

MAJOR FAULTS ANALYSIS IN PENINSULAR MALAYSIA USING 3D EULER DECONVOLUTION GRAVITY TECHNIQUE

ANALISIS SESAR-SESAR MAJOR SEMENANJUNG MALAYSIA DENGAN TEKNIK GRAVITI DEKONVOLUSI EULER 3D

Article history

Received

28 May 2019

Received in revised form

1 June 2021

Accepted

8 June 2021

Published online

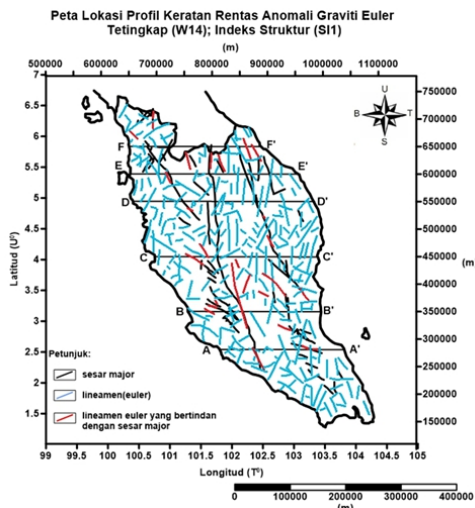
20 June 2021

*Corresponding author
nurulfairuz@nuclearmalaysia.gov.my

Nurul Fairuz Diyana Bahrudin, Umar Hamzah, Wan Zuhairi Wan Yaacob

Program Geologi, Pusat Pengajian Sains dan Sumber Alam, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

Graphical abstract



Abstract

Major fault structures of Peninsular Malaysia were analysed by satellite gravity data using 3D Euler Deconvolution inversion techniques. Major faults separating granite and sedimentary rocks such as Bok Bak, Kuala Lumpur, Bukit Tinggi, Lepar, Mersing and Lebir faults were successfully delineated. The boundary separating the western and eastern belt of Peninsular Malaysia namely the Bentong-Raub Suture is shown by the abrupt changes of gravity anomalies between the two belts. The average depths and dips of all these faults, which could not be determined by field geological mapping, were estimated by the gravity inversion technique. Confirmation of these faults location were carried out by comparison with the existing geological structure.

Keywords: Major faults, gravity survey, and gravity inversion

Abstrak

Struktur sesar major Semenanjung Malaysia telah dianalisis dengan menggunakan teknik Euler Dekonvolusi 3D dan berjaya dicerap. Sesar-sesar major yang memisahkan jalur granit dan sedimen di bahagian tengah Semenanjung Malaysia seperti sesar Bok Bak, Kuala Lumpur, Bukit Tinggi, Lepar, Mersing dan Lebir juga telah dapat dikenalpasti melalui teknik ini. Lokasi struktur yang memisahkan antara Jalur Barat dan Jalur Timur Semenanjung Malaysia iaitu Sutura Raub-Bentong telah dikenalpasti bertepatan dengan perubahan anomali graviti secara mendadak. Purata kedalaman dan kemiringan sesar-sesar major yang sukar untuk ditentukan melalui pemetaan geologi lapangan telah dapat ditentukan berdasarkan teknik penyongsangan graviti. Kedudukan sesar-sesar major dikenalpasti melalui maklumat peta geologi Semenanjung Malaysia.

