نقطة اليوتكتيك (71.9 % Ag، 28.1 Cu) (779.4 °C).

فـإذا كان محتوى النحاس في الجملة يزيد عن (28.1 %) فإن نواة الخليطة ستكون مولفة من المحلول الصلب β . أما إذا كانت نسبة النحاس أقل من (28.1 %) فإن النواة ستكون مولفة من المحلول الصلب α .

إذا تم تبريد مصهور مكون من (1% Cu) ، حيث يمثل الخط المتقطع بدءاً من النقطة M سير تبريد هذا المصهور ، فإن هذا المصهور يبدأ بالتجمد عند الوصول إلى درجة تبريد تزيد قليلاً عن (900 °C)، وتنصلب السبيكة تماماً على شكل محلول صـلب عند الدرجة (860°C) تقريباً ومع الإستمرار بتبريد المصهور يبقى المحلول الصلب للنحاس في الفضة سليماً حتى الدرجة (630 °C). (نقطة تقاطع سير التبريد مع الخـط BC) حيث بدءاً من هذه النقطة يبدأ النحاس بالإنفصال على شكل طور منفصل عن المحلول الصلب α ، ذلك أن الخـط BC يمثل كما ذكرنا سابقاً الحد الأقصـى لانحـلال النحاس في الفضة بالحالة الصلبة. ويلاحظ أن انحلال النحاس في الفضـة يتـناقص بانخفاض درجة الحرارة وهذا مايشير إليه ميل الخط BC. ولهذا فإن تـبريد السبيكة الآنفة الذكر تحت الدرجة (630 °C) يؤدي إلى ، أن المحلول الصلب يصبح فوق مشبع بالنحاس مما يؤدي إلى ترسيب النحاس (الكمية الفائضة).

وإذا تم غمر السبيكة الموصوفة أعلاه في الماء بدرجة حرارة تزيد عن(630 °C) وتقـل عن حرارة خط التصلب AB فإن حالة المحلول الصلب α تبقى سليمة دون أي ترسيب للنحاس.

أما أذا كانت نسبة النحاس في الفضة تزيد عن (8.8 %)(تركيب النقطة B) فإن تبريد أي مصهور سيعطي حتى حدود نقطة اليوتكتيك Eسبيكة يوتكتكية صلبة.

4 –4– 2 – جملة يوتكتيك مزدوج Double eutectic

المـثال عـن جملة اليوتكتيك المزدوج هي – جملة (السيليكا SiO_2–نيفيلين $NaAlSiO_4$) تتشكل في هذه الجملة ثلاثة أطوار مختلفة:

أ– السيليكا SiO_2 على شكل تريديميت Tridymite في الظروف المخبرية الجافة وعلى شكل كوارتز في الطبيعة.

ب– النيفيلين $NaAlSiO_4$

ت– الألبيت $NaAlSi_3O_8$

ولكـن من المعروف أن أحد هذه المركبات الفلزية يمكن اشتقاقه من المركبين الآخرين وفق لمعادلة : $SiO_2 + NaAlSiO_4 = NaAlSi_3O_8$

أي أن الجملة تحتوي على مكونين اثنين.

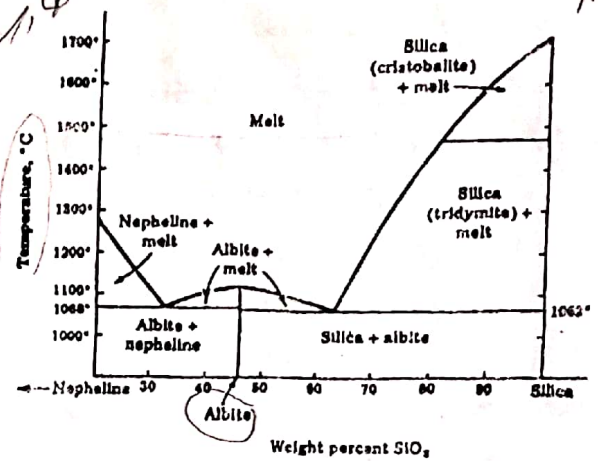
وتـبعاً لقـاعدة الأطوار، فإن الأجسام الفلزية الصلبة الثلاثة المذكورة آنفاً لا يمكـنها التواجد في نفس الوقت، لأن الجملة في مثل هذه الحال ستحتوي على أربعة أطوار (ثلاثة مركبات صلبة إضافة للمصهور السائل).

فـإذا استخدمنا قاعدة الأطوار في مثل هذه الجملة لأمكن الحصول على قيمة سلبية لعدد درجات الحرية (في حالة الافتراض بوجود أربعة أطوار) :

$$F = C + 1 - P = 2 + 1 - 4 = -1$$

أي أن جملـة (السـيليكا – نيفيلين) لا يمكنها أن تضم في ذات الوقت إلا زوجـاً واحـداً من المركبات الفلزية وهو : إما (سيليكا – ألبيت) أو (نيفيلين – ألبيت) . حيث أن كل زوج منهما سيشكل يوتكتيكاً بسيطاً كما في الشكل (12) .

Scanned by CamScanner



Simplified diagram of nepheline-silica system. After Barth (1968).

الشكل (12) مخطط درجة حرارة تركيب لجملة يوتكتيك مزدوج (سيليكا- نيفلين)

4 – 4 – 3 – جملة يوتكتيك مزدوج مع انصهار تفسخي

Eutectic with incongruent melting

النموذج المثالي لهذه الجملة هو – جملة (سيليكا – لوسيت)

تماثل هذه الجملة جملة (سيليكا – نيفلين) سابقة الذكر من حيث كونها ثنائية المكون، غير أنها تشكل ثلاثة أجسام صلبة مختلفة هي :

