



DIRECTOR,

Academia Română
Institutul de Geodinamică "Sabba S. Ștefănescu"
Laboratorul Dinamica Globului Terestru

Dr. Crișan DEMETRESCU
Membru corespondent al Academiei Române

Str. Jean-Louis Calderon, Nr. 19-21, București-37, România, R-020032,
fax:(4021) 317.2120, tel. (4021) 317.2126; e-mail: inst_geodin@geodin.ro
<http://www.geodin.ro/~prezentare/>



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice
Axa prioritară 2: Competitivitate prin Cercetare, Dezvoltare Tehnologică și Inovare
Operațiunea: O.2.1.2 „Proiecte CD de înalt nivel științific la care vor participa specialiști din străinătate”

Proiect: Infrastructură cibernetică pentru studii geodinamice relaționate cu zona seismogenă Vrancea: ID-593, cod SMIS-CSNR 12499

Etapă 3: Construirea unor modele geodinamice tridimensionale de înaltă rezoluție cu ajutorul sistemului HPCC/HPVC/GeoWall. Rularea modelelor tridimensionale și validarea

Perioada: 18 iunie 2012 - 17 octombrie 2013

STUDIU

PRIVIND RULAREA/VIZUALIZAREA/VALIDAREA MODELELOR NUMERICE 3D DE CONVECTIE IN MANTA SI DE DEFORMARE LITOSFERICA.

Director de proiect,

Dr. Vlad Constantin Manea

A U T O R I :

Dr. Vlad Constantin Manea

Dr. Marina Manea

Drd. Mihai Pomeran

CUPRINS:

1. Introducere	1
2. Delaminarea litosferica prin impactul cu o anomalie termo-chimica	2
2.1. Ipoteza de baza	2
2.2. Modelul initial	3
2.3. Rezultatele modelarii numerice	5
2.4. Concluzii	9
2.5. Referinte bibliografice	10
3. Subductia unei placi oceanice urmata de coliziune continentală	11
3.1. Ipoteza de baza	11
3.2. Modelul initial	12
3.3. Rezultatele modelarii numerice	14
3.4. Concluzii	18
3.5. Referinte bibliografice	19
4. Coliziune continentală urmata de rupere de placa (sau slab break-off)	20
4.1. Ipoteza de baza	20
4.2. Modelul initial	22
4.3. Rezultatele modelarii numerice	24
4.4. Concluzii	28
4.5. Referinte bibliografice	29
5. Instabilitate gravitatională	30
5.1. Ipoteza de baza	30
5.2. Modelul initial	31
5.3. Rezultatele modelarii numerice	33
5.4. Concluzii	36
5.5. Referinte bibliografice	37

Anexa 1 (*Detalii privind rulajele efectuate pe infrastructura cibernetica pentru realizarea modelelor numerice de simulare a diverse scenarii geodinamice*)

1. INTRODUCERE

Scopul principal al proiectului CYBERDYN este construirea unei infrastructuri cibernetice in cadrul Institutului de Geodinamica al Academiei Romane pentru studierea evolutiei geodinamice pe termen lung a zonei seismogene active Vrancea. Aceasta infrastructura cibernetica este formata dintr-un HPCC (High Performance Computing Cluster – Grup de Servere pentru Calcule de Inalta Performanta), un HPVC (High Performance Visualization Cluster – Grup de Servere pentru Vizualizare de Inalta Performanta) si un sistem de Vizualizare Stereo in 3D (GeoWall).

Noua infrastructura cibernetica va ajuta la crearea unui corp de cercetatori format din experti cu inalta pregatire obtinuti prin antrenarea tinerilor oameni de stiinta in campul geodinamicii computationale, permitand generarea primului centru de excelenta in domeniu din Romania. Activitatea acestui centru de excelenta se va extinde si dupa finalizarea ultimei etape a proiectului prin formarea tinerilor specialisti si prin participarea in proiecte nationale/internationale bazata pe capacitatea si performanta oferite de o asemenea tehnologie.

In aceasta ultima faza a proiectului grupul de cercetare CyberDyn s-a concentrat pe rularea/vizualizarea si validarea a trei modele numerice care au fost prevazute initial in cererea de finantare. Adicional, s-a inclus in acest studiu un model suplimentar de instabilitate gravitacionala, acesta fiind prevazut ulterior printr-un act aditional incheiat la sfarsitul anului 2012. Ca atare, acest studiu prezinta rezultatele modelarii numerice a patru (4) scenarii diferite dupa cum urmeaza:

- a) - Delaminare litosferica prin impactul cu o anomalie termo-chimica;
- b) - Subductia unei placi oceanice urmata de coliziune continentală.
- c) – Coliziune continentală urmata de rupere de placa (sau slab break-off);
- d) - Instabilitate gravitacionala.

Pentru o mai usoara citire, aceste trei capitole sunt organizate dupa cum urmeaza, in cinci subcapitole: 1) Ipoteza de baza; 2) Modelul initial; 3) Rezultatele modelarii numerice; 4) Concluzii; 5) Referinte bibliografice.

Mai jos sunt prezentate rezultatele preliminare aferente modelarii numerice 3D a acestor scenarii geodinamice. Acestea au fost selectionate dintr-un numar mare de rulaje realizate pe sistemul HPCC CyberDyn, in urma vizualizarii cu atentie a rezultatelor. Tinem sa mentionam ca aceste rezultate nu sunt inca publicate, si ca urmare descrierea cu un grad sporit de detaliu a rezultatelor nu este posibila in acest moment. Publicarea in reviste internationale de specialitate se va face in urmatoarea perioada. Cu toate acestea o descriere cu grad mediu de detaliere a rezultatelor este prezentata mai jos.

2. DELAMINAREA LITOSFERICA PRIN IMPACTUL CU O ANOMALIE TERMO-CHIMICA

2.1. IPOTEZA DE BAZA

Au fost propuse mai multe studii geodinamice cu scopul de a explica starea de eforturi observata in zona Vrancea, si anume: o placa inca atasata de partea superioara a crustei continentale (Girbacea and Frish, 1998; Wortel and Spakman, 2000), delaminarea contientala (Knapp et al., 2005), deshidratarea rocilor la adancime mare (Ismail-Zadeh et al., 2000), sau jonctiune tripla instabila (Besutiu et al., 2001). Una dintre ipotezele privind originea zonei seismogene Vrancea, propusa si in cererea de finantare a proiectului CyberDyn, este aceea a delaminarii litosferice (Knapp et al., 2005). In acest studiu s-a pornit de la ideea ca aceasta delaminare litosferica este posibil sa se produca, ca urmare a unui impact intre o anomalie termica (sau termo-chimica) cu litosfera in regiunea in care cele trei blocuri litosferice cu grosimi diferite se intalnesc in zona Vrancea. Aceasta situatie particulara ar duce la localizarea delaminarii in regiunea Vrancea (Figura 1).

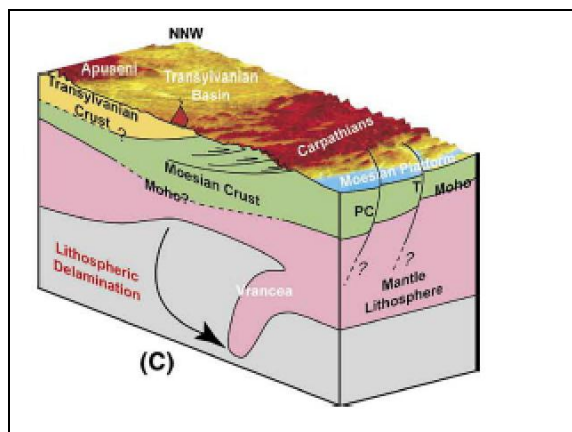


Figura 1. Scenariu de delaminare litosferica ca origine geodinamica a zonei seismogene Vrancea propus de Knapp et al. (2005).

2.2. MODELUL INITIAL

Folosind pachetul de elemente finite CitcomS.py Version 3.0.1 (Tan et al., 2006), pus la dispozitie de catre Infrastructure for Geodynamics (CIG) (<http://geodynamics.org>), s-a construit un model numeric ce incorporeaza scenariul de reconstructie tectonica descris mai sus. In plus, pentru a se putea studia mai in detaliu impactul dintre anomalie si litosfera, s-a utilizat modulul de trasori special dezvoltat de catre cercetatorii din grupul CyberDyn (Manea et al., 2012). Calculele numerice s-au efectuat intr-o regiune sferica (θ , φ , r), unde θ reprezinta latitudinea, φ longitudinea si r raza terestra (Figura 2). Adancimea modelului este de 1900 km, iar in latitudine si longitudine modelul se extinde 28° . Acest model este impartit in 256 de elemente in latitudine si longitudine, si 129 de elemente in adancime, astfel incat elementele finite aferente acestui model au dimensiunile de $12 \times 12 \times 12$ km. Primul set de modele, care a fost efectuat, a presupus o grosime uniforma a placii superioare de 100 de km. Un al doilea set de modele este reprezentat de o setare in care exista diferente mari de grosime intre trei compartimente litosferice, la intersectia lor fiind localizata zona Vrancea. S-a incercat folosirea unor grosimi litosferice cat mai apropiate de realitate. Cele trei compartimente litosferice au urmatoarele grosimi (conform izotermei de 1250°C): Placa Intra-Alpina – 90km, Placa Moesica – 180 km si Placa Est-Europeana – 140 km (Stanica et al., 2006). Anomalia termochimica are urmatoarele caracteristici: este centrata pe punctul de intersectie dintre cele trei mari unitati tectonice din zona Vrancea; are un diametru initial de 400km, un exces de temperatura initial de $+200^\circ\text{C}$, si un deficit de densitate initiala de -30 kg/m³ (Figura 1). Rezultatele modelarii numerice au confirmat ipoteza noastra, iar rezultatele modelarii numerice sunt prezentate in figurile ce urmeaza.

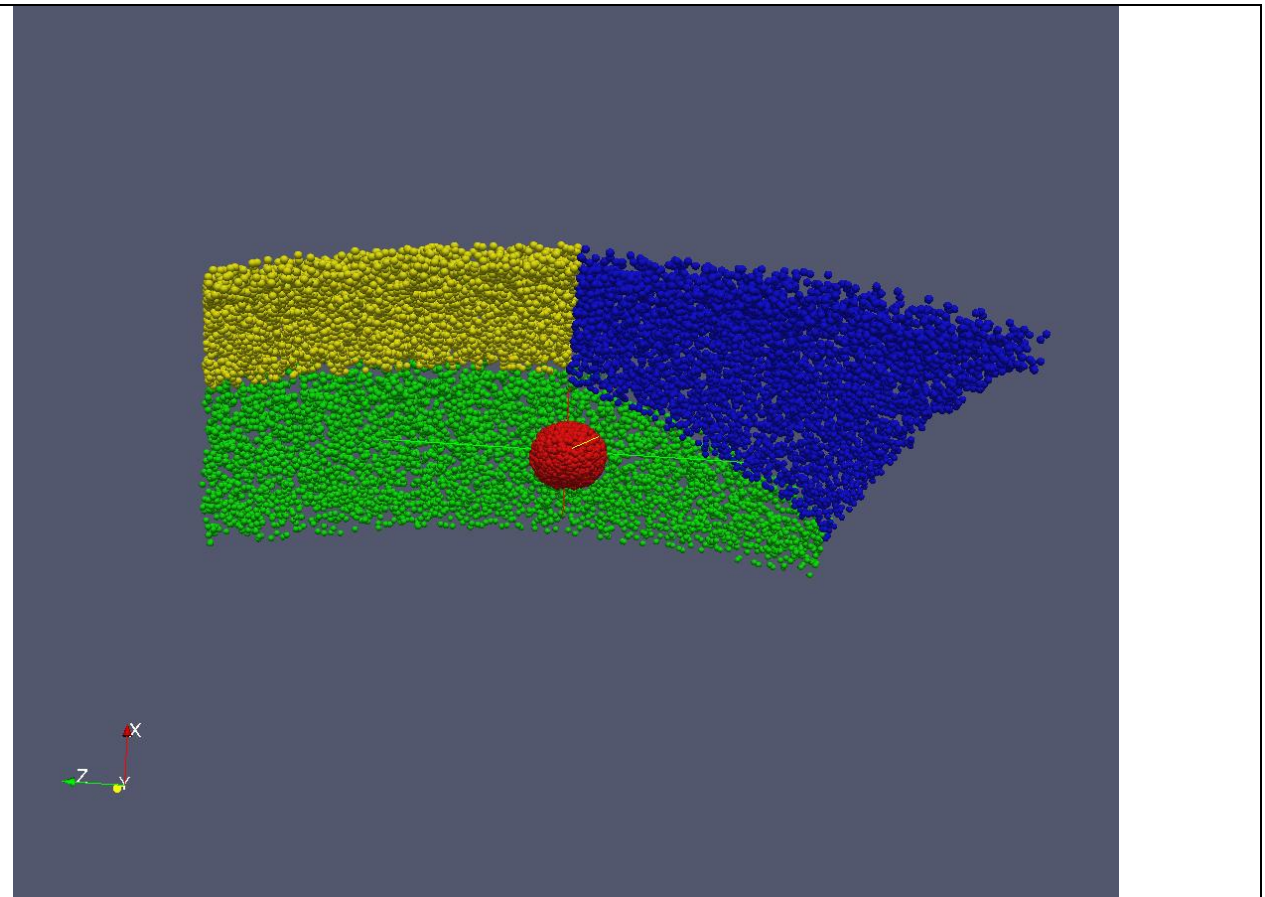


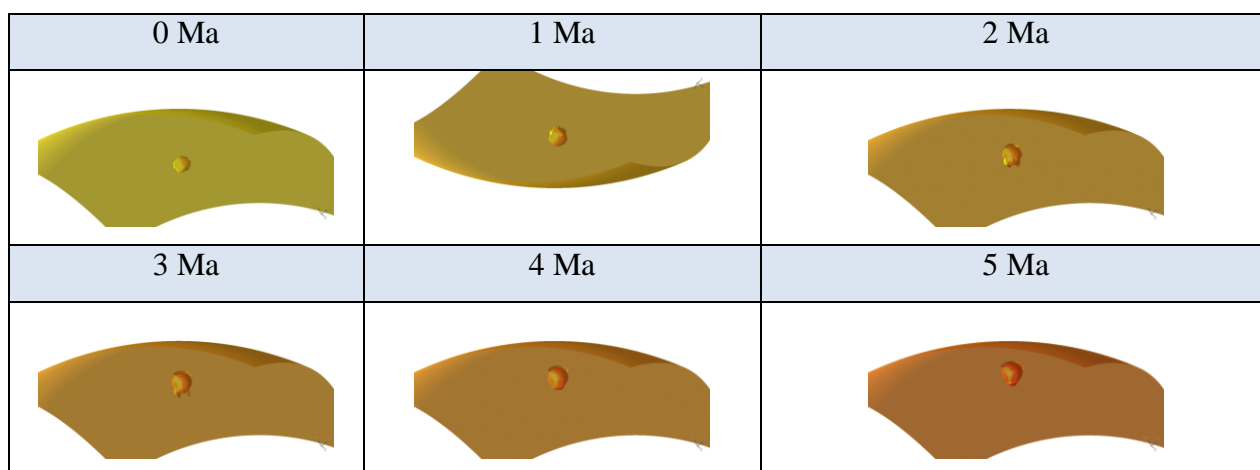
Figura 2: Modelul initial de la care s-a pornit. Sfera cu particule de culoare rosie reprezinta anomalia termo-chimica care se afla initial la o adancime de 400 km. Cele trei compartimente litosferice sunt reprezentate prin particule (trasori) de diverse culori dupa cum urmeaza: galben – Placa Intra-Alpina, albastru - Placa Est-Europeana si verde – Placa Moesica. In modelul cu litosfera de grosime constanta, cele trei compartimente sunt considerate identice.