Kata kunci: Sesar major, survei graviti, dan penyongsangan graviti

© 2021 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

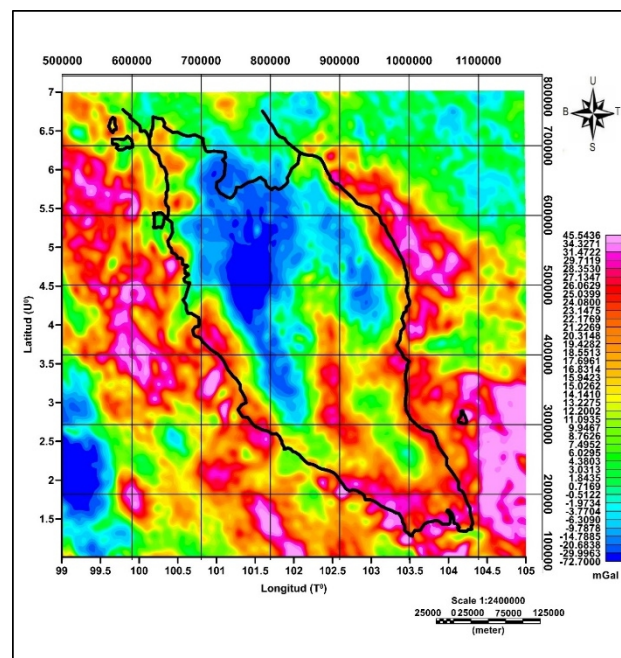
Survei graviti adalah kaedah geofizik tradisi yang digunakan untuk menentukan struktur geologi termasuk penentuan jenis batuan untuk menganggarkan ketebalan endapan sedimen atas batuan dasar khususnya dalam eksplorasi petroleum. Kaedah graviti juga sangat membantu dalam kajian kerak bumi seperti penentuan kerak atas dan sempadan mantel-kerak atas. [1-4]. Kaedah graviti sentiasa mengalami evolusi dalam pentafsiran mengikut peredaran zaman khususnya dalam teknik pemrosesan data menggunakan perisian terkini ini seringkali diperbaiki dan diperhalusi untuk memperoleh hasil yang lebih baik khususnya dalam penentuan jasad anomali dengan lebih tepat [5]. Ini melibatkan kemajuan dalam pentafsiran dan pemrosesan yang berkaitan dengan pengeditan, penyongsangan Euler 3D dan permodelan 3D untuk menghasilkan peta dan keratan rentas struktur [6-9]. Ciri utama keberhasilan anomali struktur ialah kontras sifat graviti antara jasad dan batuan keliling [10]. Survei graviti dibuat di darat, udara dan satelit.

Ghosh dan Sign (2014) telah mengkaji kedalaman batuan dasar berhablur India di kawasan Deheadun-Badrinath menggunakan teknik analisis spektra dan Dekonvolusi Euler 2D ke atas data graviti yang diukur sepanjang beberapa profil tertentu [11]. Hasil analisis data graviti tersebut melalui pendekatan 2D digunakan untuk membina konfigurasi kerak bumi yang cetek. Purata kedalaman batuan dasar yang dianggarkan melalui analisis spektra graviti 2D ialah di sekitar 11.27 km. Berdasarkan teknik dekonvolusi Euler 2D pula, kedalaman batuan dasar sepanjang 3 profil BD-TL dalam kawasan kajian dianggarkan di sekitar 10 km hingga 15km. Hasil kajian menunjukkan kebanyakan kluster sumber anomali tertumpu pada kedalaman antara 10km hingga 15km. Walau bagaimana pun, hasil kajian tidak begitu bertepatan dengan hasil kajian secara menyeluruh menggunakan teknik-teknik lain untuk membantu memperincikan input dalam pentafsiran 3D. Penyelesaian menggunakan teknik Euler dalam penentuan kedalaman punca menunjukkan kedalaman di sekitar 12 km manakala beberapa analisis dengan teknik derivatif (*derivatives*) yang lain mencadangkan kedalaman sumber anomali terletak di sepanjang delineasi yang merupakan sempadan sesar sungkup bertepatan dengan kedudukan jurus dan kemiringan sesar di kawasan kajian (di bahagian barat laut banjaran Himalaya).

Teknik Dekonvolusi Euler 3D telah diperkenalkan dalam data medan keupayaan untuk menganggarkan kedudukan lineamen struktur [12]. Berdasarkan teknik Dekonvolusi Euler tersebut, kedalaman batuan dasar dapat ditafsirkan berkisar di sekitar kedalaman melebihi 10km. Hasil kajian juga menunjukkan pola lineamen adalah berorientasi utara-selatan. Dapat diperhatikan bahawa teknik-teknik dekonvolusi dan derivatif iaitu terbitan sudut

mendatar sudut kemiringan (*horizontal tilt angle derivatives*, TDX) serta terbitan sudut kemiringan (*tilts angle derivatives*, TDR) menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeza atau boleh menyokong serta boleh dikorelasi diantara satu sama lain dalam penganggarkan kedudukan mengufuk dan bahagian sisi punca jasad kemagnetan. Kedalaman yang diperolehi melalui analisis Euler menunjukkan tren yang hampir sama dengan hasil kajian geologi. Walau bagaimana pun lebih banyak kedudukan sesar atau sesar sungkup telah dapat ditemui melalui teknik Euler dalam kajian ini khususnya untuk menentukan sisi sumber anomali dan kedalaman batuan dasar untuk eksplorasi hidrokarbon.

Dalam kajian ini, data satelit dianalisis merangkumi kawasan Semenanjung Malaysia termasuk perairan Selat Melaka dan Laut China Selatan (Rajah 1). Geometri sesar-sesar besar Semenanjung Malaysia adalah menjadi sasaran dalam kajian ini menerusi pembinaan beberapa keratan rentas timur-barat merangkumi utara-selatan Semenanjung Malaysia. Keratan rentas geologi dihasilkan melalui pentafsiran keratan rentas Euler.