أ – السيليكا SiO_2

ب – الصفاح البوتاسي $KalSi_3O_8$

ت – اللوسيت $KAlSi_2O_6$

غير أن احد هذه المركبات يمكن اشتقاقه من المركبين الآخرين كما في المعادلة التالية:

$$SiO_2 + KAlSi_2O_6 = KAlSi_3O_8$$

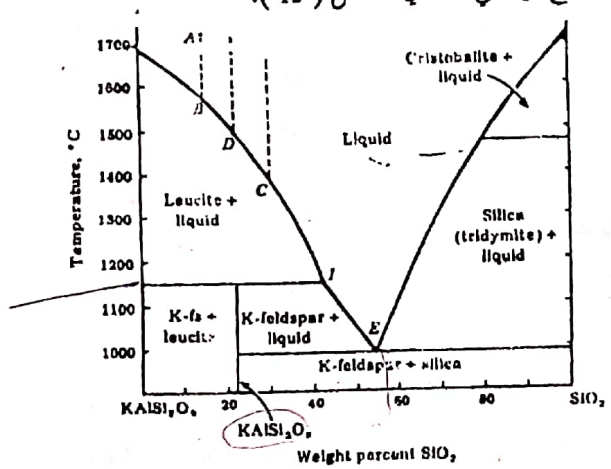
ويشار هنا إلى ، ان العلاقة بين الأطوار الفلزية الثلاثةفي جملة(سيليكا – لوسيت) تختلف عنها في جملة (سيليكا – نيفلين) السابقة . فالصفاح البوتاسي غير

ثابت ويمكن أن يتفكك في درجات الحرارة الأعلى من (1150 C) إلى لوسيت ومصهور غني بالسيليكا كما في المعادلة التالية:

$$KAlSi_3O_8 = KAlSi_2O_6 + SiO_2$$

ويقال هنا ان الصفاح البوتاسي قد انصهر انصهاراً تفسخياً أوتفككياً.

فالمصهور السائل ذو التركيب القريب من تركيب الصفاح البوتاسي سوف لن يعطي الصفاح البوتاسي عند انتقال المصهور السائل إلى طور بلوري صلب، وإنما سيعطي بداية طوراً صلباً من اللوسيت، ثم بعد ذلك يتحول هذا الأخير بتفاعله مع المصهور السائل إلى صفاح بوتاسي كما في الشكل (13).



الشكل (13) مخطط حرارة – تركيب لجملة(سيليكا – لوسيت)

يتبين من الشكل (13) أن الجزء الأيمن من مخطط الجملة المدروسة الذي يتراوح تركيز السيليكا فيه (بين 42% إلى 100%)يمثل يوتكتيكاً بسيطاً. حيث تترسب فيه السيليكا أو الصفاح البوتاسي أولاً، وبعد ذلك يتغير تركيب المصهور السائل باتجاه نقطة اليوتكتيك (E).

أما الجزء الأيسر من المخطط الذي يحتوي على أقل من (42% SiO_2) فيتميز بوضع أعقد قليلاً.

لندرس الآن تبريد عدد من المصاهير بتراكيب مختلفة:

Scanned by CamScanner

أ – تبريد مصهور (النقطة A في الشكل 13) بتركيب (SiO_2 %15).

عند وصول تبريد المصهور (النقطة A) إلى الدرجة (1590 C°) (النقطة B) يبدأ اللوسيت بالتبلور والإنفصال عن السائل ، ويصبح هذا السائل بالتدريج أغنى بالسيليكا ويتغير تركيبه باتجاه المنحني BI . وعند وصول التبريد إلى الدرجة (1150 C°) فإن اللوسيت الأولي المتشكل لايبقى ثابتاً، وسيتفاعل مع السائل مشكلاً الصفاح البوتاسي، كما أن الصفاح البوتاسي سوف يترسب مباشرة من المصهور السائل بعد هذه الدرجة من الحرارة. ويبقى التركيب في النقطة (النقطةI) ثابتاً حتى يستهلك كامل السائل. والجسم الصلب الناتج سوف يتألف من الصفاح البوتاسي وبقية اللوسيت الفائضة عن التفاعل مع المصهور السائل.

ب – تبريد مصهور بتركيب (SiO_2 %30)

سيأخذ سير التبريد نفس التسلسل السابق تقريباً باثتناء أن اللوسيت سينفذ بكامله في (النقطة I) أثناء تفاعله مع المصهور السائل لإعطاء الصفاح البوتاسي، بينما يتبقى جزء من المصهور السائل فائضاً عن التفاعل. ومع استمرار التبريد سيترسب الصفاح البوتاسي مباشرة من المصهور وسيتغير تركيب هذا الأخير حسب الخط IE للوصول إلى التركيب اليوتكتيكي. والجسم الصلب النهائي سيكون مكوناً من الصفاح البوتاسي والسيليكا، أي أن كل آثار اللوسيت أولي التشكل قد اختفت.

ت – تبريد مصهور أولي بتركيب الصفاح البوتاسي (النقطة D)

يتشكل اللوسيت مع استمرار التبريد،ويتغير تركيب المصهور باتجاه(النقطة I) وعند الوصول إلى (النقطة I) سيتفاعل كل اللوسيت المتشكل مع كامل المصهور السائل، والجسم الصلب النهائي الناتج سيكون مكوناً من الصفاح البوتاسي النقي .

يشار هنا إلى ، إن الناتج النهائي للتبلور في جملة (سيليكا – لوسيت) يخضع لاحتمالين:

الأول – يتكون الناتج النهائي للتبلور من السيليكا والصفاح البوتاسي، إذا كان التركيب الأولي للمصهور الخاضع للتبريد اغنى بالسيليكا مقارنة مع الصفاح البوتاسي.

الثاني – يتكون الناتج النهائي للتبلور من اللوسيت والصفاح البوتاسي إذا كان التركيب الأولي للمصهور الخاضع للتبريد أفقر بالسيليكا مقارنة مع الصفاح البوتاسي (أنظر الشكل 13).

ويكمن الإختلاف الأساسي بين جملتي (سيليكا – لوسيت) و (سيليكا – نيفيلين) في ، أنه تتوفر إمكانية أكبر في جملة (سيليكا – لوسيت) لفصل الفلزات المتشكلة عن المصهور السائل عند عدم الاحتفاظ بحالة التوازن الجملة. علماً أن المناقشة السالفة الذكر لهذه الجملة تفترض وجودها بحالة توازن.