2.3. REZULTATELE MODELARII

Datorita diferentei de densitate dintre manta si anomalia termo-chimica, aceasta din urma se propaga prin mantaua superioara pana intalneste baza litosferei din zona Vrancea. Mai jos, prezentam rezultatele modelarii numerice pentru doua seturi de modele: 1) grosimea litosferei constanta (100 km); 2) grosimea litosferei variabila si anume: Placa Intra-Alpina – 90km, Placa Moesica – 180 km si Placa Est-Europeana – 140km.

2.3.1. Grosimea litosferei constanta (100 km).

Rezultatele acestor modele sunt prezentate mai jos in forma condensata si centralizata ca o serie de timp in care se poate vizualiza evolutia anomaliei termochimice in timp si spatiu. Aceasta anomalie este reprezentata grafic ca o serie de izosuprafete de temperatura constanta. Pentru vizualizare s-a utilizat soft-ul liber OpenDX (www.opendx.org). Dupa cum se poate observa in Figura 3 impactul dintre anomalia termo-chimica si cele trei compartimente litosferice a dus la o deformare a anomaliei, aceasta evoluand de la o forma sferica initiala la o forma de disc. Acest lucru se datoreaza faptului ca vascozitatea litosferei continentale este cu mult mai mare decat cea a mantalei superioare datorita temperaturii reduse ($T < 1250^{\circ}\text{C}$). Practic, vascozitatea litosferei este de 100 de ori mai ridicata decat cea a mantalei superioare. Unul dintre procesele importante asociate cu impactul litosferic este formarea unei zone de delaminare litosferica de forma circulara. Fenomenul de delaminare incepe dupa ~10 Ma de la impactul anomaliei cu litosfera continentală. Acest proces continua, formandu-se o zona tubulara de delaminare dupa ~17 Ma. Acest rezultat nu este consistent cu observatiile din zona Vrancea in care zona seismogena este concentrata numai pe o parte, intr-o regiune restransa. Urmatorul set de modele numerice considera aceeasi anomalie termo-chimica, schimbandu-se doar morfologia litosferei continentale.



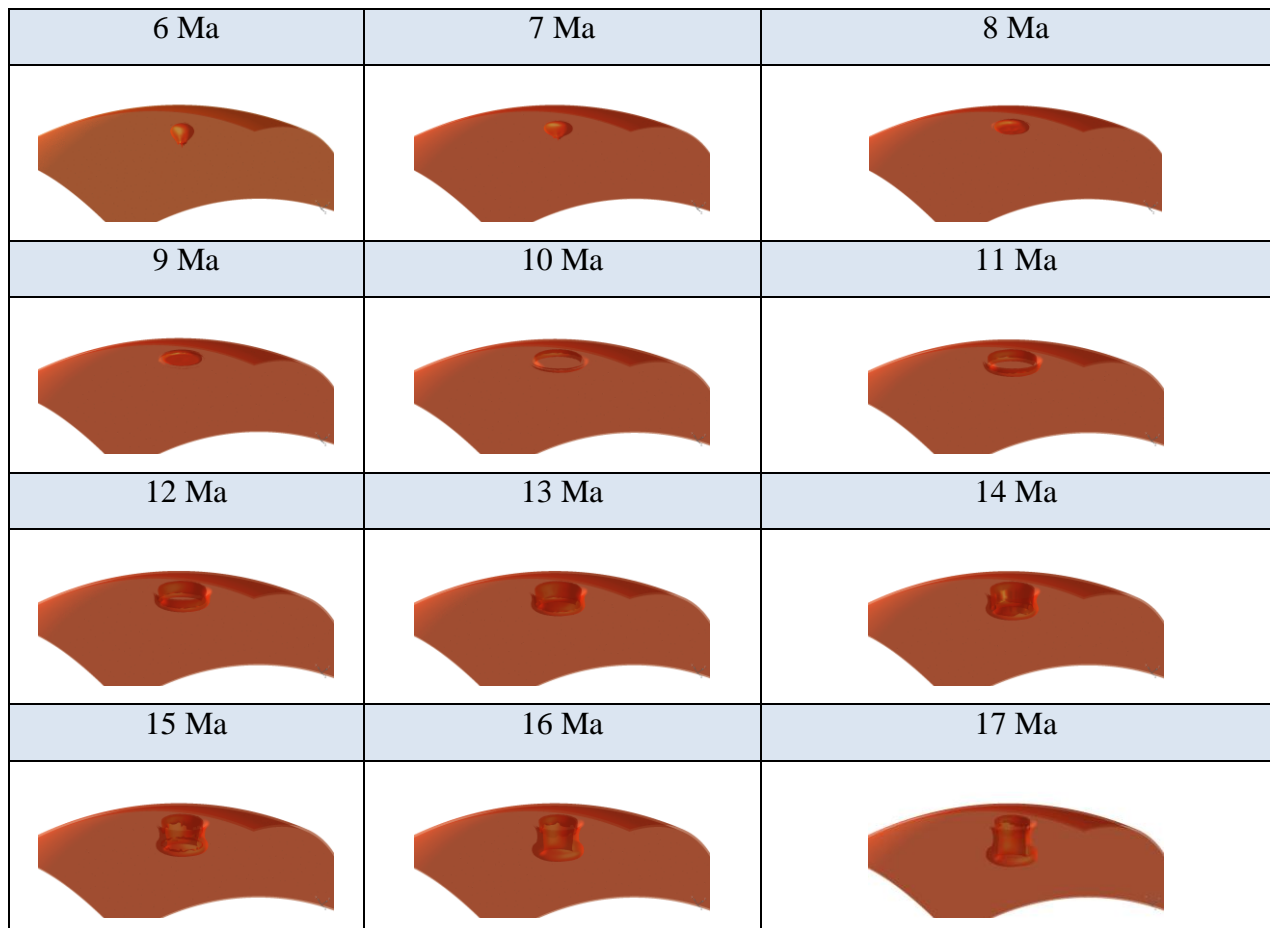
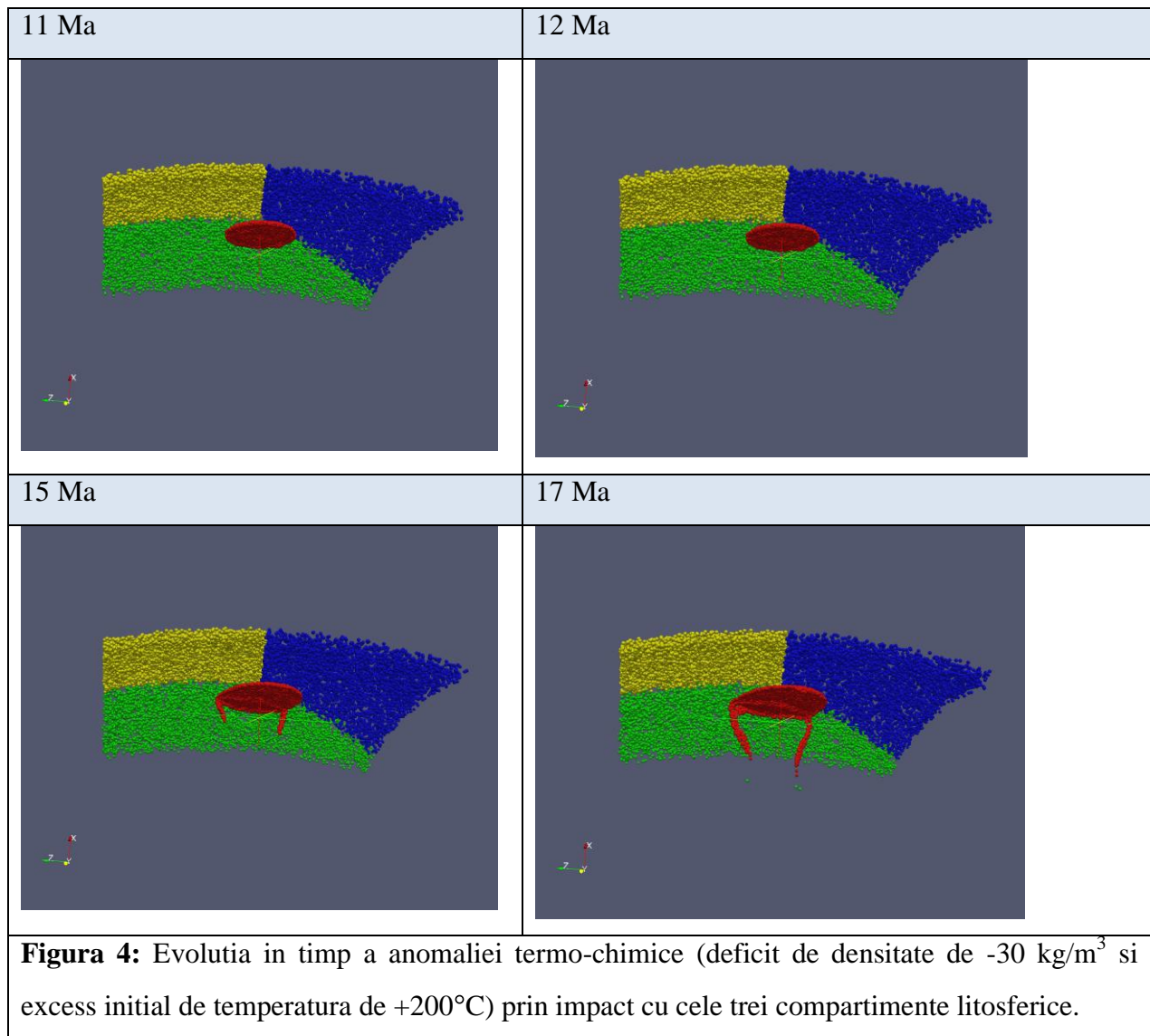


Figura 3: Evolutia in timp a anomaliei termo-chimice reprezentata ca izosuprafete de temperatura. In acest model, litosfera are grosime uniforma (100 km). A se observa ca in acest caz, delaminarea are loc pe o zona (panza) circulara/cilindrica distribuita in jurul anomaliei termo-chimice. Acest model (de referinta) sugereaza ca diferenta de grosime intre cele trei compartimente litosferice din zona Vrancea poate juca un rol important in procesul de focalizare a delaminarii numai pe o anumita regiune.

2.3.2. Grosimea litosferei variabila

Modelele numerice prezentate in continuare considera grosimea litosferei variabila si anume: Placa Intra-Alpina – 90km, Placa Moesica – 180 km si Placa Est-Europeana – 140km. Cele trei compartimente litosferice se intersecteaza pe pozitia actuala a zonei Vrancea. In figura 4 prezentam evolutia in timp si spatiu a modelului, in care se poate observa ca includerea a trei compartimente litosferice cu grosime variabila duce la aparitia unor zone concentrate de delaminare litosferica dupa cca. 15 Ma de la initierea modelului. Pentru vizualizare s-au folosit trasori. Aceste modele arata ca materialul din care este alcatuita delaminarea provine in principal din materialul asociat cu anomalia termo-chimica (trasorii de culoare rosie).



De asemenea s-a efectuat vizualizarea rezultatelor folosind izosuprafete de temperatura, dupa cum se poate vedea in Figura 5, in care este prezentat pasul final de calcul numeric. Dupa cum se poate vedea, anomalia termica care se desprinde din litosfera datorita impactului se focalizeaza numai pe o latura a zonei de intersectie intre cele trei compartimente litosferice cu grosimi diferite. Acest rezultat este consistent intr-o prima aproximatie cu observatiile din zona seismogena Vrancea. Un alt mod de vizualizare util este acela prin care se combina trasorii din anomalia termo-chimica cu izosuprafetele termice (Figura 6).

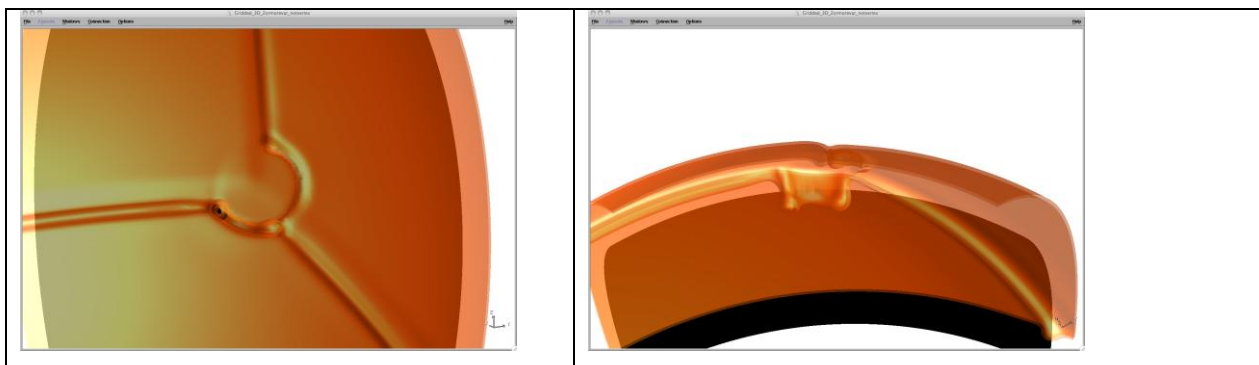


Figura 5: Model de delaminare litosferica prin impact cu o anomalie termo-chimica dupa ~17 Ma in cazul in care grosimea compartimentelor litosferice este variabila. Stanga: vedere de sus. Dreapta: vedere laterala. A se observa cum in acest caz delaminarea litosferica se concentreaza pe zona de contact dintre cele trei compartimente litosferice.