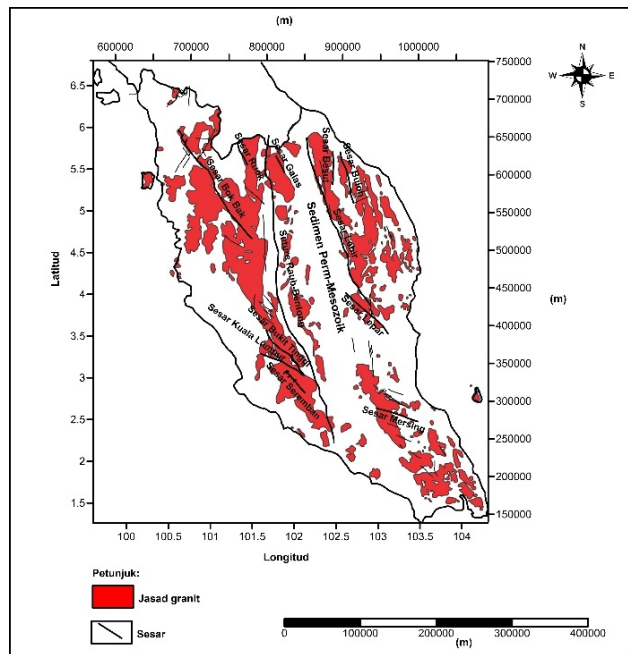


Rajah 1 Peta anomali Bouguer Semenanjung Malaysia

2.0 GEOLOGI KAWASAN KAJIAN

Deformasi batuan geologi sedimen tua (Pra-Trias) bermula serentak dengan rejahan magma igneus yang berlaku pada zaman Trias yang melibatkan batuan klastik dan kapur di bahagian utara dan selatan. Batuan terancang tersebut adalah dianggarkan berusia Paleozoik [13]. Kesan utama daripada rejahan igneus, bukan sahaja berbentuk jelmaan batuan malah terbentuk juga struktur sesar dan retakan dalam batuan tersebut yang

merupakan tujuan kajian utama banyak pengkaji sehingga pada hari ini kerana sesar pada amnya berasosiasi dengan pemineralan, hidrogeologi dan petroleum. Oleh kerana rejahan igneus berlaku dalam beberapa siri usia, ia kadang kala mengaktifkan semula sesar-sesar yang terbentuk lebih awal yang berusia Kapur dapat dikenali dengan anjakan sesar lama oleh sesar baru. Kedudukan sesar-sesar major dan granit di Semenanjung Malaysia ditunjukkan dalam Rajah 2.



Rajah 2 Peta sesar-sesar major dan jasad granit di Semenanjung Malaysia [14]

3.0 KAEDAH KAJIAN

Data satelit graviti telah dimuat turun dari laman sesawang *Earth Gravity Model 2008 (EGM 2008)*. Sejumlah 298116 data graviti telah siap dibetulkan untuk ditafsirkan secara langsung menggunakan perisian komputer iaitu Oasis Montaj.

Dalam kajian ini teknik penapisan songsang Dekonvolusi 3D Euler telah menghasilkan geometri sumber anomali graviti dan magnet [6-7, 12, 15-18] seperti yang telah dibuktikan oleh Thompson (1982). Menurut beliau, untuk menentukan kedalaman lokasi sumber graviti atau magnet di sesuatu kawasan kajian serta penentuan profil atau data bergrid dibuat melalui penyelesaian persamaan kehomogenan Euler menggunakan rumus di bawah;

$$(x - x_0) \frac{dF}{dx} + (y - y_0) \frac{dF}{dy} + (z - z_0) \frac{dF}{dz} = -N(F) \quad (5)$$

dimana x_0 , y_0 , dan z_0 merupakan lokasi sumber kedalaman medan graviti anomali F yang diukur dalam unit kartesian pada x , y , z dan N adalah indeks

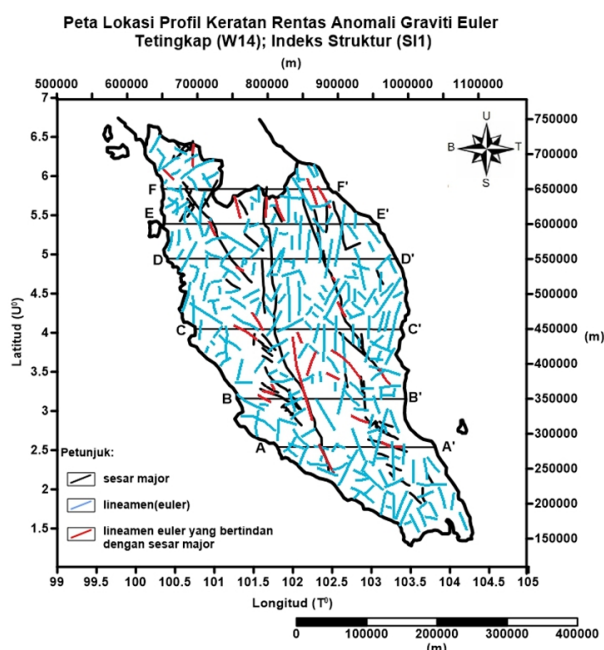
struktur Euler (SI) yang mewakili punca geometri sesuatu jasad [6,19].