لنفترض الآن ، أن تبريداً يجري لمصهور بتركيب (15% سيليكا)، وأن بلورات اللوسيت تنزع من المصهور خلال تشكلها، فإنه حين هبوط الحرارة حتى (1150 C°) (النقطة I) لايمكن الوصول إلى ناتج نهائي يحتوي اللوسيت وسيغيب هنا الصفاح البوتاسي الناتج عن تفاعل اللوسيت مع المصهور السائل، وسيحل محله الصفاح البوتاسي المتبلور مباشرة من المصهور، وسيتغير تركيب المصهور من النقطة I باتجاه اليوتكتيك E.

ومع الوصول إلى اليوتكتيك سيكون الجسم الصلب مكوناً من مزيج يوتكتيكي. والصلب الناتج عندئذ سيكون في جزء منه غنياً بمزيج من السيليكا والصفاح البوتاسي ، وفي الجزء الآخر سيكون غنياً باللوسيت الذي انتزع و لم يتفاعل مع المصهور السائل. أي سيتشكل نوعان من الصخور بتركيبين مختلفين انطلاقاً من مصهور أولي واحد. وقد تتبلور السيليكا من مصهور غني أصلاً باللوسيت. كما يمكن أن يحفظ اللوسيت المتشكل من مصهور غني بالسيليكا أكثر من الصفاح البوتاسي. وهذه الإحتمالات الآنفة الذكر لامقابل لها في جملة (سيليكا – نيفيلين).

Scanned by CamScanner

4 – 4 – 4 – جملة يوتكتيك مزدوج مع إنصهار تفسخي

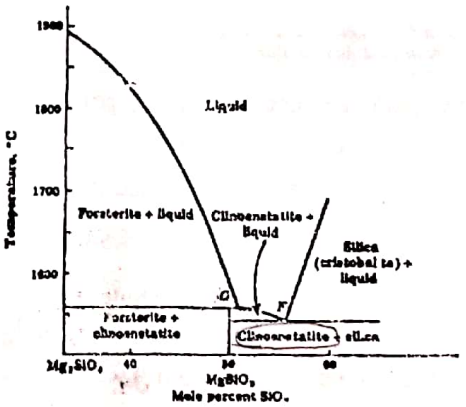
جملة (سيليكا – فورستريت) (2)

تحتل جملة (سيليكا – فورستريت) أهمية خاصة من الناحية البترولوجية. ويكمن الاختلاف بين الجملة الإصطناعية المخبرية والجملة الطبيعية بأن المادة المتوسطة في الجملة الإصطناعية الجافة هي الكلينوإنستاتيت clinoenstatite $MgSiO_3$ بدلاً من الإنستاتيت Mg_2SiO_6 الذي يتشكل باعتباره مادة متوسطة في حالة الصخور الطبيعية غير الجافة (الشكل 14).

إذا بردنا مصهوراً بتركيب (15% SiO_2) مع المحافظة على التوازن فإن الفورستريت سيتبلور من المصهور ، وسيتغير تركيب المصهور وفق المنحني باتجاه النقطة G .وعند النقطة G سيتفاعل الفورستريت المتشكل في المرحلة الإولى مع المصهور عند الدرجة (1557 C°) ليشكل الكلينوإنستاتيت.

أما إذا لم نحافظ على التوازن في الجملة وتم نزع الفورستريت أولي التشكل من الجملة، فإن المصهور الخاضع للتبريد سيتابع سيره وسيتغير المزيج (المصهور المتبقي) باتجاه نقطة اليوتكتيك المكون من (كلينوإنستاتيت – سيليكا) حتى لوكان التركيب الأولي فقيراً جداً بالسيليكا.

ويمكن القول ، أن الصخور الأساسية وفوق الأساسية تظهر تبلوراً مشابهاً في الطبيعة لهذا المثال. فالأوليفين مبكر التشكل في الماغما الأساسية وفوق الأساسية قد لايتمكن من التفاعل كاملاً مع المصهور الماغماتي لتشكيل

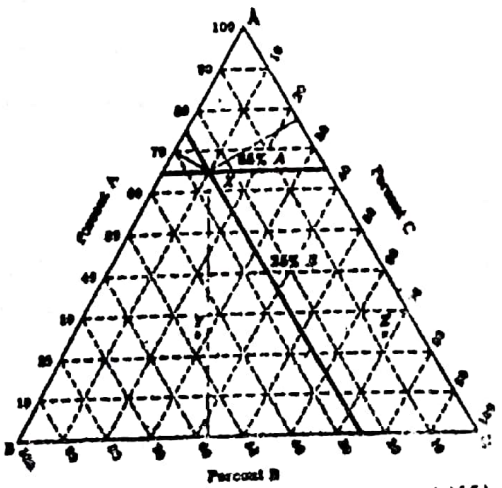


الشكل (14) مخطط درجة الحرارة – تركيب في جملة (سيليكا – فورستريت) .

البيروكسين ، وهذا الشكل تتوفر الإمكانية للإحتفاظ بالأوليفين في صخر مشبع ظاهرياً بالسيليكا. أي أنه بالإمكان مصادفة صبات بازلتية سميكة أو سيالات الدولوريت تحتوي على تجمعات من فلزات الأوليفين في قاعدتها وعلى الكوارتز الذي يملأ الفراغات الصخرية في أجزائها العلوية. كما يمكن أن تحاط بلورات الأوليفين في الصخور البازلتية ببلورات من البيروكسين الدقيقة (مشكلة حواف التفاعل).

4 – 5 – الجمل الثلاثية Ternary Systems

لإظهار النسب المتغيرة لثلاث مواد تحتويها جملة واحدة لابد من استخدام مخطط ثلاثي على شكل مثلث يعكس كل ضلع فيه تغيرات المواد الداخلة في الجملة. وكان العالم بانيكي قداقترح أثناء دراسته للأملاح الكيميائة استخدام المثلث للتعبير عن الجملة التي تضم ثلاث مواد مختلفة . وقد استخدم لهذه الغاية مثلثاً متساوي الأضلاع (الشكل 15).