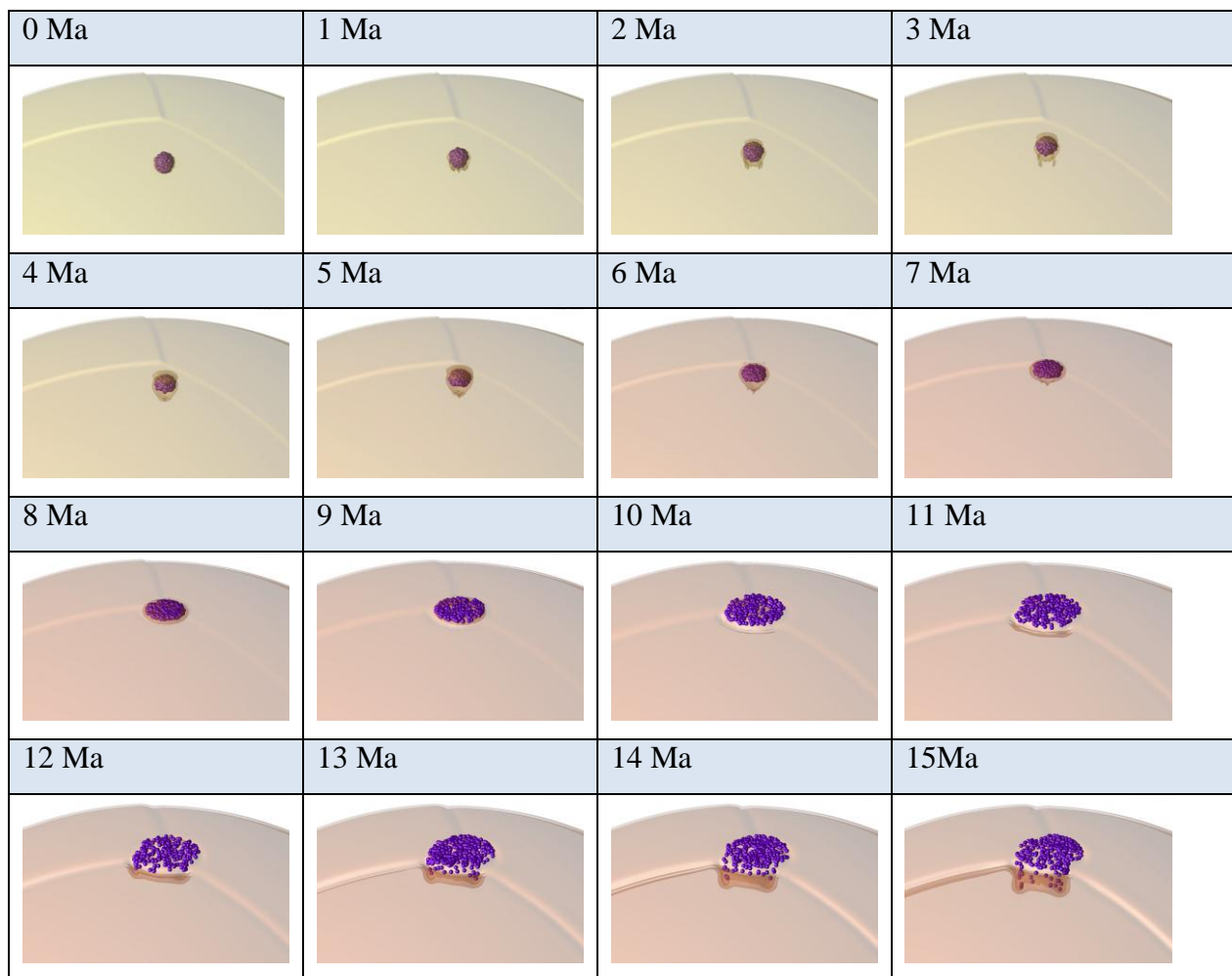


Figura 6: Evolutia in timp a anomaliei termo-chimice reprezentata ca izosuprafete si prin particule (tracers). In acest model litosfera are grosime variabila. A se observa cum in acest caz, delaminarea litosferica se concentreaza pe zona de contact dintre cele trei compartimente litosferice. Acest model sugereaza ca diferenta de grosime intre cele trei compartimente litosferice din zona Vrancea joaca un rol important in procesul de delaminare.

2.4. CONCLUZII

Modelele numerice de delaminare litosferica prin impact termo-chimic au revelat urmatoarele concluzii principale:

-In cazul in care grosimea placii litosferice superioare este considerata constanta (100 km), impactul cu anomalia termo-chimica creaza o zona (panza) de delaminare cilindrica care nu este consistenta cu observatiile din zona seismogena Vrancea.

-In cazul in care modelarea numerica incorporeaza trei compartimente litosferice de grosimi diferite, si anume: Placa Intra-Alpina – 90 km, Placa Moesica – 180 km si Placa Est-Europeana – 140 km, rezultatele modelarii numerice se apropie mult de situatia reala observata in zona Vrancea. Delaminarea apare concentrata numai pe o parte a zonei, si anume, in zona in care grosimea compartimentelor litosferice este mai mare.

-Totodata, s-a observat ca intensitatea delaminarii creste odata cu scaderea vascozitatii aferente litosferei continentale. Aceasta reducere a vascozitatii poate sa fie asociata unui fenomen de subductie anterior.

-Desi originea geodinamica se poate explica intr-o prima aproximatie cu impactul unei anomalii termo-chimice a carei origine se afla in mantaua superioara, nu este exclusa existenta unui fenomen de subductie anterior.

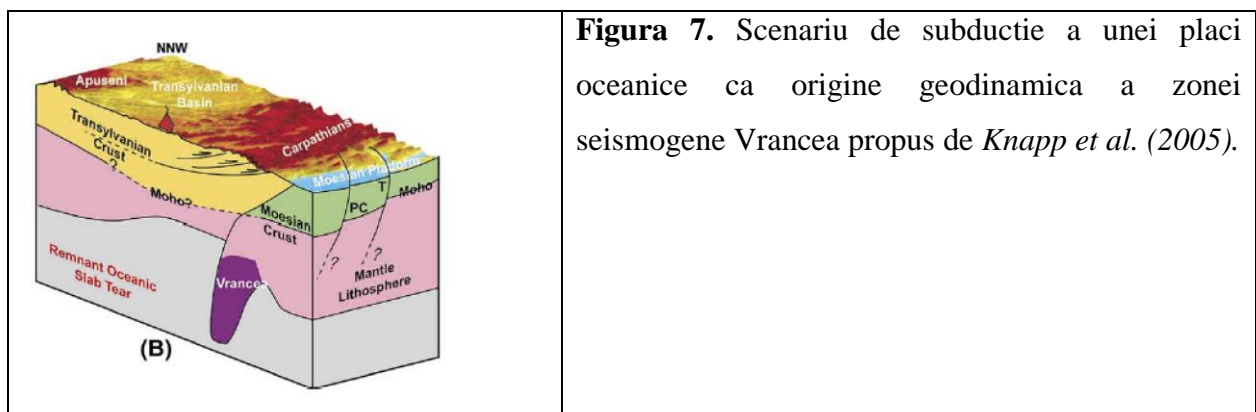
2.5. REFERINTE BIBLIOGRAFICE.

- Tan, E., Choi, E., Thoutireddy, P., Gurnis, M., and Aivazis, M., 2006. GeoFramework: coupling multiple models of mantle convection within a computational framework. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7. doi:10.1029/2005GC001155 Q06001, 14 pp.
- Manea, V.C., Manea, M., Pomeran, M., Besutiu, L., Zlagnean, L., 2012. A parallelized particle tracing code for CFD simulations in Earth Sciences. *Acta Universitaria.* Vol. 22 N. 5. 19-26.
- Girbacea, R. and Frish, W., 1998. Slab in the wrong place: lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the eastern Carpathian subduction retreat. *Geology*, 26, 611-614.
- Wortel and Spakman, W., 2000. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian Region. *Science* 290, 1910-1917.
- Ismail-Zadeh, A.T., Panza, G.F., Naimark, B.M., 2000. Stress in the descending relic slab beneath the Vrancea region, Romania. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 111-130.
- Besutiu, L., 2001. Vrancea active seismic area: a continental unstable triple junction? *Rev. Roum. Geophysique*, 45, 59-72. Boley and Weiner (1960)
- Stanica, D., M. Stanica, M. Visan, and M. Popescu, 2006: Anomalous behavior of the electromagnetic parameters associated to intermediate depth earthquakes. *Rev. Roum. Géophys.*, 50, 41- 47.

3. SUBDUCTIA UNEI PLACI OCEANICE URMATA DE COLIZIUNE CONTINENTALA

3.1. IPOTEZA DE BAZA

Pe langa ipoteza mai sus elaborata, s-a propus si scenariul de subductie a unei placi oceanice (*Knapp et al., 2005*). Aceasta este si una dintre ipotezele privind originea zonei seismogene Vrancea, propusa si in cererea de finantare a proiectului CyberDyn (Figura 7). Scopul acestui model este de a vedea in ce conditii (ce parametri de subductie) modelul final satisface observatiile din zona Vrancea, ca de exemplu inclinarea corpului seismogen, sau existenta unui prism de sedimente de mari dimensiuni.



3.2. MODELUL INITIAL

Modelul numeric folosit aici urmareste tehnica de diferente finite propusa de *Gerya (2010)*. La suprafata modelului sunt luate in considerare fenomene de eroziune/sedimentare cf. *Gerya si Yuen (2003)*. Aceasta suprafata separa limita de sus a litosferei, de straturile de apa/aer cu densitatea verticala stratificata (fie "aer" 1 kg/m^3 , pentru $y < y_{\text{apa}}$ sau 'apa', 1000 kg/m^3 , pentru $y > y_{\text{apa}}$, unde y_{apa} este nivelul apei adaptat in model). Modelul initial incorporeaza un segment de litosfera oceanica pozitionat initial intre cele doua placi continentale. Acesta permite un mod natural de initiere a subductiei si surprinde mai fidel etapele initiale ale procesului de ciocnire. In timpul acestor etape, comportamentul modelului se schimba rapid din cauza intrarii in zona de subductie a segmentului de crusta continentala cu densitate mai scazuta si flotabilitate mai mare. Domeniul de date al modelului este $1000 \times 300 \text{ km}$ si foloseste un grid rectangular ne-uniform, cu o rezolutie de 201×61 puncte nodale, rezolutia maxima fiind de $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ în zona de $300 \times 60 \text{ km}$ a zonei de subductie/coliziune. In vecinatatea acestei zone, rezolutia este mai scazuta, schimbându-se in functie de evolutia modelului care se scurteaza (spre stanga) si isi modifica adancimea. Modificarea dimensiunilor este în concordanta cu conditiile la frontiera si anume impunerea vitezei de convergenta. Conditiiile la frontiera sunt specificate astfel: modelul se scurteaza dinspre dreapta, iar pozitia limitei din stanga nu se schimba in timp. Pentru a compensa ingrosarea stratului de aer/apa din partea superioara a modelului, nivelul de apa se schimba la fiecare pas de timp. Crusta continentala are grosimea de 35 km cu straturile superior si inferior de grosime egala. Zona fosei de subductie de la limita placa continentala/placa oceanica are dimensiunea de $4 - 15 \text{ km}$ fiind o zona de falie (zona de vascozitate redusa) care strabate intreaga manta superioara ajungand la adancimea de 90 km . Aceasta zona instabila are parametrii reologici ai olivinei hidratate, o rezistenta plastica mica de 1 MPa (de exemplu, presupunând o presiune mare a fluidelor in pori si $\sin(\varphi) = 0$). In desfasurarea fenomenului de subductie, in permanenta intra in zona de fosa pre-definita un volum corespunzator de roci crustale, prin aceasta asigurandu-se decuplarea de-a lungul faliei.

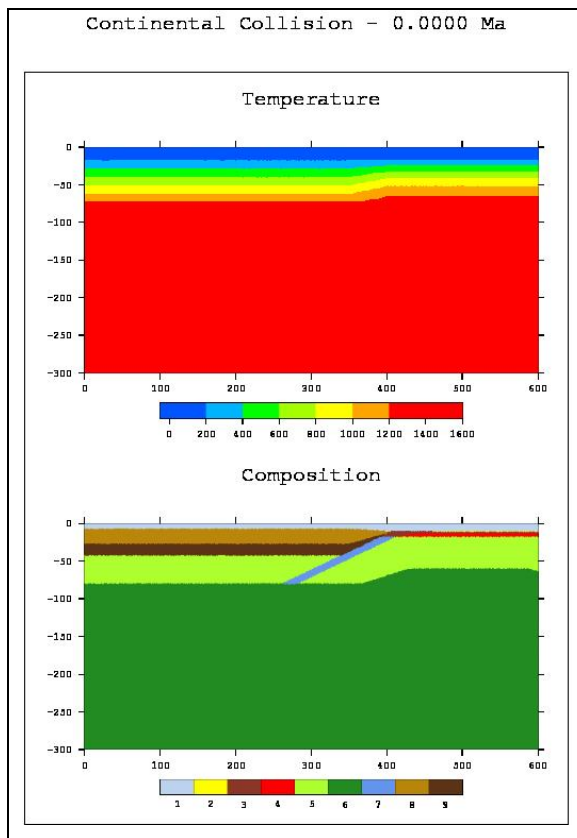


Figura 8. Modelul initial folosit pentru simularea petrologica si termomecanica a fenomenului de subductie a unei placi oceanice. Sus: distributia initiala de temperatura. Jos: modelul petrologic initial, in care sunt incorporate urmatoarele unitati (numerotate in partea de jos a domeniului):

- 1- strat aer/apa
- 2- sedimente
- 3- crusta continentala inferioara
- 4- crusta oceanica
- 5- litosfera
- 6- astenosfera
- 7- zona de vascozitate redusa
- 8- crusta continentala superioara

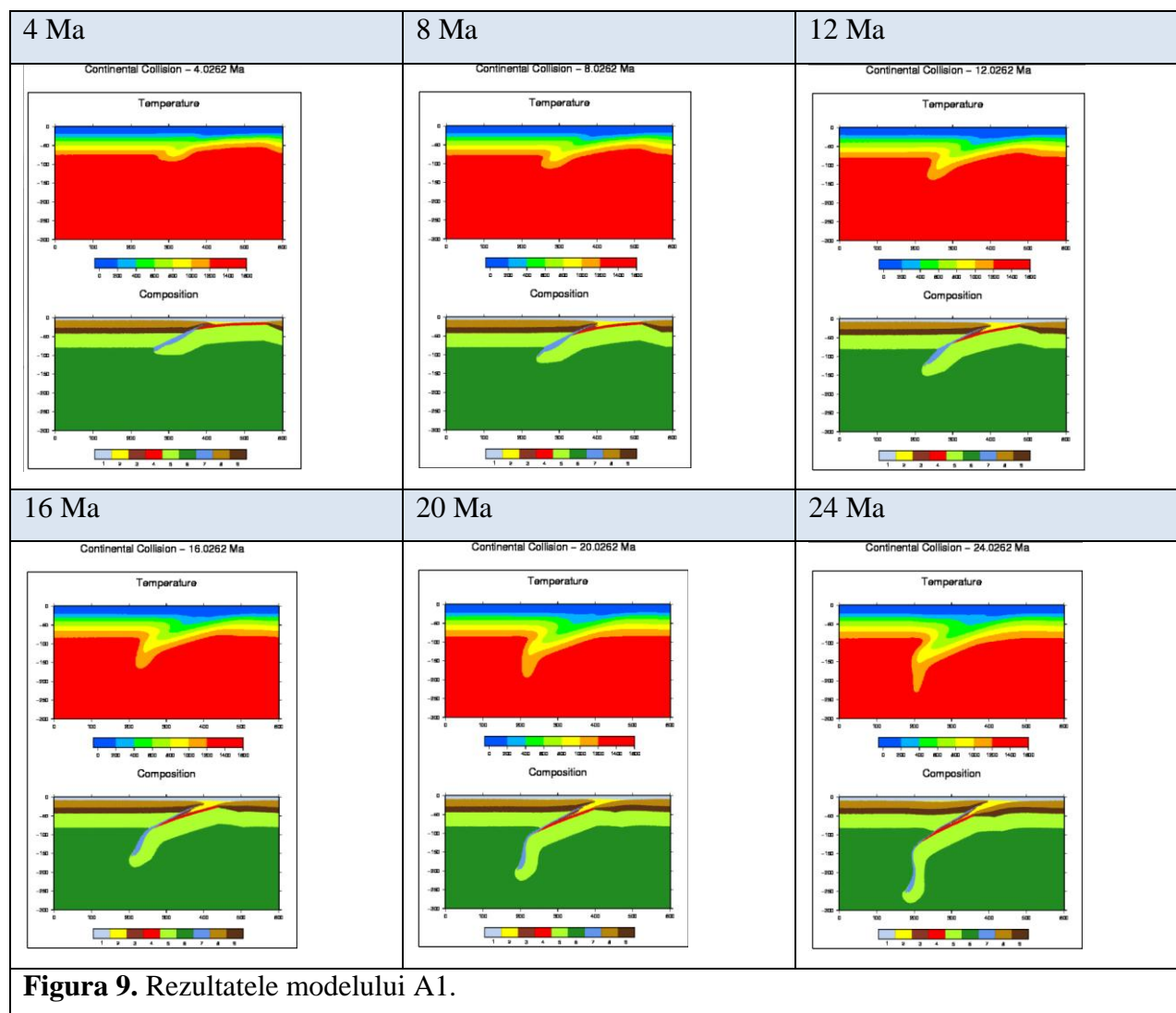
3.3. REZULTATELE MODELARII NUMERICE

Pentru acest set de modele s-au schimbat urmatorii doi parametri importanti care joaca un rol cheie in procesele de subductie si anume varsta placii oceanice si viteza de subductie (Gorbatov and Kostoglodov, 1997). De fapt produsul acestor doi parametri este cunoscut sub numele de parametru termic (thermal parameter). Mai jos prezentam un tabel cu combinatiile dintre acesti parametri folosite in rulajele efectuate pe HPCC CyberDyn. Acesti parametri sunt similari cu cei folositi de catre Cloetingh et al. (2004), varsta placii oceanice fiind variata intre 10 si 20 Ma, iar viteza intre 1 si 3 cm/an.