Pemetaan struktur telah diperolehi melalui pemetaan taburan sumber anomali Euler. Manakala geometri sesar-sesar yang diperolehi di bawah permukaan bumi dianalisis berdasarkan data dekonvolusi Euler 3D di sepanjang beberapa keratan rentas yang memotong timur-barat Semenanjung Malaysia. Analisis subpermukaan ini merangkumi data graviti yang dapat menganggarkan kedalaman dan sudut kemiringan sesar major yang diketahui serta beberapa sesar yang berhampiran dengannya yang tidak dilaporkan. Anomali graviti Euler di sepanjang enam keratan rentas telah diperolehi menggunakan SI 1 dan W 14 kerana indeks ini memberikan kepadatan data yang paling tinggi berbanding dengan tettingkap yang lain.

4.0 HASIL DAN PERBINCANGAN

4.1 Dekonvolusi 3D Euler

Pemetaan struktur telah diperolehi melalui pemetaan taburan sumber anomali Euler. Manakala geometri sesar-sesar yang diperolehi di bawah permukaan bumi dianalisis berdasarkan data dekonvolusi Euler 3D di sepanjang beberapa keratan rentas yang memotong timur-barat Semenanjung Malaysia. Analisis subpermukaan ini merangkumi data graviti yang dapat menganggarkan kedalaman dan sudut kemiringan sesar major yang diketahui serta beberapa sesar yang berhampiran dengannya yang tidak dilaporkan. Anomali graviti Euler di sepanjang enam keratan rentas telah diperolehi menggunakan SI 1 dan W 14 kerana indeks ini memberikan kepadatan data yang paling tinggi berbanding dengan tettingkap yang lain. Rajah 3 menunjukkan peta Euler ($W14$, $SI1$) yang terdiri daripada lineamen sesar yang disurih berserta dengan kedudukan sesar major berdasarkan maklumat geologi disamping garis-garis profil keratan rentas yang dikaji. Pemilihan garis profil dibuat berdasarkan pemotongan keatas sesar major dan jalur tektonik Semenanjung Malaysia.



Rajah 3 Peta surihan taburan punca anomali Euler graviti W 14 dan SI 1 yang ditindan dengan kedudukan sesar major Semenanjung Malaysia beserta lokasi garis profil keratan rentas Euler

a. Garis Profil A-A'

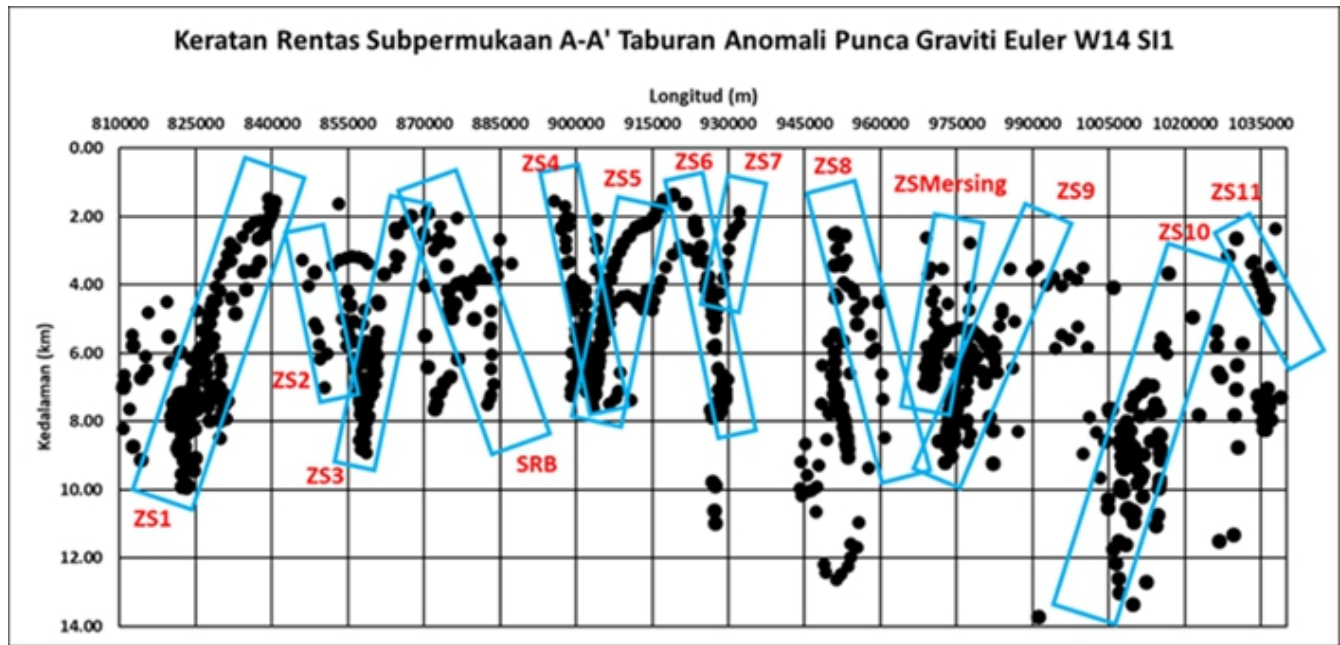
Rajah 4 menunjukkan keratan rentas Euler X-Z profil A-A' sepanjang 226 km yang terletak di longitud 101.2°T dan latitud 3.15°U terdiri daripada 13 zon potensi sesar termasuk zon Sutura Raub-Bentong (SRB) dan zon sesar Mersing (Rajah 3). Maklumat pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas diberikan dalam Jadual 1.