الشكل (15) استخدام المثلث في التعبير عن الجملة التي تضم ثلاثة مكونات

إستناداً (للشكل 15) يمكن التعبير بدقة عن النسب المختلفة للمواد الثلاث A,B, C التي تدخل في تركيب الجملة الثلاثية . فكل رأس من رؤوس المثلث يمثل

Scanned by CamScanner

نسبة 100% من محتوى إحدى المواد الثلاث، في حين يمثل الضلع المقابل لهذا الرأس نسبة 0 % من محتوى هذه المادة. فاحتواء المادة A مثلاً في الجملة يؤخذ على الخط المقام من الضلع المقابل باتجاه A، وبالمثل ، فإنه للتعبير عن محتوى المادة B في الجملة تؤخذ النسبة المئوية على الخط المقام من الضلع المقابل باتجاه الراس B، وكذلك للتعبير عن محتوى المادة C تؤخذ النسبة المئوية على الخط الواصل بين الضلع المقابل والرأس C. وحين يحدد في مزيج ما محتواه من مادتين فإن محتوى هذا المزيج من المادة الثالثة يمكن أن يحدد بشكل تلقائي.

وهكذا ، فإنه لتمثيل المزيج X(65% A، 25% B، 10% C) ، يرسم خط يمر بالنقاط التي تمثل 65% A، وخطاً ثانياً يمر بالنقاط التي تمثل 25% B، عندها فإن نقطة التقاطع للخطين الأول والثاني تمثل 10% من قيمة المادة C. أي يمكن تمثيل تركيب أي مزيج في الجملة الحاوية على ثلاث مواد مختلفة من عنصر معين بواسطة معرفة نسبة احتواء المزيج من العنصرين الآخرين.

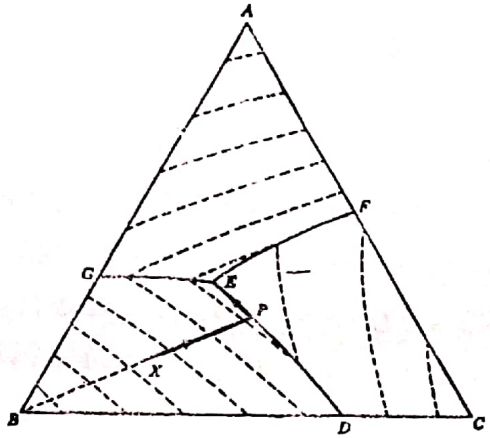
4 – 5 – 1 – تمثيل جملة ثلاثية يوتكتيكية

لنفترض أن المكونات (A، B، C)في (الشكل 15) لاتشكل فيما بينها محاليلاً صلبة وإنما تشكل فيما بينها جملة ثلاثية يوتكتكية، فإنه بالإمكان تمثيل مثل هذه الجملة نظرياً بالمخطط (الشكل 16) . ووفقاً لهذا المخطط فإن كل ضلع من اضلاع المثلث في الشكل يمثل خطاً يوتكتيكياً مزدوجاً.

وأثناء إخضاع الجملة الثلاثية اليوتكتيكية للتبريد يبدأ بالتبلور أحد المكونات أولاً ، ثم يلحق به المكون الثاني ، ثم بعد ذلك ينضم إليهما المكون الثالث.

إذا كان لدينا المزيج X مثلاً، فإن أول المكونات المتبلورة سيكون المركب B، ومع انفصال بلورات هذا الأخير فإن تركيب المصهور سيتغير مبتعداً عن الرأس B مستقراً بالتدريج للمكون B ومغتنياً بالمركبين الآخرين . وحين وصول المصهور

الخاضع للتبريد إلى النقطة P فإن المكون C سيبدأ بالتبلور إلى جانب ما تبقى من المكون B. وعند إنصهاء بلورات المكونين B وC سيتغير تركيب المصهور السائل على طول الخط EP، وحين وصول التركيب إلى النقطة E (نقطة يوتكتيك الجملة الثلاثية) سيبدأ المكون A بالتبلور وسيبقى التركيب ثابتاً في هذه النقطة حتى انتهاء عملية التبلور بشكل كامل.



Hypothetical diagram for a system with a ternary eutectic and three binary eutectics. Dashed lines are temperature contours.

الشكل (16) يمثل جملة ثلاثية يوتكتيكية تحتوي ثلاثة خطوط يوتكتيكية مزدوجة تمثل بين مركبات يوتكتيكية. وتمثل الخطوط المتقطعة خطوط تساوي الحرارة في الجملة الثلاثية.

تسمى الخطوط DE، GE، FE، التي تمثل التبلور المتوافق لمكونين بالخطوط اليوتكتكية Eutectic lins، في حين تدعى النقطة E بنقطة اليوتكتيك الثلاثي Ternary Eutectic.

لنتخيل الآن الحرارة بعداً ثالثاً للمخطط الآنف الذكر ، عندئذ يمكن تمثيل درجات الحرارة بالخطوط المنقطة على الشكل (خطوط التحارر). وهنا يمكن افتراض أن نقطة اليوتكتيك الثلاثي E هي النقطة الدنيا في السطح الحراري Temperature Surface ، في حين تمثل الخطوط اليوتكتيكية الثلاثة وديان السطح الحراري.

Scanned by CamScanner

الفصل الخامس
جيوكيمياء الصخور المتحولة

1 - منشأ وتصنيف الصخور المتحولة

تنشأ الصخور المتحولة نتيجة إعادة تشكل الصخور الأرضية في الحالة الصلبة (دون إنصهارها) في ظروف مناسبة من الضغط والحرارة.

فالتحول التماسي الذي يرتبط انتشاره بكتل الصخور النارية يمكن أن يظهر على السطوح القديمة بالرغم من أن مثل هذا النمط من التحول يظهر في معظم الحالات على أعماق كبيرة من القشرة الأرضية.

وينتسب التحول الإقليمي إلى جميع عمليات إعادة التشكل الصخري التي تجري على نطاق واسع من العمق بدءاً من المناطق القريبة من السطح وحتى المعطف العلوي.

والتغيرات الجارية للصخور في المناطق القريبة من سطح الأرض هي عبارة عن نتيجة لدفن الصخور الرسوبية والنارية وغوصها في باطن الأرض إلى أعماق تقارب واحد كيلومتر. إن مثل هذا التحول (إن جاز التعبير) يتميز بدرجة ضعيفة جداً من التحول ويخضع سطحه في مثل هذه الأحوال إلى عمليات الدياجينيز .