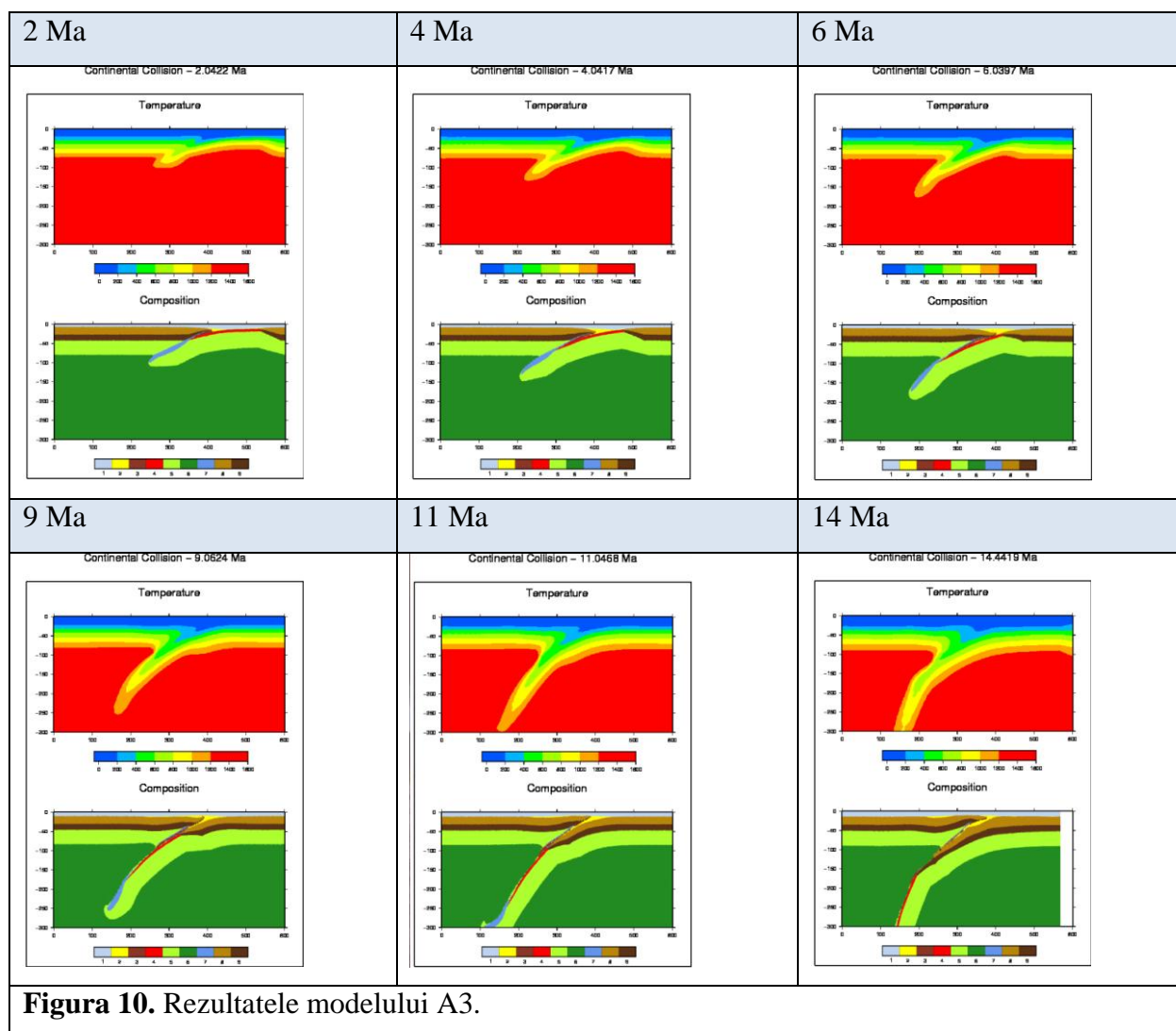
Denumire model	Varsta placii oceanice (Ma)	Viteza placii oceanice (cm/an)
Model A1	10	1
Model A2	10	2
Model A3	10	3
Model B1	20	1
Model B2	20	2
Model B3	20	3

Rezultatele modelarii sunt prezentate in urmatoarele figuri, in care se pot vizualiza atat campul de temperatura cat si distributia rocilor, precum si evolutia lor in timp. In Figura 9 se prezinta rezultatele primului Model (A1) in care o placa oceanica foarte tanara (10 Ma) si foarte lenta (1 cm/an) intra in subductie sub o placa continentală. Modelul este integrat in timp geologic ~24 Ma. Dupa cum se poate vedea, coliziunea continentală apare dupa ~16 Ma cand placa oceanica s-a consumat complet iar cele doua placi continentale ajung in contact. Se poate observa si formarea unei prisme acretionare de mari dimensiuni (stratul de culoare galbena in Figura 9), prisma a carei adancime depaseste 20-30 km, cu mult peste adancimea observata in bazinului sedimentar din zona Vrancea. Additional, se poate observa ca unghiul de inclinare al zonei de subductie este de ~45, iar dupa ~20 Ma apare un fenomen de “drip” prin care partea frontala a subductiei se scufunda in manta mai repede decat viteza de 1 cm/an impusa la frontiera din dreapta. Cu toate acestea, se poate observa ca fenomenul de subductie a produs o geometrie care nu este observata in distributia seismicitatii in zona Vrancea. In plus, izoterma de 600-800 nu depaseste adancimea de 100 km, pe cand seismicitatea in zona Vrancea poate sa ajunga si la

180 km adancime (asumand ca limita de temperatura pentru producerea cutremurelor intraplaca este de cca. 700° (Manea et al., 2006)).



In Figura 10 se prezinta rezultatele modelului A3 in care se subduce o placa oceanica foarte tanara (10 Ma), dar in acest caz viteza de subductie a fost marita de trei ori la 3 cm/an. In acest caz, coliziunea continentală apare la numai 6 Ma dupa inceperea fenomenului de subductie. In acest caz se poate observa ca desi placa oceanica a fost consumata in totalitate, exista o perioada de cca. 8 Ma in care chiar si placa continentală ajunge la adancimi de ~150 km, urmata de placa oceanica subdusa care acum se gaseste inclinata la un unghi de ~75, mult mai similar cu orientarea corpului seismogen din zona Vrancea. In plus, izoterma de 600°-800° atinge adancimea de cca. 150 km, similar cu adancimea seismicitatii observate din zona Vrancea.



In Figura 11 se prezinta rezultatele modelului B3 in care se subduce o placa oceanica relativ tanara (20 Ma), iar viteza de subductie este de 3 cm/an. In acest caz, rezultatele obtinute sunt foarte similare cu cele anterioare (Modelul A3): coliziunea continentală apare la numai 6 Ma dupa inceperea fenomenului de subductie, iar izoterma de 600-800 atinge adancimea de cca. 150 km, similar cu adancimea seismicitatii observate din zona Vrancea.

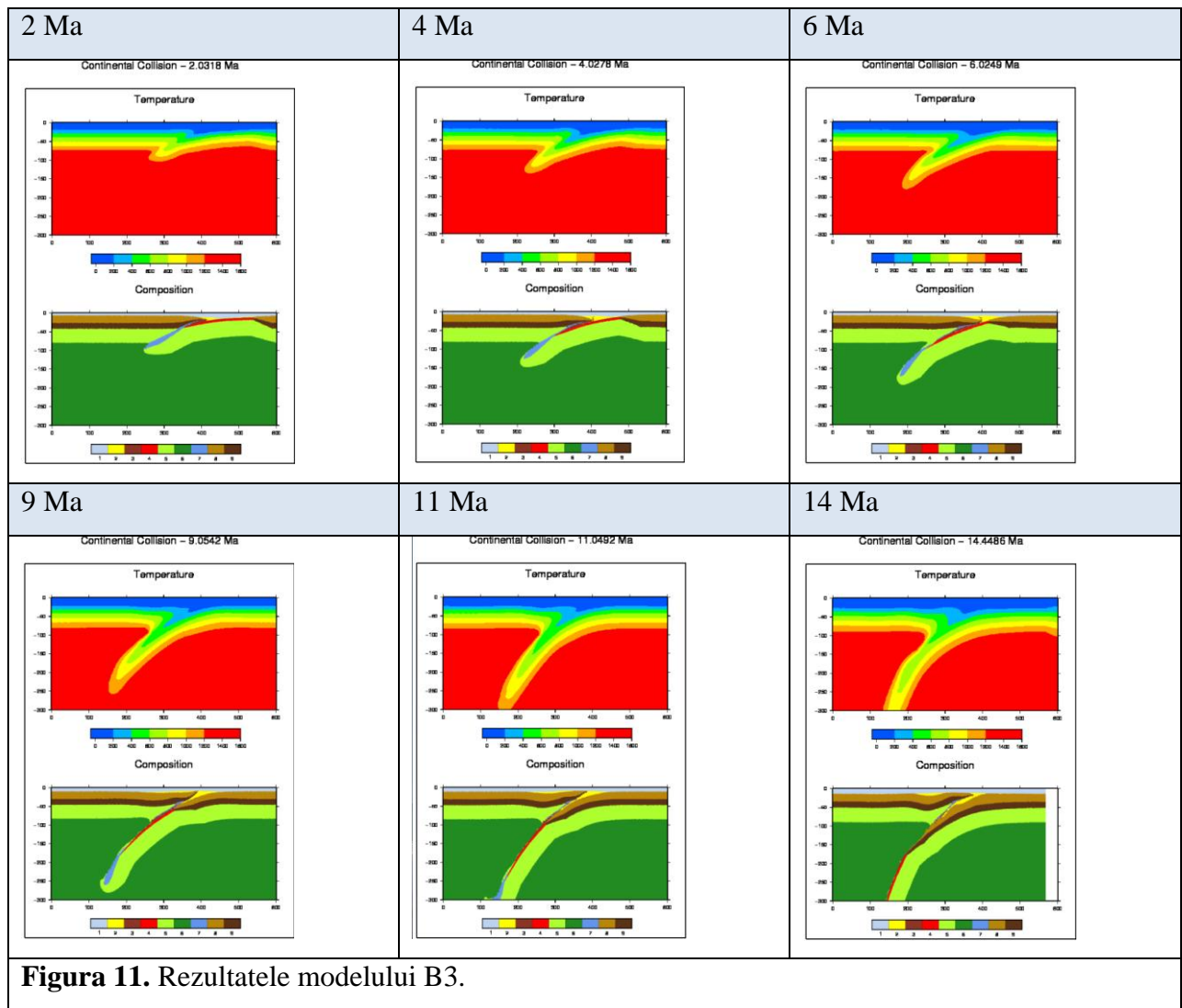


Figura 11. Rezultatele modelului B3.

3.4. CONCLUZII

Modelele numerice (petrologice si cuplate termomecanic) de subductie si coliziune continentala, au furnizat urmatoarele concluzii principale:

- una dintre concluziile principale este ca varsta placii oceanice nu joaca un rol important in ceea ce priveste geometria finala a zonei de subductie.
- un parametru important este viteza placii, si anume, un model de subductie cu viteza mai ridicata produce un model mult mai apropiat de morfologia actuala a zonei seismogene Vrancea
- prin incorporarea fenomenului de sedimentare-depozitare s-a obtinut o prisma de acretie de dimensiuni mari, similara cu grosimea pachetului de sedimente din zona Vrancea
- modelul care incorporeaza o placa oceanica care se subduce cu 3 cm/an produce o distributie de temperatura in care izoterma de 600°-800° atinge adancimea de cca. 150 km, adancime similara cu adancimea seismicitatii observate din zona Vrancea.

3.5. REFERINTE BIBLIOGRAFICE

- Gerya, T. V. and Yuen, D. A. (2003) Rayleigh - Taylor instabilities from hydration and melting propel cold plumes at subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 212, 47 - 62.
- Gerya, T.V. (2010) *Introduction to Numerical Geodynamic Modeling*, Cambridge University Press.
- Gorbatov, A., Kostoglodov, V., 1997. Maximum depth of seismicity and thermal parameter of the subducting slab: general empirical relation and its application. *Tectonophysics* 277, 165–187.
- Cloetingh, S.A.P.L., E. Burov, L. Matenco, G. Toussaint, G. Bertotti, P.A.M. Andriessen, M.J.R. Wortel, and W. Spakman (2004), Thermo-mechanical controls on the mode of continental collision in the SE Carpathians (Romania), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 218, 57-78.
- V. C. Manea, M. Manea, V. Kostoglodov, G. Sewell (2006), Intraslab seismicity and thermal stress in the subducted Cocos plate beneath central Mexico, *Tectonophysics* 420 (2006) 389–408.

4. COLIZIUNE CONTINENTALA URMATA DE RUPERE DE PLACA (SAU SLAB BREAK-OFF)

4.1. IPOTEZA DE BAZA

Pe langa ipoteza delaminarii ca explicatie a originii geodinamice a zonei Vrancea, s-a propus si scenariul de subductie urmat de rupere, sau mai bine zis, sfasiere laterala, de placa oceanica (Knapp et al., 2005). Aceasta este si una dintre ipotezele privind originea zonei seismogene Vrancea, propusa si in cererea de finantare a proiectului CyberDyn (Figura 12).