Jadual 1 Pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas profil A-A' berdasarkan taburan anomali Euler W14 SI1

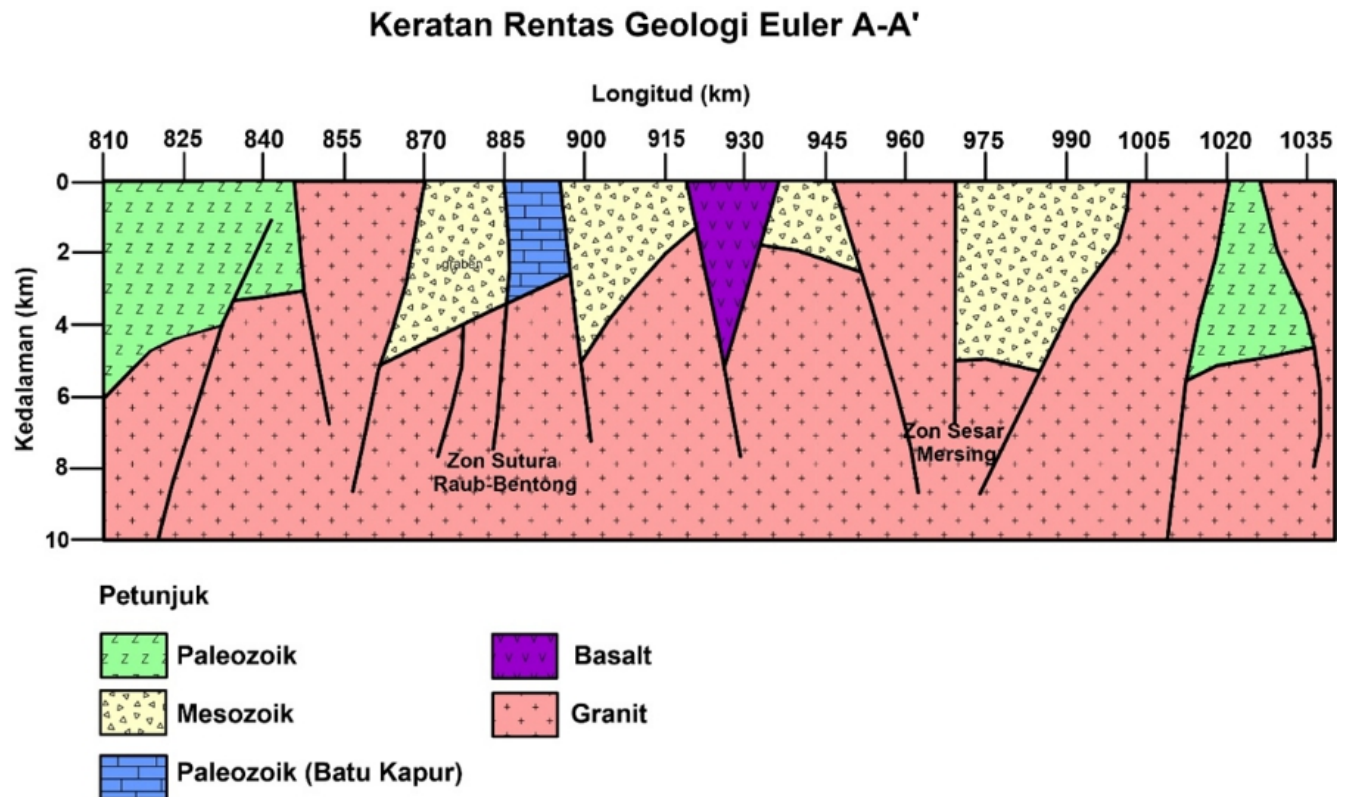
Zon Sesar (ZS)	Kedalaman (km)	Kemiringan (°)
ZS1	10	62
ZS2	7	55
ZS3	9	45
Sutura Raub-Bentong (SRB)	7.5	70
ZS4	7	46
ZS5	7.8	58
ZS6	7.8	50
ZS7	4	69
ZS8	8.5	64
ZS Mersing	6.8	38
ZS9	9	66
ZS10	13	48
ZS11	4.7	75