وهناك تغيرات تتعرض لها الصخور تحدثها الحركات التكتونية، أو الحرارة العالية والضغط في الأجزاء السفلية من القشرة الأرضية والمعطف العلوي. وفي الوقت الحاضر فإن نواتج مثل هذا النمط من التحول تظهر على السطح القديم بفضل عمليات التعرية أوحركات النهوض التكتونية .

Scanned by CamScanner

والتحول الصخري يمكن أن يحدث بدون تغير في التركيب الكيميائي الأولي للصخور موضوع التحول Isochemical metamorphism ، أويترافق بتغير كيميائي في الصخور مشروط بفعل حركة المحاليل الكيميائة Allochemical metamorphism

فإذا كان التغير الكيميائي في تركيب الصخور محدوداً بفقدان العناصر الكيميائية الطيارة فإن مثل هذا النوع من التحول يصنف عادة بأنه تحول لايترافق بتغير كيميائي في التركيب . إن مقارنة التركيب الوسطي لصخور الغضار الصفحي مع تركيب الصخور المختلفة الناتجة عن عمليات التحول تقدم الأساس للإعتقاد ، بأنه في معظم الحالات يعد التحول الإقليمي تحولاً لايترافق بتغير كيميائي ، أي أنه عملية متساوية الخواص الكيميائية Isochemical process . إن التغير الوحيد الملموس أثناء تنامي درجة التحول تتمثل في نقصان محتوى المركبات التالية: $CaCO_3$, Fe_2O_3 , H_2O . ونقصان محتوى Fe_2O_3 يعوض عن طريق زيادة في محتوى FeO . وعلى هذا النحو فإن كسب الصخور المعرضة للتحول من الحديد وخسارتها له هي عملية تغيب من الناحية الفعلية . لقد أوضح الباحث M.D.Shaw (1954) ، بأن التحول الإقليمي لايؤثر على تغير التركيب الأولي للعناصر الشائبة . غير أن التركيب النظائري للعناصر ، وبشكل خاص الأوكسجين ، يمكن في غضون ذلك أن يتغير . ويجب الإشارة هنا إلى ، أن ثبات تركيب التشكيلات الكبيرة من الصخور الخاضعة للتحول لاينفي إمكانية هجرة العناصر في حدود هذه التشكيلات .

وعلى نقيض التحول الإقليمي فإن عمليات التحول التماسي تترافق بحدوث عمليات كسب أوفقدان للمواد الكيميائية ، ومثل هذه التغيرات تدعى الإستعاضة Metasomatism . إن شدة عمليات الإستعاضة تتوقف بشكل أساسي على تركيب ونفوذية الصخور . فالتغيرات الهامة الكيميائية يمكنها أن ترتبط بالفروق الكبيرة التي يمكن أن تكون بين تركيب الماغما المنغرسة وتركيب الصخور المحيطة ، إضافة إلى الدور الإيجابي الذي تلعبه في هذا الشأن درجة تحطم الصخور المحيطة .

تجري أشد التغيرات أثناء تحول الصخور الكلسية والمرمر .فبفضل الطبيعة الخاصة للتحول التماسي تسهل عملية البرهان على وجود تغيرات استعاضية في صخور التحول التماسي مقارنة بصخور التحول الإقليمي .

يمكن لأية صخور أولية أن يعاد تشكيلها في عملية التحول : الصخور النارية، والصخور الرسوبية ، وحتى تلك الصخور المتحولة القديمة . ويتغير في غضون ذلك التركيب الفلزي للصخور ، كما يمكن أن تتغير الخصائص المتعلقة ببنية ونسيج هذه الصخور أيضاً . أما في حالة Allochemical metamorphism فإن التركيب الكيميائي الأولي للصخور يتغير أيضاً . وبسبب الإختلاف الكبير في الصخور الأولية واختلاف ظروف إعادة تشكلها والإحتمالات العديدة لتغير تركيبها الفلزي وبنيتها فإنه سيكون من الصعب تصنيف الصخور المتحولة الناتجة . ولكن يمكن إيراد أهم الخصائص المميزة للصخور المتحولة الأكثر إنتشاراً في الطبيعة كما هو واضح في الجدول (5) .

إن الإردواز والغضار الصفحي المتبلور والغنيس إضافة إلى الصخور المتقرنة — هي صخور متحولة تتميز بخصائص بنيوية ونسيجية متميزة ، أما الصخور المتحولة الأخرى الواردة في الجدول (5) فتتميز بشكل أساسي بتركيبها الفلزي .

ويتضح من الجدول المذكور أيضاً ، أن بنية غالبية الصخور المتحولة هي بنية خشنة نموذجية ، يستثنى من ذلك صخور الإردواز والصخور المتقرنة وصخور السربنتين .

أما بالنسبة لنسيج الصخور المتحولة ، فإنه يمكن القول ، بأن الصخور المتحولة تظهر نسيجاً شريطياً (أي أن الفلزات المكونة للصخر المتحول تتجه وفق شرائط متوازية) ، أونسيجاً كتلياً (غير شريطي) . فالصخور ذات النسيج الشريطي يمكنها أن تتألف من رقائق فلزية مختلفة التركيب (النسيج الغنيسي) ، أوأنها تمتلك توجهاً

Scanned by CamScanner

غالباً للفلزات الصفائحية (النسيج الصفائحي) ، أوالها تمتلك تشققات موجهة (نسيج تشققي) (الجدول 5).