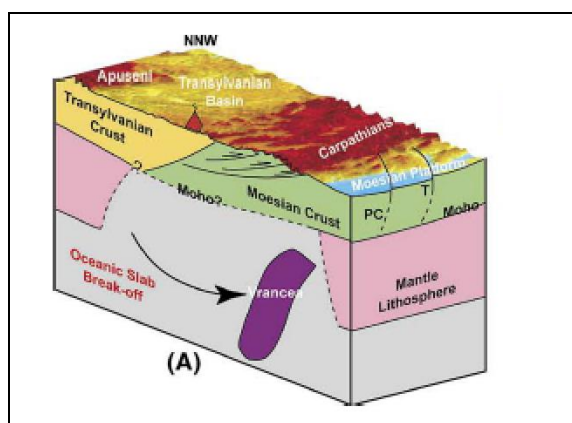


Figura 12. Scenariu de rupere de placa (slab break-off) ca origine geodinamica a zonei seismogene Vrancea propus de Knapp et al. (2005).

In acest capitol s-a incercat, si s-a reusit, implementarea unui scenariu tectonic realist specific pentru zona Vrancea si Carpatii Orientali, prin care sfasierea placii subduse se datoreaza impactului dintre o paleoplaca oceanica si placa Est-Europeana, urmand ca atare intreruperea subductiei pe o directe NW-SE. Acest scenariu tectonic a fost prezentat in detaliu de catre Sperner et al. (1999) si preluat apoi de catre Heidbach et al. (2007). Conform Sperner et al. (1999), in Cretacic, subductia a fost activa in lungul intregului arc Carpato-Alpin, iar evolutia tectonica a Carpatilor in perioada Tertiara-Cuanternara a fost dominata de influenta procesului de subductie cu orientare SW-W. Urmeaza o perioada in care se presupune existenta unui episod de coliziune continentală Alpina (in perioada Eocena), urmat apoi de o subductie pe o zona restransa a placii Europene. Aceasta subductie se presupune ca sta la baza principalului mecanism de miscare (rotatie) a doua blocuri intra-Carpatice majore: blocul Tisza-Dacia si blocul Panonic de nord. In modelele numerice prezentate mai jos s-a folosit acest scenariu tectonic ca o conditie la frontiera pentru partea superioara a modelului, aceasta fiind implementata sub forma de viteze, distribuite in fisiere separate pe fiecare Ma (Figura 13).

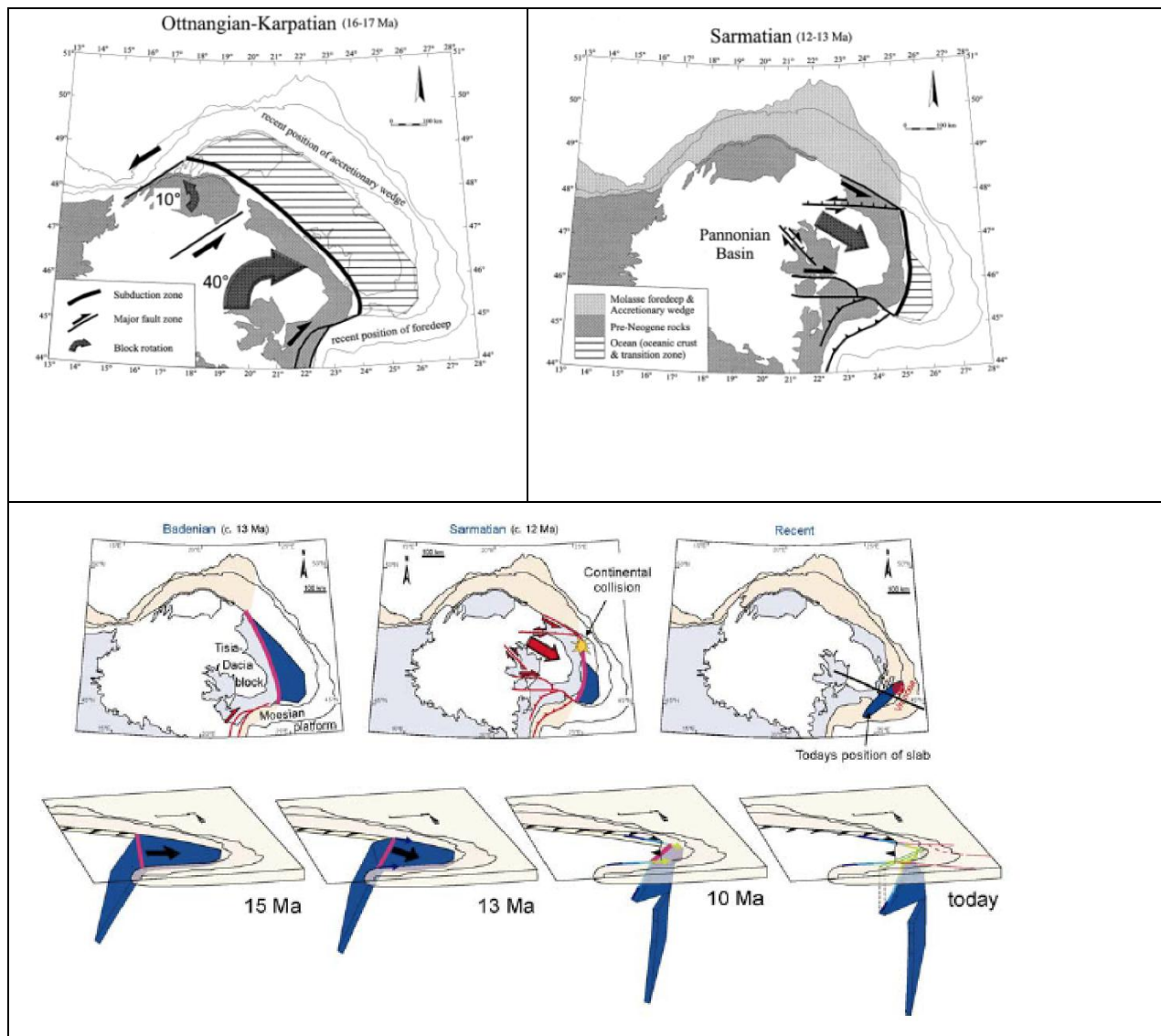


Figura 13. Sus: Evolutia geodinamica a zonei Carpato-Panonice in timpul Miocenului (*Sperner et al., 1999*). Jos: Scenariu de evolutie tectonica a Carpatilor Orientali (*Heidbach et al., 2007*).

4.2. MODELUL INITIAL

Rezultatele modelarii sunt prezentate mai jos si cuprind o perioada geologica lunga de 30 Ma. Folosind pachetul de elemente finite CitcomS.py Version 3.0.1 (Tan et al., 2006), pus la dispozitie de catre Infrastructure for Geodynamics (CIG) (<http://geodynamics.org>) si folosind modulul paralelizat de trasori dezvoltat de catre membrii echipei CyberDyn (Manea et al., 2012), s-a construit un model numeric ce incorporeaza scenariul de reconstructie tectonica descris mai sus. S-au folosit patru (4) familii diferite de trasori, dupa cum urmeaza: crusta oceanica (grosime strat: 10 km), litosfera oceanica (grosime strat: 50 km), placa Est-Europeana (grosime strat: 180 km), doua domenii cubice specifice mantalei si localizate in lateralul zonei de subductie (dimensiuni de: 100x100x100 km). In total s-au utilizat 1 milion de trasori, acestia fiind folositi pentru studierea in particular a miscarii fluxului de material in manta in jurul zonei de subductie. Calculele numerice s-au efectuat intr-o regiune sferica (θ , φ , r), unde θ reprezinta latitudinea, φ longitudinea si r raza terestra (Figura 1). Adancimea modelului este de 1900 km, iar in latitudine si longitudine modelul se extinde 14° . Acest model este impartit in 129 de elemente in latitudine si longitudine, si 129 de elemente in adancime, astfel incat elementele finite aferente acestui model au dimensiunea de 12x12x12 km. Latimea placii oceanice si a litosferei ingrosate este de ~500 km. In stanga si in dreapta acestei zone, modelul este reprezentat de o zona de manta (fara litosfera). Cele doua domenii de forma cubica sunt amplasate in aceasta zona, si au dimensiunea de 100x100x100 km, fiind situate la adancimea de 100 km (de la partea superioara a modelului) (Figura 14).

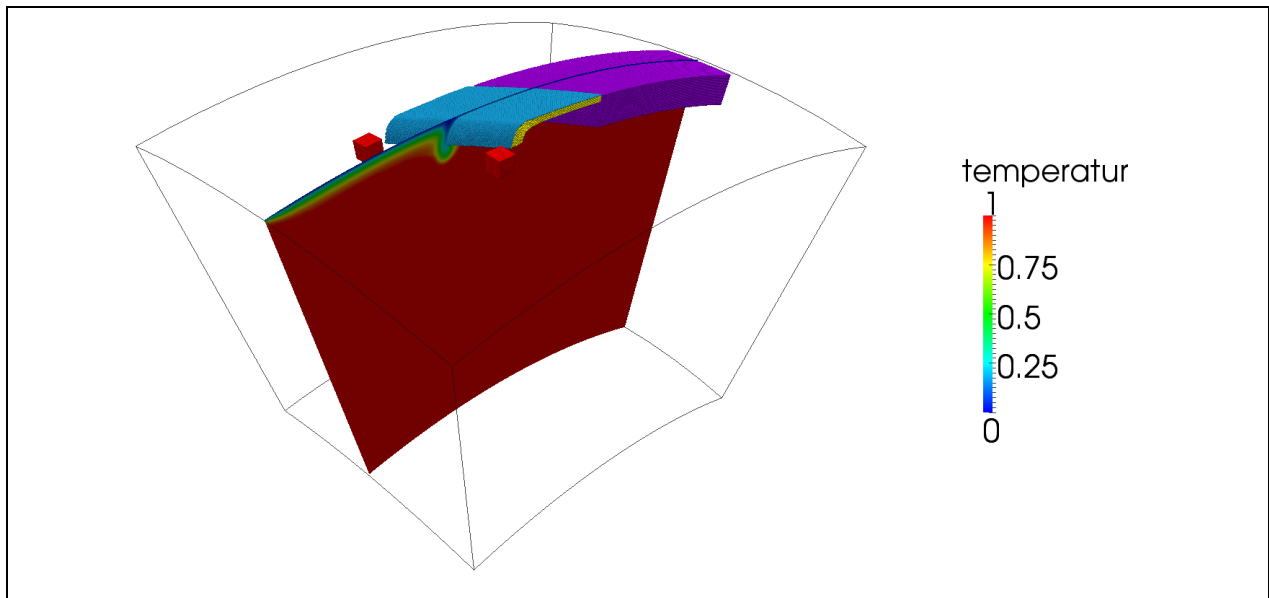
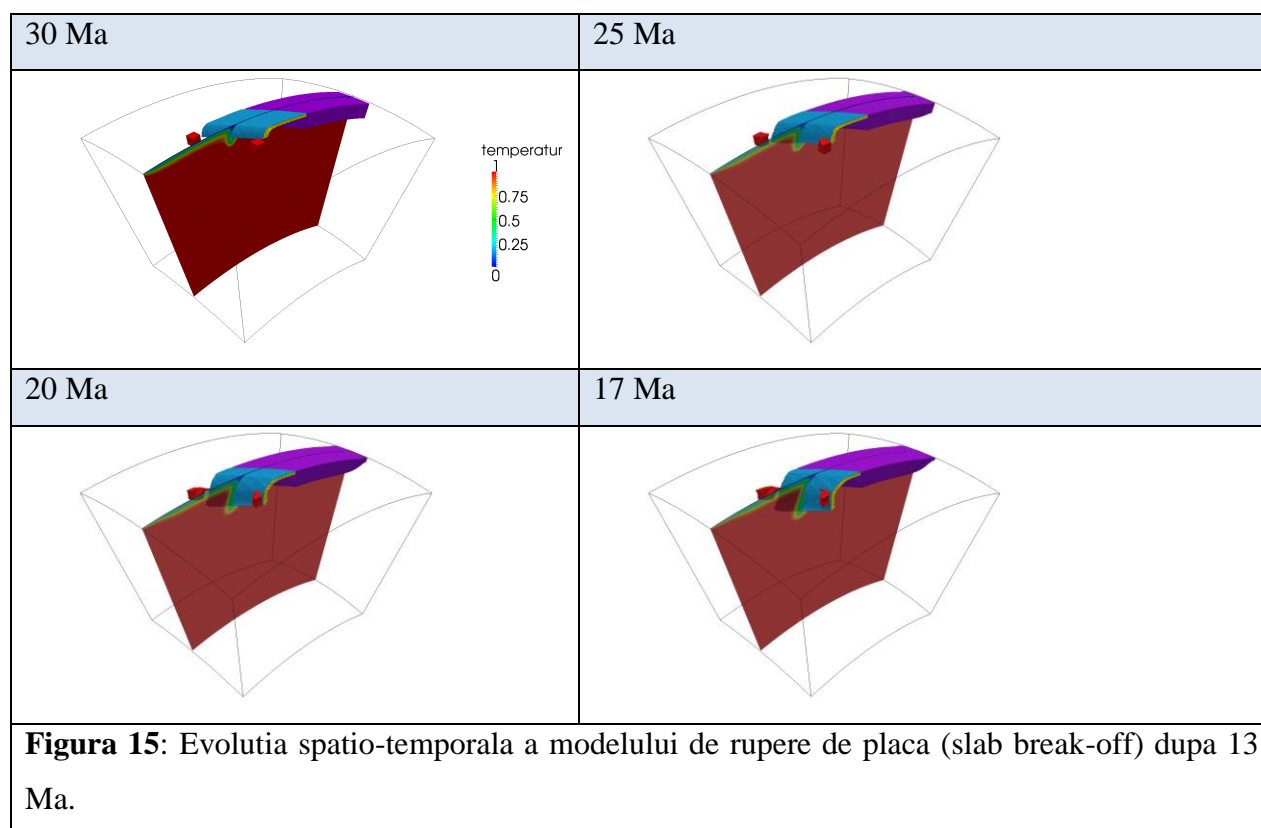


Figura 14: Modelul initial care include particule (sau trasori) pentru crusta oceanica (culoare albastra), litosfera oceanica (culoare galbena), litosfera groasa corespunzatoare platformei Est-Europene (culoare violet) si doua regiuni cubice (culoare rosie) corespunzatoare mantalei laterale. Sectiunea verticala reprezinta distributia initiala de temperatura (adimensional: 0-1, echivalent dimensional: 0-1350°C). Modelul initial corespunde unei varste geologice de 30 Ma.

4.3. REZULTATELE MODELARII NUMERICE

Mai jos, prezentam o serie de timp ce contine rezultatele cele mai reprezentative ale simularilor numerice efectuate. Primii 13 Ma de evolutie ai modelului sunt dominati de fenomenul de subductie al unei paleoplaci oceanice tinere, cu varsta de 10 Ma. Aceasta se subduce cu o viteza redusa de numai 1.5 cm/an de la Est catre Vest, aflandu-se in miscare retrograda, adica fosa oceanica se retrage odata cu placa oceanica catre Est cu viteza de 1.5 cm/an. Prezentarea in continuare a rezultatelor modelarii numerice se va face pe trei mari perioade: perioada de subductie normala intre 30-17 Ma; perioada de coliziune tectonica, oprirea subductiei si propagarea zonei de impact de la NW catre SE (intre 17-10 Ma), si perioada post-coliziune tectonica, intre 10-0 Ma.