Zon sesar 1 mempunyai nilai kemiringan sebanyak 62° ke arah barat laut dan berjurus sekitar TL-BD dengan anggaran kedalaman di sekitar 10 km. Manakala bagi zon sesar 2 pula, mempunyai kemiringan ke arah timur dengan nilai 55° yang mempunyai kedalaman di sekitar 7 km. Zon sesar 3 yang mempunyai anggaran kedalaman di sekitar 9 km beserta nilai sudut kemiringan 45° ke arah barat. Zon Sutura Raub-Bentong pada keratan rentas ini mempunyai nilai kemiringan sebanyak 70° dengan anggaran kedalaman di sekitar 7.5 km. Zon sesar 4 mempunyai kemiringan ke arah tenggara dengan sudut 46° dan berjurus sebanyak 45° beserta anggaran kedalaman di sekitar 7 km. Bagi zon sesar 5 pula, nilai kemiringan 58° ke arah barat dengan jurus ke arah timur dengan anggaran kedalaman 7.8 km. Zon sesar 6 mempunyai nilai kemiringan 50° beserta kedalaman di sekitar 7.8 km. Zon sesar 7 yang mempunyai miring ke arah barat dengan sudut 69° dan berjurus ke arah timur dengan anggaran 4 km. Zon sesar 8 pula mempunyai nilai kemiringan sebanyak 64° dengan jurus ke arah BL-TGA dengan kedalaman di sekitar 8.5 km. Zon sesar Mersing pula miring ke arah barat dengan nilai 38° yang berjurus ke arah BL-TGA dengan sudut di sekitar 120° yang mempunyai anggaran kedalaman 6.8 km. Zon sesar 9 pula mempunyai anggaran kedalaman 9 km dengan miring ke arah barat dengan sudut 66° yang berjurus hampir utara-selatan. Zon sesar 10 juga mempunyai miring ke arah barat dengan nilai 48° dengan anggaran kedalaman 13 km yang mempunyai jurus ke arah hampir utara-selatan. Zon sesar 11 pula mempunyai sudut kemiringan 75° ke arah timur dengan anggaran kedalaman di sekitar 4.7 km.

Pemadanan keratan rentas A-A' dengan geologi Semenanjung Malaysia digunakan dalam pentafsiran geologi di sepanjang keratan rentas tersebut. Rajah 5 menunjukkan keratan rentas geologi dari sempadan Selat Melaka ke arah Laut China Selatan memotong jalur tektonik barat, tengah dan timur semenanjung. Pada amnya, kedalaman maksimum pentafsiran geologi adalah di sekitar 10 km yang terdiri daripada batuan dasar granit. Batuan granit tersebut dipercayai berusia Jura-Kapur yang menerobos batuan Mesozoik dan Paleozoik sehingga menghasilkan fenomena sesar-sesar besar dan batuan sisa bumbung (roof pendant). Blok-blok Mesozoik membentuk graben dan separa graben dan terletak di bahagian tengah keratan rentas iaitu mewakili jalur tengah. Walau bagaimana pun terdapat juga batuan Paleozoik jenis berkapur diantara batuan Mesozoik. Kedalaman batuan Mesozoik dan Paleozoik berdasarkan keratan rentas Euler ialah dalam anggaran 4-6 km. Kedudukan zon SRB dan zon sesar Mersing adalah ditunjukkan dalam rajah tersebut. Kedudukan lava basalt yang merejah dari magma batolit granit berada di sekitar 915 km-935 km dengan kelebaran 20 km dan kedalaman 6 km.