الصخور الأولية	البنية والنسيج	الفلزات النموذجية	الصخر المتحول
صخور بيليتية	حبيبية دقيقة مع إنفصام واضح (نسيج تشققي)	موسكوفيت ، كلوريت ، كوارتز	الإردواز
صخور بيليتية، أساسية، كلسية	خشنة الحبيبات والنسيج صفحي	ميكا، أمفيبول، كلوريت، كوارتز	غضاريات صفحية متبلورة
صخور متنوعة	حبيبية خشنة مع نسيج شريطي	كوارتز،صفاح، بيوتيت،هورنبلاند	غنيس
صخور بيليتية، أساسية، كلسية	دقيقة الحبيبات مع نسيج كتلي	كوارتز،ميكا،صفاح أمفيبول، بيروكسين	صخور متقرنة
صخور كوارتزية صفاحية	حبيبية خشنة مع نسيج كتلي	كوارتز	كوارتزيت
كلسية ، أساسية	حبيبية خشنة مع نسيج شريطي أوصفحي	أمفيبول ، بلاجوكلاز	أمفيبوليت
صخور مغنيزية	حبيبية دقيقة مع نسيج كتلي	سربنتين	سربنتينيت
صخور كوارتزية صفاحية	حبيبية خشنة مع نسيج شريطي ضعيف	كوارتز ، صفاح	غرانوليت
صخور أساسية	حبيبية خشنة مع نسيج كتلي	غرانات، أومفاسيت	إكلوجيت

الجدول (5)

أكثر الصخورالمتحولة إنتشاراً في الطبيعة

وهكذا ، يمكن لنا أن نميز من بين الصخور المتحولة المنتشرة على سطح الأرض خمس مجموعات هي :

أ – الصخور البيليتية المشكلة من صخور رسوبية غضارية

ب – الصخور الكوارتزية ـ الصفاحية المشكلة من الصخور الرملية والصخور النارية الحامضية

ج – الصخور الكلسية المشكلة من الكلس والدولوميت

د – الصخور الأساسية المشكلة من صخور نارية أساسية

و ـ الصخور المغنيزية المشكلة من صخور نارية فوق أساسية .

2 – عوامل التحول

إن النتيجة الطبيعية لتحول صخور أولية واحدة تتعلق بمجموعة من العوامل المستغيرة مثل ، الحرارة ، وضغط الحمولة ، وضغط الموائع ، إضافة إلى عامل الزمن . وسيعالج كل من هذه العوامل بنفس الترتيب .

2.1 ـ عامل الحرارة

تعتبر الحرارة من أهم العوامل في عملية تحول الصخور. وارتفاع الحرارة التي تخضع لها الصخور في عملية التحول يمكن أن يعود إلى مجموعة من الأسباب .

أ – وجود الماغما

ب – غوص الرسوبات باتجاه الأعماق

ج – التيارات الحرارية العالية المحلية المرتبطة بعمليات التحلل الإشعاعي للعناصر المشعة

د – الاحتكاك التكتوني

و– دارات تيارات الحملان والناقلية الحرارية للمعطف.

وإذا لم تؤخذ بعين الاعتبار زيادة الحرارة المرتبطة بزيادة الضغط، فإن الحرارة الدنيا اللازمة لإجراء تفاعلات التحول (يجب تمييز هذه التفاعلات عن تلك التفاعلات التي يمكن أن تجري وسط الرسوبات المتراكمة) تعادل (150 درجة مئوية) . أما الحد الأعلى لحرارة التحول فهو تلك الحرارة التي يحدث فيها انصهار شديد

Scanned by CamScanner

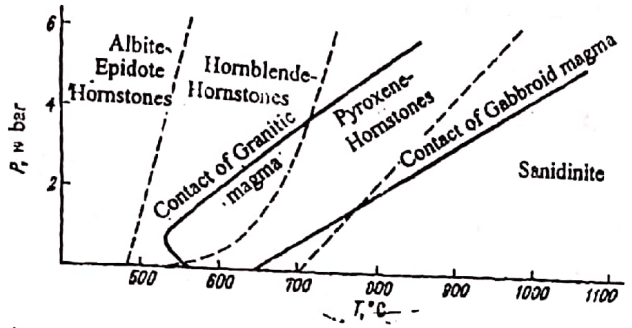
للصخور المتحولة . وأصبح مفهوماً ، أنه بالنسبة للصخور المختلفة التي يمكن أن تخضع لضغوط مختلفة فإن مدلول الحدود الحرارية في عمليات التحول سيكون مختلفاً . وبشكل وسطي فإن الحد الأعلى لحرارة عمليات التحول تعادل (900 درجة مئوية) . وبشكل أساسي فإن عمليات التحول تجري على مايبدو في فاصل من الحرارة يمتد (من 300 إلى 800 C).

وتشير كميات التيارات الحرارية للقارات والمحيطات ، بأن الحرارة على حدود القشرة والمعطف تتراوح (من 200 درجة مئوية تحت بعض أجزاء المحيطات إلى 1000 درجة مئوية تحت الأجزاء الأكثر سماكة من القشرة القارية). وبالنسبة لكل من هذه الأعماق فإنه من الواضح وجود تقلبات هامة للحرارة بالاتجاه الأفقي . وهكذا ، فإن الحرارة على حدود فاصل موهو تحت التضاريس المحيطية المركزية المتميزة بحجم كبير من التيارات الحرارية هي أعلى من الحرارة تحت الأجزاء الأخرى من المحيط على نفس الأعماق . وإثر الاختلافات الكبيرة في حجم التيارالحراري بين مناطق تكتونية مختلفة ، فإن الحرارة المنخفضة للتحول الإقليمي يمكن أن تتواجد ليس على أعماق قليلة وإنما على أعماق كبيرة في الحدود السفلى للقشرة المحيطية . وتتميز القشرة القارية السفلية والمعطف العلوي بدرجات عالية من الحرارة . فالإنغراسات قرب السطحية للماغما البازلتية يمكنها رفع حرارة الصخور المحيطة حتى (700 درجة مئوية) ، كما ترفع إنغراسات الماغما الغرانيتية حرارة الصخور المحيطة حتى (550 درجة مئوية) (أنظر الشكل 28) . وتنخفض درجة الحرارة بسرعة مع الابتعاد عن حدود تماس الماغما المندسة مع الصخور المحيطة . وعلى أعماق كبيرة تكون الحرارة الأولية للصخور أعلى، ولهذا تتشكل هنا نطاقات واسعة للتحول التماسي . ويمكن للتحول التماسي تحت أعماق محددة أن يتلاقى مع التحول الإقليمي .