In Figura 15 prezentam imagini 3D cu rezultatele modelarii pentru urmasorii pasi de timp (geologici) pentru prima parte de evolutie a modelului: 30 Ma, 25 Ma, 20 Ma si 17 Ma. Rezultatele sunt prezentate folosind trasori precum si o sectiune verticala semitrasparenta prin mijlocul modelului. Datorita numarului mare de trasori (106) si datorita faptului ca fiecare trasor este reprezentat printr-o mica sfera cu rezolutie inalta, pentru vizualizare s-a preferat folosirea pachetului ParaView (www.paraview.org). Se observa ca dupa 13 Ma de evolutie (subductie) cele doua domenii cubice sunt absorbite de catre sistemul de subductie. Acest fenomen este cunoscut sub numele de curgere toroidala, si este specific zonelor de margine de placa aflata in subductie (Piromallo et al., 2006).



A doua perioada principala in scenariul de reconstructie tectonica si modelare numerica este reprezentata de perioada de coliziune tectonica urmata de oprirea subductiei si propagarea zonei de impact de la NW catre SE (intre 17-10 Ma). In Figura 16 se prezinta rezultatele modelarii pentru patru pasi de timp, 17 Ma, 15 Ma, 12 Ma si 10 Ma. Dupa cum se poate vedea aceasta perioada este dominata de aparitia fenomenului de rupere de placa in partea de NW a zonei de subductie, urmata de propagarea rupturii pe directia NW-SE. Se poate observa cum crusta oceanica este complet rupta in partea de nord (se poate observa aparitia de trasori de culoare galbena care reprezinta litosfera oceanica). Totodata se poate observa cum procesul de absorbtie al materialului adiacent din manta continua, cele doua zone propagandu-se una catre cealalta (trasori de culoare rosie in Figura 16).

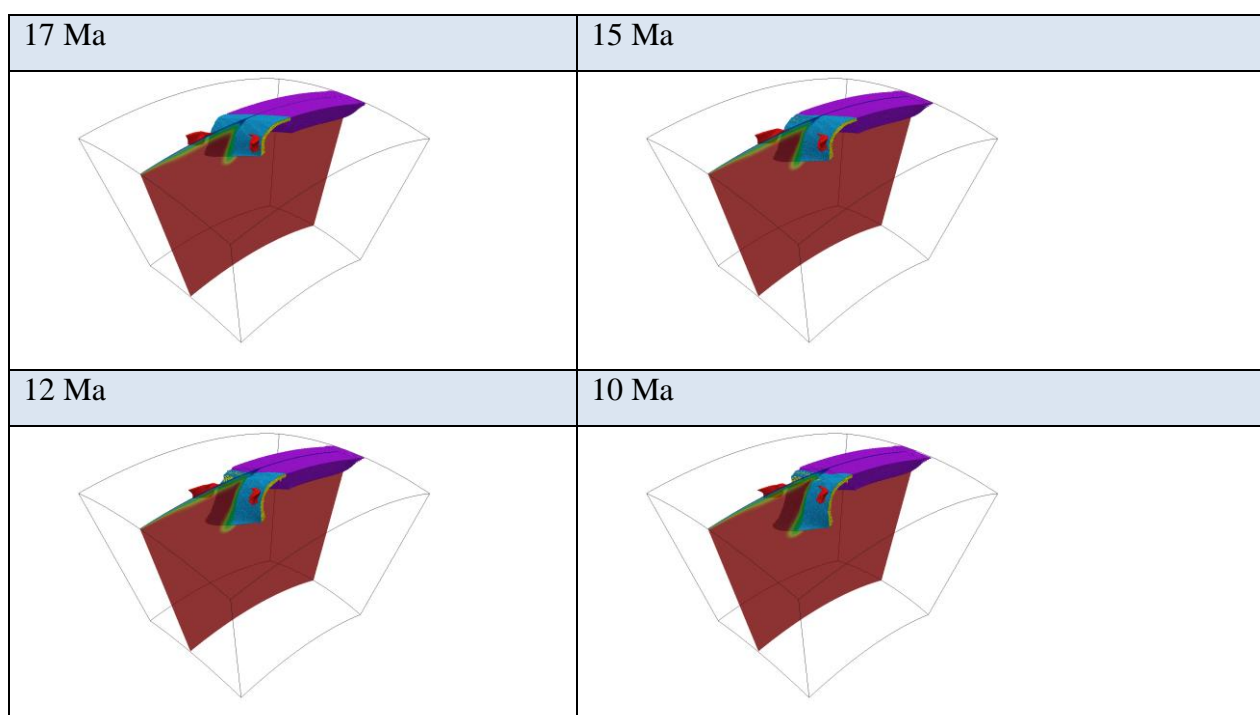
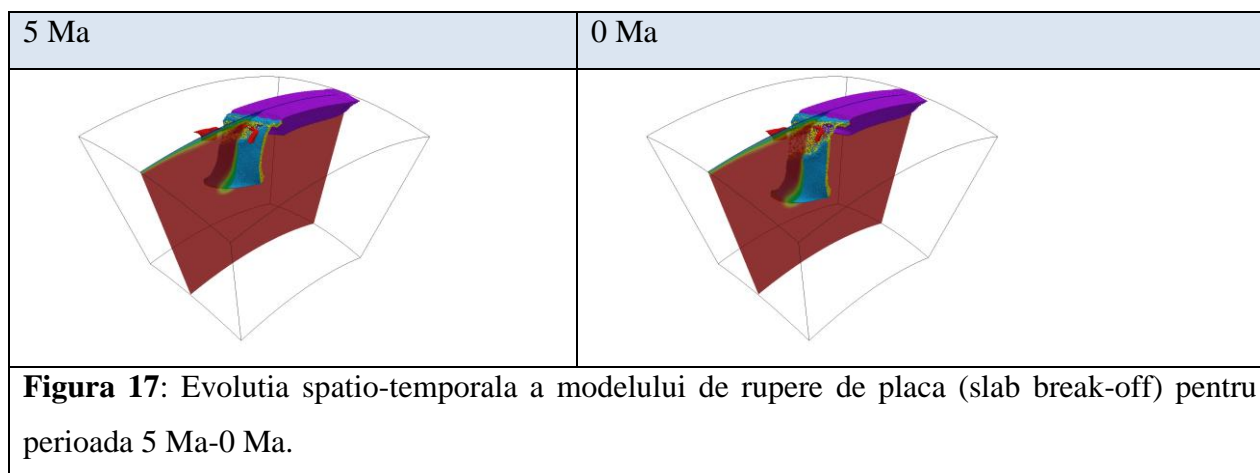
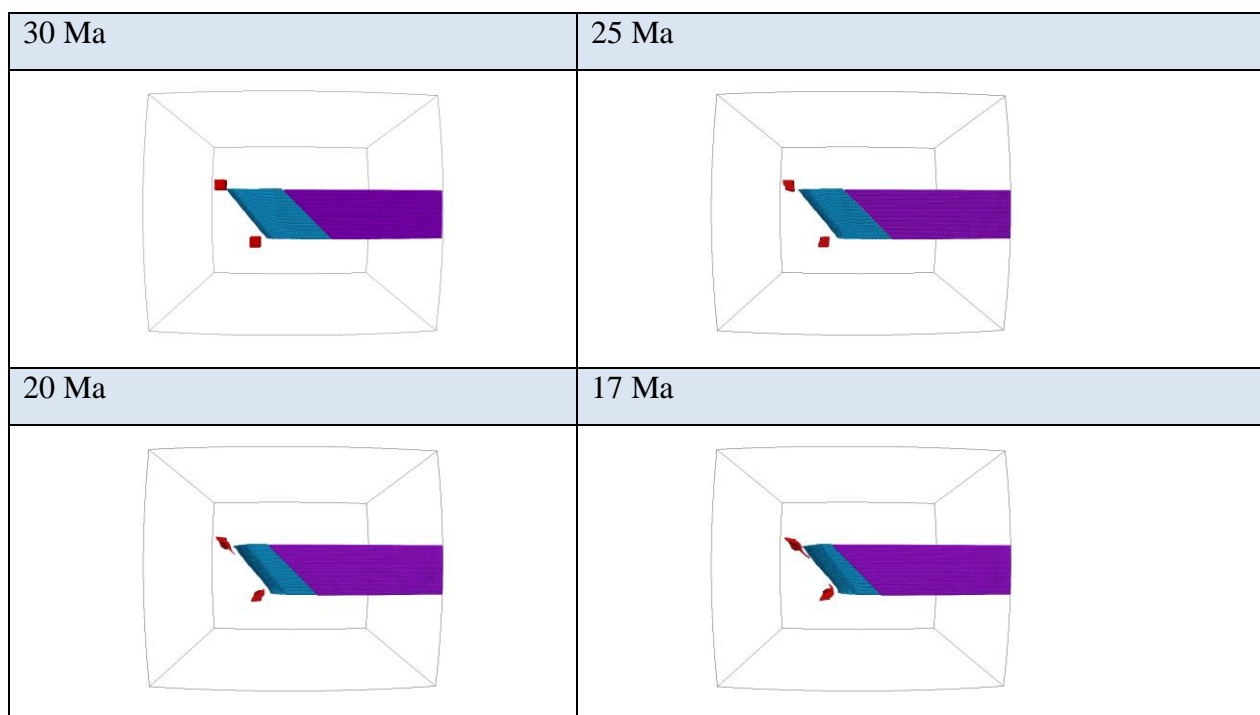


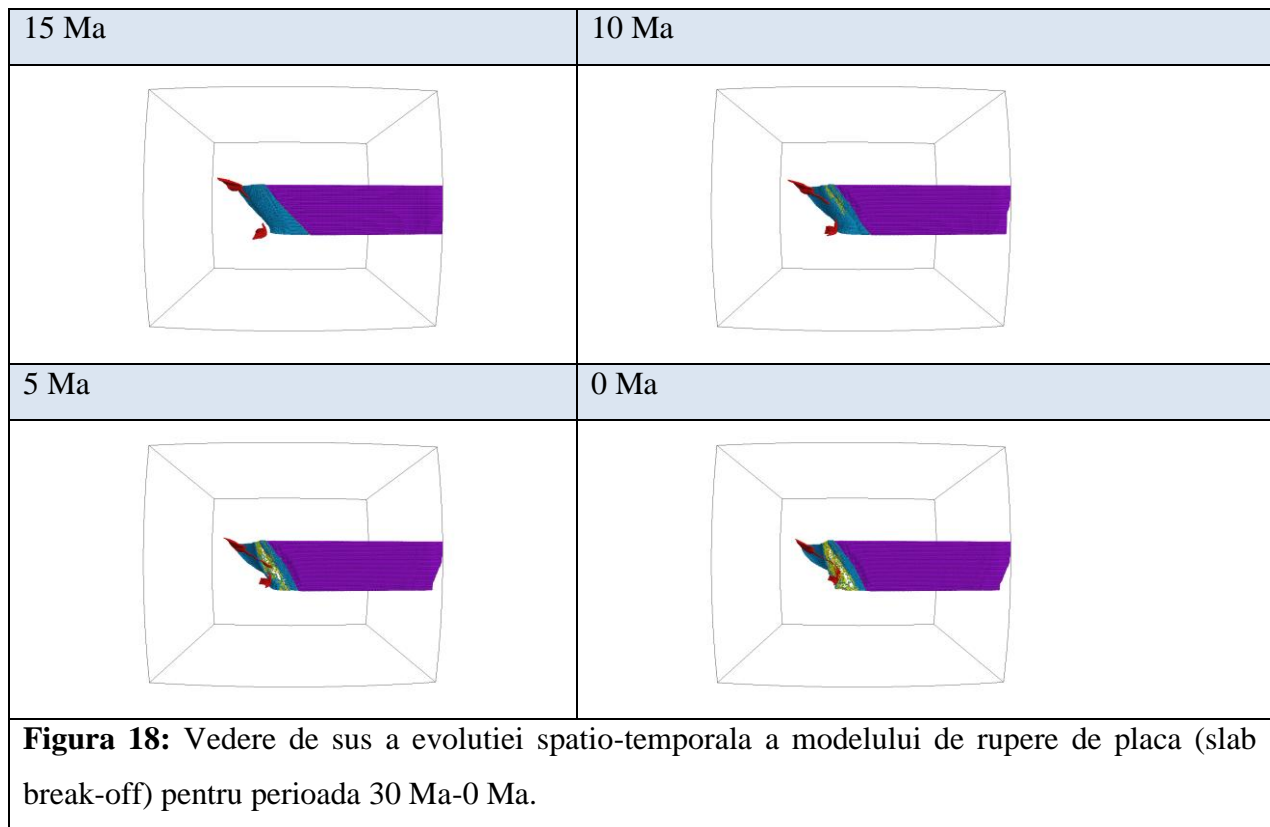
Figura 16: Evolutia spatio-temporala a modelului de rupere de placa (slab break-off) pentru perioada 17 Ma-10 Ma.

In final, prezentam in Figura 17 rezultatele modelarii numerice aferente perioadei post-coliziune tectonica, intre 10-0 Ma. Dupa cum se poate observa, evolutia temperaturii si distributia particulelor dupa o perioada de 25 Myr corespunde unei varste de 5 Ma.



A se observa cum cele doua domenii cubice laterale continua sa se deformeze rapid datorita fluxului de material din mantaua superioara catre zona de subductie (Figura 18). In plus, se poate observa cum in partea de nord, placa oceanica continua sa se rupa, incepand cu crusta oceanica subtire (trasori de culoare albastra), pentru a continua apoi chiar cu litosfera oceanica aferenta (trasori de culoare galbena). Modelul final (0 Ma) corespunde cu situatia actuala din zona Vrancea in care numai o parte din sistemul de subductie initial ramane atasat de partea superioara crusta-manta.





4.4. CONCLUZII

Modelele numerice care au avut incorporat un scenariu realist de coliziune tectonica urmat de rupere de placa si sfasiere laterala, au furnizat urmatoarele concluzii principale:

- prima parte (30-17 Ma) a evolutiei geodinamice a modelului este marcata de absorbtia catre zona de subductie a materialului din mantaua adiacenta.

- a doua perioada (17-10 Ma) este marcata de aparitia fenomenul de rupere de placa oceanica in adancime. De fapt, acesta apare la sfarsitul perioadei de coliziune tectonica, undeva in jurul a 10 Ma. Acest lucru se datoraza vascozitatii ridicate a placii oceanice care induce o intarziere in aparitia efectelor in adancime datorate efectelor superficiale (impuse in cazul nostru prin conditiile la frontiera superioara a modelului).

- in ultima parte (10-0 Ma), se poate observa propagarea de la NW catre SE a zonei de ruptura, aceasta atingand undeva in jurul a 2-3 Ma chiar zona Vrancea. Ca urmare, modelul numeric arata ca in situatia actuala placa oceanica se afla foarte putin atasata de partea superioara a crustei/mantalei (Figura 19). In acelasi timp, se poate observa cum materialul din mantaua adiacenta s-a propagat lateral, practic pe toata lungimea segmentului in care s-a manifestat fenomenul de subductie. Acest lucru este consistent cu observatiile seismice actuale (anizotropie seismica) prin care se poate observa, ca fluxul de material din manta este orientat in lungul Carpatilor Orientali pe o directie preferentiala NW-SE (Kovacs *et al.*, 2012).