Rajah 4 Keratan rentas subpermukaan A-A' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1



Rajah 5 Keratan rentas geologi A-A' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1

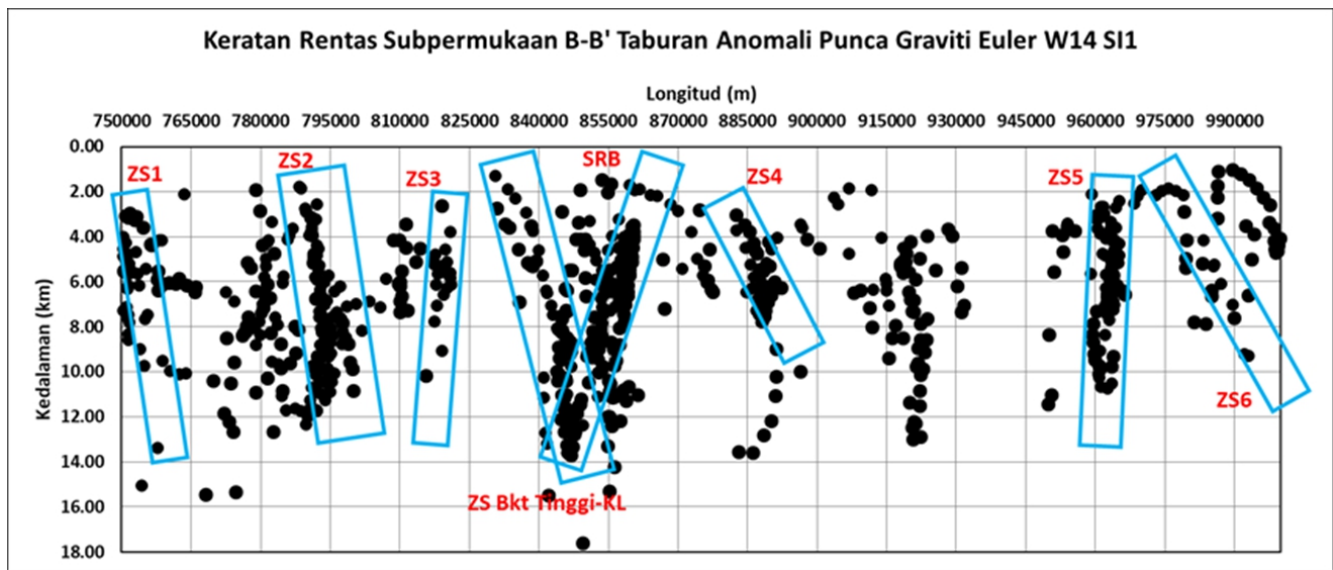
b. Garis Profil B-B'

Keratan rentas profil B-B' yang terletak di longitud 101.2°T dan latitud 3.15°U merentasi sepanjang 237 km ditunjukkan dalam Rajah 5 Berdasarkan taburan

titik kedalaman anomali di sepanjang keratan rentas, titik-titik yang membentuk garis linear atau hampir linear ditafsirkan sebagai kedudukan zon struktur yang menganjur dari permukaan sehingga pada

kedalaman dan kemiringan tertentu. Berdasarkan ciri-ciri ini, sebanyak 5 zon sesar telah dikenalpasti termasuk zon sesar Bukit Tinggi-Kuala Lumpur dan zon Sutura Raub-Bentong seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6. Maklumat pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas diberikan dalam Jadual 2. Sesar paling barat berdasarkan taburan punca anomali diberikan sebagai ZS1 yang mempunyai kemiringan ke arah timur laut sebesar 49° dengan jurus BL-TGA dengan kedalaman 13.4 km. Manakala ZS2 pada kedalaman maksimum 11.8 km juga berada pada jurus BL-TGA dengan kemiringan ke arah timur laut sebesar 48° . Zon sesar 3 adalah lebih cetek iaitu pada kedalaman 10 km didapati miring ke arah barat sebesar 66° . Ke arah timur dari ZS3 sejauh 20 km terdapat zon sesar Kuala Lumpur-Bukit Tinggi dengan kemiringan 35° ke arah U80⁰T berdasarkan arah jurus

yang disukat hampir utara-selatan iaitu U350⁰T. Anggaran kedalaman bagi zon sesar ini ialah di sekitar 13 km. Berdasarkan peta Euler, kedudukan lineamen Euler bagi SRB didapati sangat tepat bertindan dengan kedudukan zon SRB berdasarkan maklumat geologi pada garis profil B-B'. Jurus zon SRB ialah di sekitar U350⁰T dan kemiringan yang disukat adalah 12° ke arah U80⁰T dengan kedalaman maksimum ialah 13 km. Zon sesar 4 pula mempunyai nilai sudut kemiringan sebanyak 65° ke arah timur dengan kedalaman maksimum sebanyak 8 km. Manakala bagi zon sesar 5 pula, kedalaman maksimum yang dianggarkan adalah 10.5 km dengan nilai sudut kemiringan sebanyak 58° . Zon sesar 6 mempunyai sudut kemiringan sebanyak 24° dengan anggaran kedalaman sebanyak 9.3 km.