2.2 – الضغط

هناك أشكال مختلة للضغط . ولكن أكثرها تأثيراً في عمليات التحول هو ضغط الطبقات الصخرية الواقعة في الأعلى (الضغط الإيزوستاتيكي للحمولة) . فمع زيادة العمق (في حال الكثافة العادية للصخور) فإن الضغط يزداد بوتيرة (275 بار/كم) .

وضغط الحمولة المحتمل على حدود فاصل موهو يتراوح (بين 2 كيلو بار في مناطق القشرة المحيطية وحتى 10 كيلوبار في المناطق القارية) . وتشير الحسابات التي جرت للضغط الإيزوستاتيكي Isostatic pressure في التحول الإقليمي بأنه يقع ضمن الحدود المشار إليها .



الشكل (28) يمثل الحرارة العظمى (الخط القائم الكثيف) لصخور رطبة محيطة (أي صخور مسامية تحتوي على ماء من مختلف المصادر) في تماس مباشر مع إندساسات غرانيتية وغابروية حسب D.W.Hyndman (1972) . لقد اعتمدت الافتراضات التالية : يتم النقل الحراري على حساب الناقلية الحرارية (تهمل حرارة الموائع المهاجرة) . تشكل الماغما المندسة 100٪ من الصهارة ، والتدرج الحراري يعادل (20 درجة \ كم) . وتمثل الخطوط المنقطة في الشكل حدود أربع سحنات للتحول التماسي . ويبدو واضحاً ، أن درجة التحول تتعلق بنمط الماغما ، وبعمق الإندساس الماغماتي . وهكذا ، فإن سحنة الصخور البيروكسينية المتقرنة لظهر فقط عند التماس مع الغرانيت ، عندما يتواجد الإندساس على عمق لايقل عن 15 كم (الضغط يعادل هنا ٤ كيلو بار) .

والتحول التماسي يمكنه أن يظهر في أي ضغط للحمولة بدءاً من السطح وحتى تلك الأعماق التي يكون فيها من الصعب فصل التحول التماسي عن التحول الإقليمي. إن ضغط الحمولة هو ضغط هيدروستاتيكي Hydrostatic pressure ، غير أنه يمكن أن يترافق مع ضغط موجه . ولكن يبدو أن ضغط الحمولة لايؤثر من الناحية العملية على التركيب الفلزي النهائي للصخور . غير أن مثل هذا الضغط يمكن أن يقوم بدور الدفعة الأولى (الحافز) لبدء تفاعلات التحول وتسريعها عن طريق زيادة مساحة

Scanned by CamScanner

مسطوح التماس الحبيبية ، ونفوذية الصخر وحركة المحاليل . كما أنه يلعب دوراً هاماً في تطوير النسيج الشريطي وغيره من الخصائص الأخرى للنسيج والبنية .

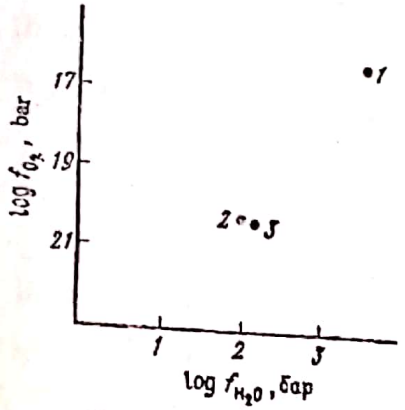
3.2 ضغط الموائع

يتواجد الطور السائل كما هي العادة في مجرى تفاعلات التحول. وضغط الموائع يمكن أن يكون أكبر، أو معادلاً أو أقل من الضغط الإيزوستاتيكي. (يشار هنا إلى أنه في حال اختلاف ضغط الموائع عن الضغط الإيزوستاتيكي فإن قاعدة الأطوار تصبح على النحو التالي: $F=C+3-P$ لوجود نوعين من الضغط).

ويتحدد ضغط الموائع بالقرب من سطح الأرض في التشققات المفتوحة بارتفاع عمود السائل في هذه التشققات وكثافته. و في تلك الحالات التي تتحرر فيها سوائل أثناء عمليات التحول في ظروف ضعف في تشققات الصخور فإن ضغط الموائع يمكن أن يتحول إلى ضغط إيزوستاتيكي. وفي معظم الحالات فإن ضغط الموائع يبدو معادلاً أو أقل من الضغط الإيزوستاتيكي، والموائع تتألف بالدرجة الأولى من الماء. وهكذا فإن درجة تحرر الماء Fugitive H_2O تشكل مقياساً هاماً لتفاعلات التحول. فأثناء تحول الصخور الكربوناتية فإن تحرر CO_2 يحظى بأهمية كبيرة (انظر الشكل 4). وإذا وجد في تركيب السائل كل من H_2O و CO_2 فإن الحرارة لتفاعل محدد تتعلق نسبياً بمحتوى هذين المركبين.

والمركب الآخر في الطور السائل الذي يمكن أن يلعب دوراً هاماً أيضاً في هذا الشأن هو الأكسجين. فتحرر الأوكسجين Fugitive O_2 وحتى عندما يكون بكمية غير كبيرة يشكل أهمية للصخور التي يغيب فيها الطور السائل . ومدلول تحرر الأوكسجين يكون كبيراً بشكل خاص بالنسبة للصخور المترافقة بوجود كمية كبيرة من الحديد. فدرجة التحرر العالية من الأوكسجين تستدعي تشكل فلزات مثل، الماغنيتيت والإيبدوت، اللذين يترافقان بأشكال مغنيزية مختلفة للسيليكات الحديدية –

المغنيزية وبخاصة البيوتيت. أما الأشكال الحديدية الأخرى من الفلزات فتتبع درجات تحرر ضعيفة من الأوكسجين.