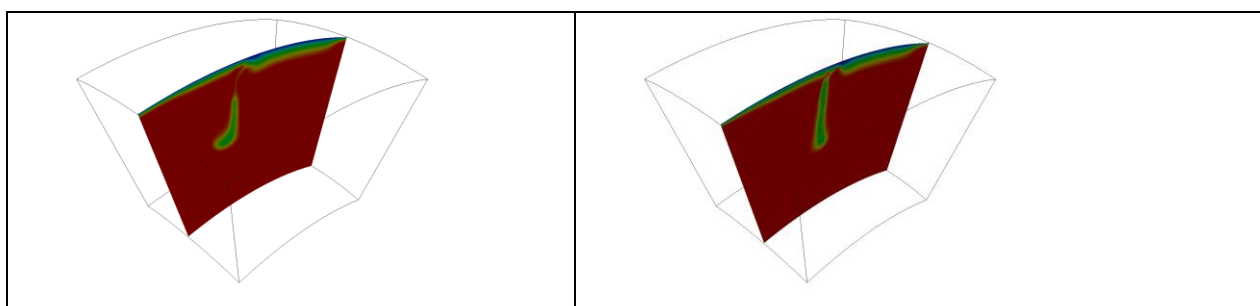


Figura 19: Evolutia campului de temperatura (in sectiune verticala centrala - stanga si sectiune verticala pe zona Vrancea - dreapta) dupa o perioada de 30 Myr (corespunde situatiei actuale). A se observa cum placa oceanica s-a desprins complet de partea superioara a modelului.

4.5. REFERINTE BIBLIOGRAFICE

- Knapp, J.H., Knapp, C.C., Raileanu, V., Matenco, L., Mocanu, V., Dinu, C., 2005. Crustal constraints on the origin of mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: the case for active continental lithospheric delamination. *Tectonophysics*, 410, 311-323, doi:10.1016/j.tecto.2005.02.020.
- Tan, E., Choi, E., Thoutireddy, P., Gurnis, M., Aivazis, M., 2006. GeoFramework: coupling multiple models of mantle convection within a computational framework. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7. doi:10.1029/2005GC001155 Q06001, 14 pp.
- Manea, V.C., Manea, M., Pomeran, M., Besutiu, L., and Zlagnean, L., 2012. A parallelized particle tracing code for CFD simulations in Earth Sciences. *Acta Universitaria*. Vol. 22 N. 5. 19-26.
- Sperner, B., F. Lorenz, K. Bonjer, S. Hettler, and F. Wenzel 2001. Slab break-off - abrupt cut or gradual detachment? New insights from the Vrancea Region (SE Carpathians, Romania), *Terra Nova*, 13, 172-179.
- Heidbach, O. et al. 2005. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania.
- Piomallo, C., Becker, T.W., Funiciello, F. and Faccenna, C., 2006. Three-dimensional instantaneous mantle flow induced by subduction. *Geophysical Research Letters* 33: doi: 10.1029/2005GL025390. issn: 0094-8276.
- Kovács, I., Falus, G., Stuart, G., Hidas, K., Szabó, C., Flower, M.F.J., Hegedűs, E., and collaborators, 2012. Seismic anisotropy and deformation patterns in upper mantle xenoliths from the central Carpathian–Pannonian region: Asthenospheric flow as a driving force for Cenozoic extension and extrusion? *Tectonophysics* 514, 168-179.

5. INSTABILITATE GRAVITATIONALA

5.1. IPOTEZA DE BAZA

În acest capitol o să abordăm numeric o ipoteză mai recentă în ceea ce privește originea zonei seismogene Vrancea, și anume instabilitatea gravitațională (Lorinczi and Houseman, 2009; Houseman and Gemmer, 2007). Este cunoscut faptul că manta litosferică este mai densă decât astenosfera în cazul în care este încălzită la aceeași temperatură și că atare devine instabilă din punct de vedere gravitațional. În cazul în care intervine o compresiune tectonică orizontală între două, sau mai multe blocuri tectonice, așa cum este cazul zonei seismogene Vrancea, instabilitatea gravitațională poate să favorizeze îngrosarea litosferică. În același timp, partea inferioară a crustei continentale se poate eclogitiza declasând astfel instabilitatea gravitațională. În Figura 20 prezentăm modelul conceptual al instabilității gravitaționale (Molnar et al., 1998).

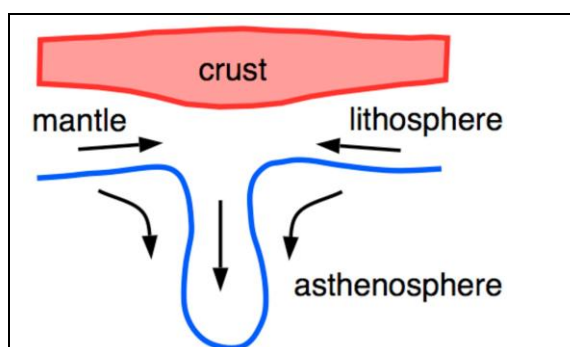


Figura 20. Scenariu general de instabilitate gravitațională (Molnar et al., 1998) propus în acest studiu ca origine geodinamică a zonei seismogene Vrancea.

5.2. MODELUL INITIAL

Folosind pachetul de elemente finite CitcomS.py Version 3.0.1 (Tan et al., 2006), pus la dispozitie de catre Infrastructure for Geodynamics (CIG) (<http://geodynamics.org>), in combinatie cu modulul paralelizat de trasori (Manea et al., 2012) s-a construit un model numeric in care la intersectia celor trei blocuri tectonice aferente zonei Vrancea s-a introdus o regiune eclogitizata sub forma unui disc cu raza de 100 km si grosimea de 20 km, situat la adancimea de 20 km. Calculele numerice s-au efectuat intr-o regiune sferica (θ , φ , r), unde θ reprezinta latitudinea, φ longitudinea si r raza terestra (Fig. 1). Adancimea modelului este de 1900 km, iar in latitudine si longitudine modelul se extinde 28° . Acest model este impartit in 129 elemente in latitudine si longitudine, si 65 elemente in adancime, astfel incat elementele finite aferente acestui model au dimensiunile de 25x25x25 km. Conditile la frontiera sunt urmatoarele: la suprafata si in adancime, limitele sunt alunecare libera (free slip), iar pe lateral conditiile la frontiera sunt de tipul reflectiv. Structura termica initiala corespunde unui model multistrat (a se vedea figurile de mai jos), compartimentele corespunzatoare zonelor vechi si groase avand varsta litosferica de 200 Myr (platforma Est-Europeana) si 130 Myr (platforma Moesica), iar compartimentul tanar (Intra-Alpin) de 50 Myr. Mantaua este impartita in patru straturi concentrice dupa cum urmeaza: litosfera (grosime variabila), mantaua superioara, zona de tranzitie (410-670 km), si o portiune din mantaua inferioara (670-1900 km). Litosfera in cele trei compartimente are o grosime variabila de la 90 km la 140-180 km. Crusta eclogitizata are un exces de densitate de 600 kg/m³ si se poate identifica in modele prin trasori de culoare mov (Figura 21).

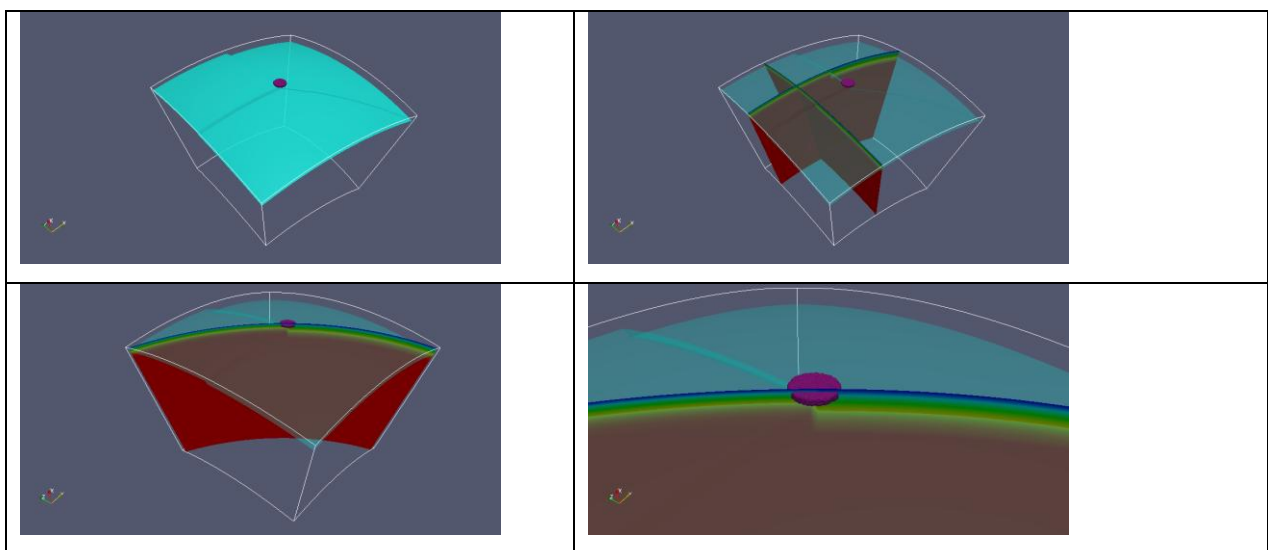


Figura 21: Modelul initial cu diverse pozitii ale sectiunilor verticale prin campul de temperatura. Pozitia izosuprafetei de 500°C se poate identifica prin suprafata semitrasparenta de

culoare cyan. Pozitia initiala a crustei inferioare este evidentiata prin trasori de culare mov. In careul din dreapta jos este reprezentata zona centrala marita. Culorile din sectiunile verticale reprezinta temperatura (0-1350°C).

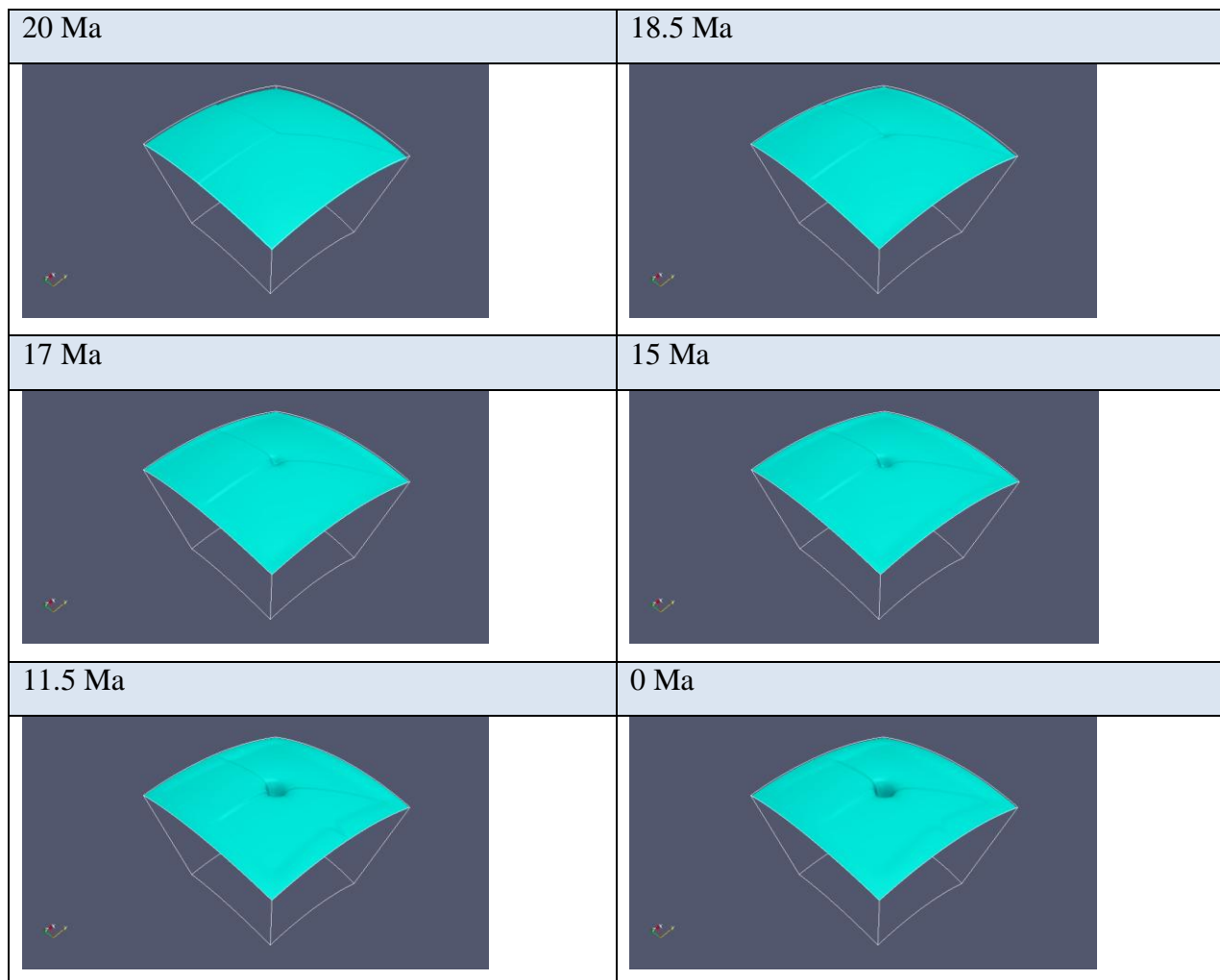
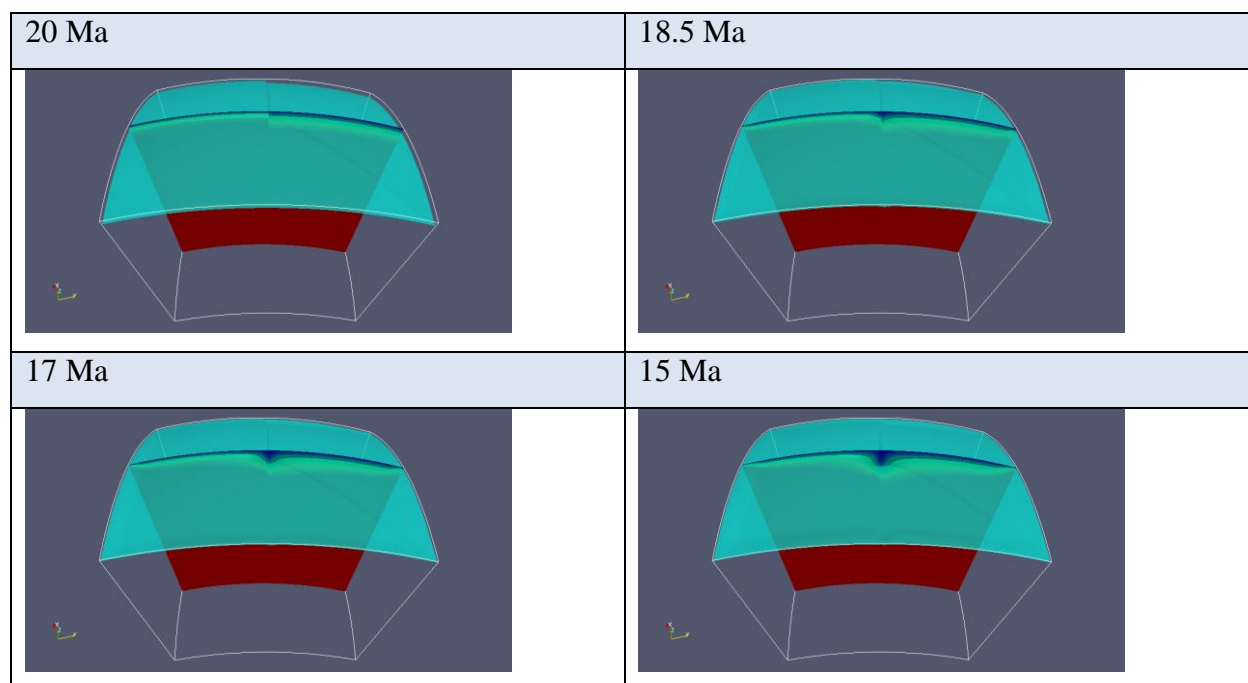


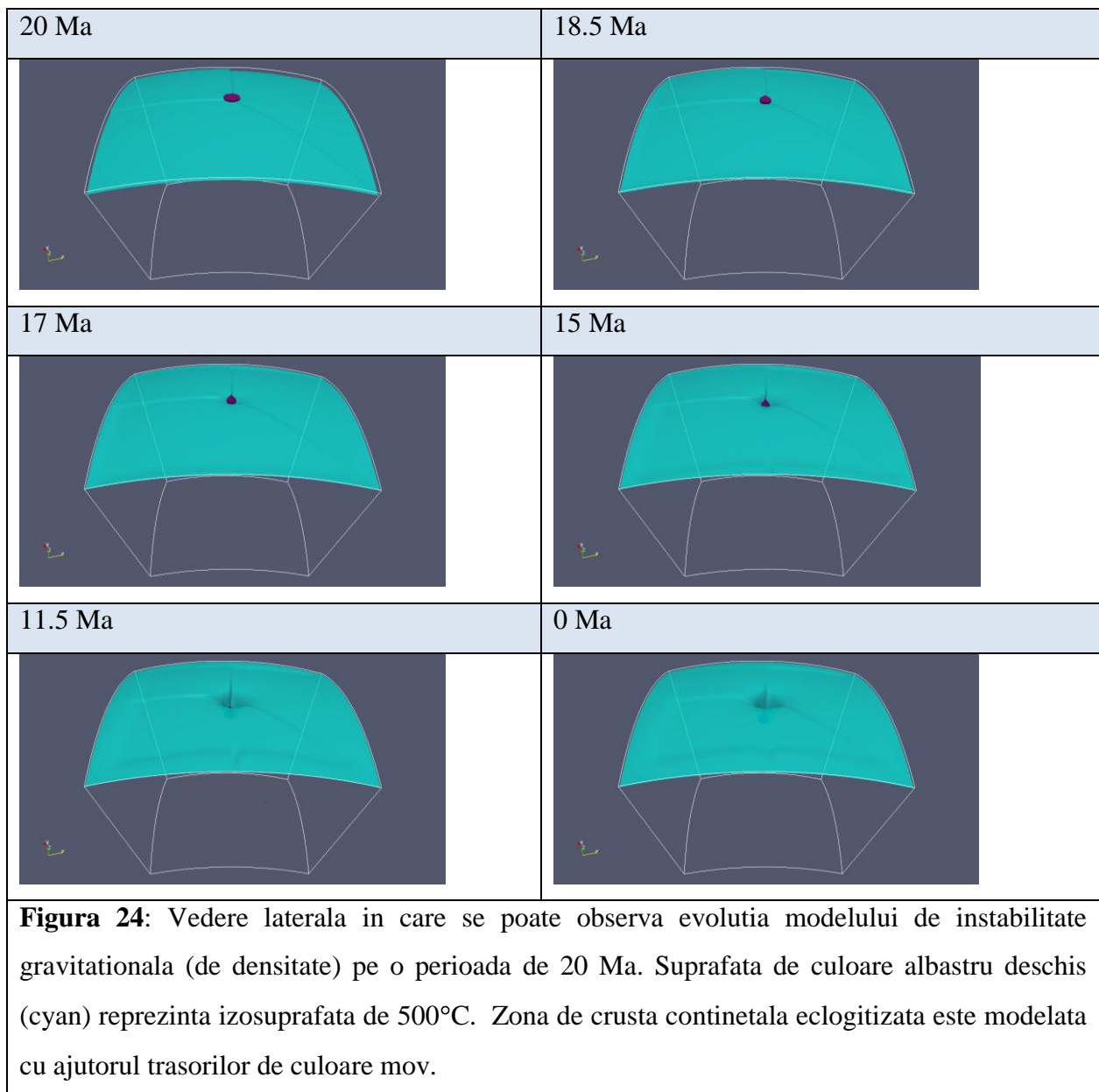
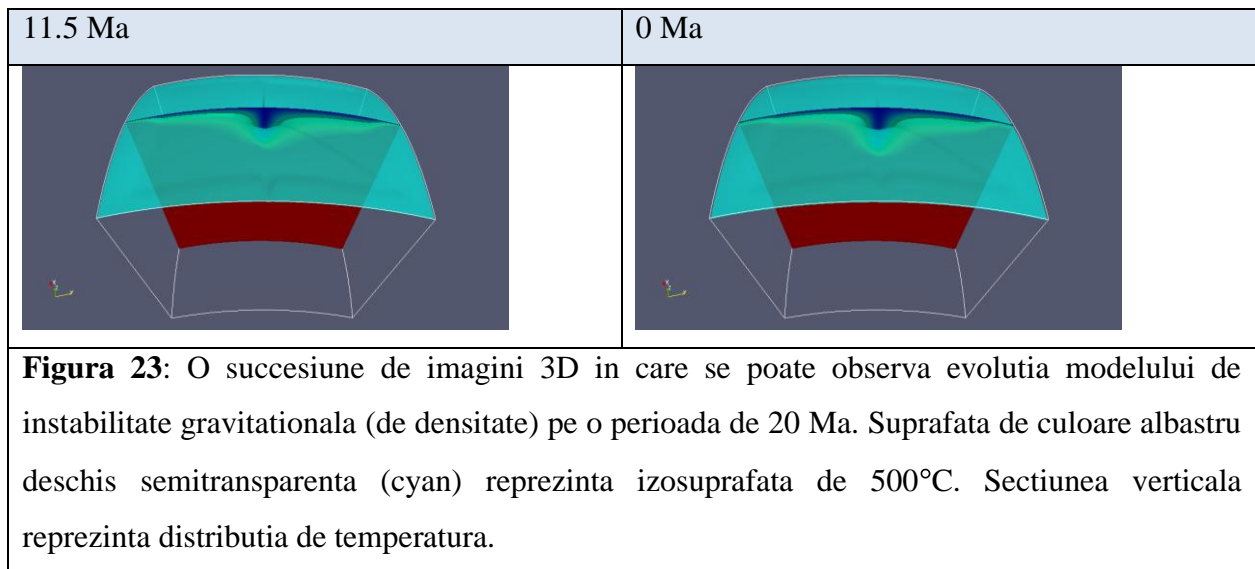
Figura 22: O succesiune de imagini 3D in care se poate observa evolutia modelului de instabilitate gravitacionala (de densitate) pe o perioada de 20 Ma. Suprafata de culoare albastru deschis (cyan) reprezinta izosuprafata de 500°C.

5.3. REZULTATELE MODELARII NUMERICE

În cele ce urmează prezentăm rezultatele modelării numerice pentru anumite intervale de timp începând cu 20 Ma. Primii 13 Ma de evoluție ai modelului sunt dominați de fenomenul de subducție al unei paleoplaci oceanice, tinere, cu vârsta de 10 Ma. După cum se poate observa în Figura 22, fenomenul de instabilitate gravitațională produce o mișcare descendentă în zona centrală, Vrancea. Acest fenomen este oarecum similar cu cel prezentat la punctul a), delaminare prin impact cu o anomalie termo-chimică, dar cu sens invers datorat excesului de densitate din zona eclogitizată.

După cum se poate observa efectul prezentei crustei inferioare eclogitizate se resimte destul de repede în model, și numai după 1.5-3 Ma de la lansarea simulării câmpul de temperatură este perturbat semnificativ în zona centrală. Adicional, extinderea în suprafață a zonei afectate este controlată în mare parte de diametrul inițial al anomaliei de densitate. În următoarele figuri (23, 24 și 25) prezentăm rezultatele modelării numerice din diverse perspective și adăugând trasorii în combinație cu izosuprafețe de temperatură pentru o mai bună evaluare a evoluției în timp. În figura 25 se poate observa că după o perioadă de ~ 20 Ma, materialul eclogitizat s-a scufundat în manta la o adâncime de ~300 km. În plus, forma s-a schimbat din disc într-o formă emisferică (“picatură”) cu un diametru înjumătățit față de forma inițială. Forma de “picatură” se datorează forțelor laterale întâmpinate la înaintarea prin manta superioară.





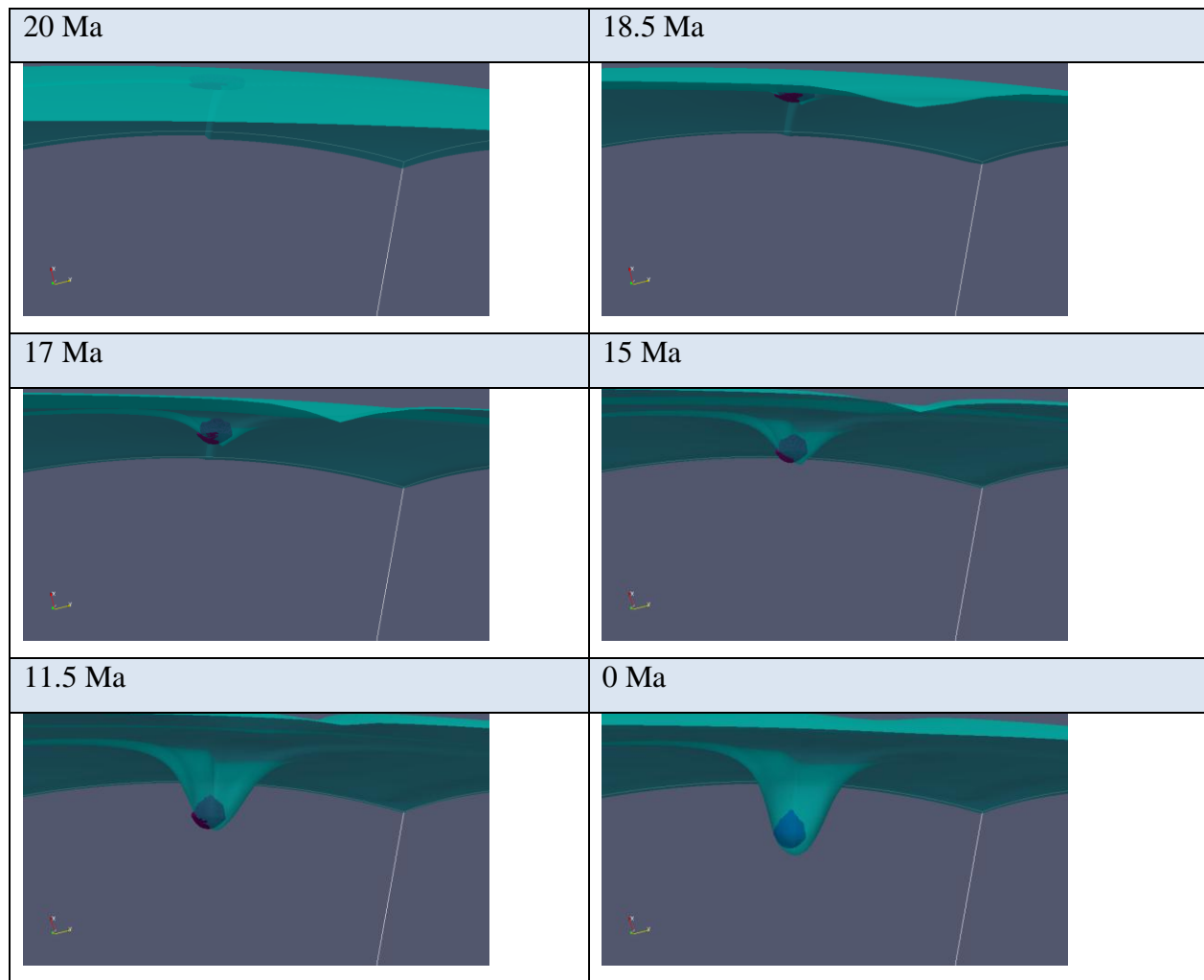


Figura 25: O vedere de aproape a modelului de instabilitate gravitacionala in care se poate observa evolutia modelului de instabilitate gravitacionala pe o perioada de 20 Ma. Suprafata de culoare albastru deschis (cyan) reprezinta izosuprafata de 500°C. Zona de crusta continentală eclogitizată este modelată cu ajutorul trasorilor de culoare mov.

5.4. CONCLUZII

Modelele numerice privind fenomenul de instabilitate gravitacionala ca origine a zonei seismogene Vrancea, au furnizat urmatoarele concluzii principale:

- prin introducerea in modele a unei zone eclogitizate de 20 km grosime localizata in crusta inferioara (20-40 km adancime) s-a observat aparitia fenomenului de instabilitate gravitacionala.

- s-a observat scufundarea rapida (de 1.5 cm/an in medie) a corpului eclogitizat.

- o asemenea scufundare se poate manifesta in suprafata printr-o depresiune in care se depoziteaza sedimente datorate eroziunii. Aceasta observatie este conforma cu prezenta unui depozit de sedimente de >10 km in zona Vrancea (*Raileanu et al., 2007*).

- dupa o perioda de numai 20 Ma, corpul eclogitizat a atins adancimea de ~300 km, adancime similara cu cea observata in tomografiile seismice aferente zonei Vrancea (*Martin et al., 2006*).

5.5. REFERINTE BIBLIOGRAFICE

- Tan, E., Choi, E., Thoutireddy, P., Gurnis, M., Aivazis, M., 2006. GeoFramework: coupling multiple models of mantle convection within a computational framework. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 7. doi:10.1029/2005GC001155 Q06001, 14 pp.
- Manea, V.C., Manea, M., Pomeran, M., Besutiu, L., and Zlagnean, L., 2012. A parallelized particle tracing code for CFD simulations in Earth Sciences. *Acta Universitaria.* Vol. 22 N. 5. 19-26.
- Lorinczi, P., and Houseman, G.A., 2008. Lithospheric gravitational instability beneath the Southeast Carpathians. *Tectonophysics* doi: 10.1016/j.tecto.2008.05.024.
- Houseman, G.A. & Gemmer, L., 2007. Intra-orogenic extension driven by gravitational instability: Carpathian-Pannonian orogeny, *Geology*, 35(12),1135–1138.
- Molnar, P., Houseman, G. A. & Conrad, C. P. Rayleigh-Taylor instability and convective thinning of mechanically thickened lithosphere: Effects of non-linear viscosity decreasing exponentially with depth and of horizontal shortening of the layer. *Geophys. J. Int.* 133, 568-584 (1998).
- V. Raileanu, F. Hauser, A. Bala, W. Fielitz, C. Prodehl, C. Dinu, and M. Landes. Deep seismic sounding across the Vrancea region. *International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation* Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania.
- Martin, M., Wenzel, F., and the CALIXTO working group, 2006. High-resolution teleseismic body wave tomography beneath SE-Romania - II. Imaging of a slab detachment scenario. *Geophysical Journal International*, 164, 579-595.