الشكل (29) حرارة التبلور النهائي والحجوم الوسطية لتحرر الأوكسجين $f O_2$ وتحرر الماء $f H_2O$ بالنسبة لثلاثة صخور غرانيتية مختلفة في حقل بغماتيت كولورادو. إن قيم الحرارة وقيم $f O_2$ أخذت من التحاليل الكيميالية لفلزات الماغنيتيت والإلمنيت ، أما قيم $f H_2O$ فأخذت من التحاليل الكيميالية للبيوتيت . وتبين هذه المعطيات بأن إحدى مجموعات الغرانيت (1) قد تشكلت من ماغما مرتفعة الحرارة وجافة نسبياً ، في حين أن المجموعتين الأخريتين عالتا من عملية إعادة تبلور في ظروف جافة للغاية وفي درجات منخفضة من الحرارة . حسب معطيات (1972) I.H.Puffer.

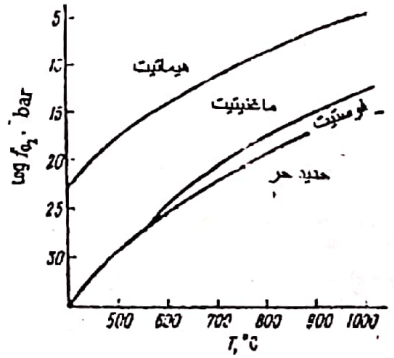
1- Granite of Rosalie,682 °C
2- Granodiorite of Evans, 528 °C
3-Granite of Indian Greek, 528 °C

ويمكن استخدام التحاليل الكيميائية للفلزات الحاوية على الحديد من أجل حساب كمية الأوكسجين المتحررة التي كانت تتواجد في أثناء تشكل هذه الفلزات (الشكل 29). إن أهم موشرات تحرر الأوكسجين يمكن أن يكون تشكل أكاسيد الحديد الموجودة في الصخور المتحولة. وهكذا، فإن الهيماتيت يشير بوجوده إلى درجة عالية من تحرر الأوكسجين fugitive O_2 (fo_2). فإذا حدث تطور في تشكل الماغنيتيت مرافق للهيماتيت، فإنه بالإمكان تحديد حجم fo_2 لكل درجة من درجات التحول (إن ضغط الحمولة لا يؤثر إلا قليلاً على حالة التوازن الموضحة في الشكل 30). وبالرغم من أن H_2O و CO_2 يشكلان في معظم الحالات مركبين متحركين

Scanned by CamScanner

فـإن الأوكسجين يبدو أنه ينتسب إلى المركبات غير المتحركة، وأن كمية fO_2 تتحدد بتركيب الصخور الخاضعة للتحول.

إن وجود أو غياب المواد الحاوية على الكربون في الصخور الخاضعة للتحول يلعب دوراً هاماً، ذلك أنه يؤثر على fO_2 و fCO_2. وفي مثل هذه الحال من الممكن أن يحدث تشكل غازات أخرى إضافية بما فيها CH_4، لتصبح جزءاً من الطور السائل. إن نقصان نسبة Fe_2O_3/FeO مع ارتفاع درجة التحول المنوه عنها آنفاً يحدث على مايبدو إثر التفاعلات التي يستهلك فيها الأوكسجين، وبشكل خاص تلك التي تجري بمشاركة المواد العضوية.



الشكل (30) منحنيات التوازن لبعض المجموعات الفلزية مع الأوكسجين. فإذا تواجد أي زوج من الفلزات مثل الماغنيتيت والهيماتيت، فإنه في مجرى التفاعل :
$6Fe_2O_3 = 4Fe_3O_4 + O_2$ **يشكل سبباً لتحرر الأوكسجين. إن قيم fO_2 في عملية التحول تتوضع بشكل أساسي في حقل الماغنيتيت، أوكسيد الحديد الأوسع إنتشاراً في الصخور المتحولة.**

4.2. الزمن

عند استعادة عمليات التحول ودراستها فإن من أكثر الأمور تعقيداً في هذا الشأن هو تقدير عامل الزمن ودوره. ويتمثل التعقيد في هذا المجال في تحديد ما يلي:

أ- استمرارية هذه العمليات أو تلك

ب- تتابع عملية التشكل الصخري

ج- العلاقة الزمنية مع الصخور النارية المرافقة للتحول وانتشارها

إن قيم العمر المطلق للتراكيب المتحولة تعكس الأحداث المختلفة في تطورها المعقد. فبعض الأرقام يعود إلى زمن تشكل الصخور النارية الأولية، أو الصخور ذات درجة التحول العالية التي خضعت لعمليات تحول متأخرة وبدرجات ضعيفة. بينما تؤرخ الأرقام الأخرى عمليات التحول الرئيسية. وأخيراً، فإن هناك أرقام تؤرخ زمن المراحل المتأخرة للتحول، أي عند الانخفاض الكبير للحرارة لدرجة أن الأرغون والسترونسيوم يبدوان معزولين. وفي معظم الحالات فإن الصخور المتحولة هي نتاج مجموعة من أحداث التحول التي تحدد تطوراً معقداً، وتحمل ملامح مشوشة في توزع تأريخ النشاط الإشعاعي. ورغم ذلك، تتوفر الإمكانية أحياناً للوقوف بشكل صحيح على تاريخ تشكل نطاقات التحول، إذ أمكن بمزيد من الحذر استخدام طرق مختلفة للتأريخ الإشعاعي (استخدام الطرق الإشعاعية) إضافة إلى الطرق الستراتيغرافية وغيرها من الطرائق الجيولوجية لتحديد العمر النسبي.

3- التمنطق التحولي وسحنات التحول

ترتبط أولى الخطوات في دراسة الصخور المتحولة بتحديد تمنطق التركيب الفلزي في حدود الكتل الكبيرة منها. فقد اكتشفت نطاقات التحول كما في صخور التحول التماسي كذلك الأمر في صخور التحول الإقليمي. لقد أمكن تتبع تمنطق التحول الإقليمي للصخور البيليتية في منطقة جبلية اسكتلندية. وتبين أن كل نطاق، بدءاً من الصخور غير المتحولة يتميز بظهور فلز محدد (الفلز الدليل). وسرعان ما تم اكتشاف مثل هذه النطاقات في صخور مشابهة لمناطق أخرى. وأصبح من المعروف في الوقت الحاضر عدد من نطاقات التحول مثل :

أ- نطاق كلوريتي

ب-نطاق بيوتيتي

ج-نطاق غرانيتي

Scanned by CamScanner