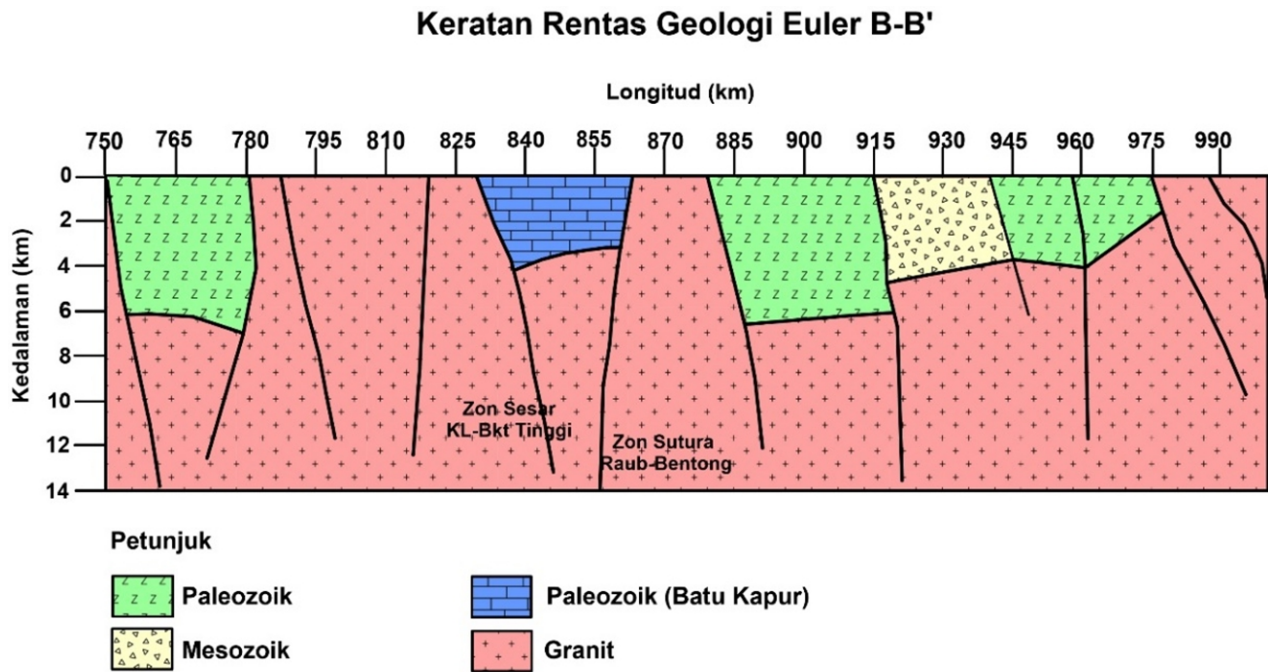


Rajah 6 Keratan rentas subpermukaan B-B' taburan anomali punca graviti Euler W14 S11

Jadual 2 Pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas profil B-B' berdasarkan taburan anomali Euler W14 S11

Zon Sesar (ZS)	Kedalaman (km)	Kemiringan ($^\circ$)
ZS1	13.4	49
ZS2	11.8	48
ZS3	10	66
ZS Bukit Tinggi-Kuala Lumpur	13	35
Sutura Raub-Bentong	13	56
ZS4	8	65
ZS5	10.5	58
ZS6	9.3	24

Keratan rentas geologi B-B' juga menunjukkan hasil perejahan granit kedalaman batuan metamorf yang turut menghasilkan fenomena yang hampir sama dengan keratan rentas A-A' iaitu graben dan struktur sisa rabung yang tersesar (Rajah 7). Dalam keratan rentas ini hanya terdapat satu blok batuan Mesozoik yang diapit oleh batuan Paleozoik membentuk separa graben pada kedalaman dari 3 km-6 km sepanjang 100 km. Batuan Paleozoik berkapur juga membentuk struktur graben didasari oleh batuan granit pada kedalaman 3 km-4 km di sekitar zon sesar Kuala Lumpur-Bukit Tinggi dan zon Sutura Raub-Bentong. Batuan Paleozoik pada bahagian paling barat juga dibatasi oleh sesar besar membentuk struktur graben dengan kedalaman maksimum di sekitar 6 km.



Rajah 7 Keratan rentas geologi B-B' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1

c. Garis Profil C-C'

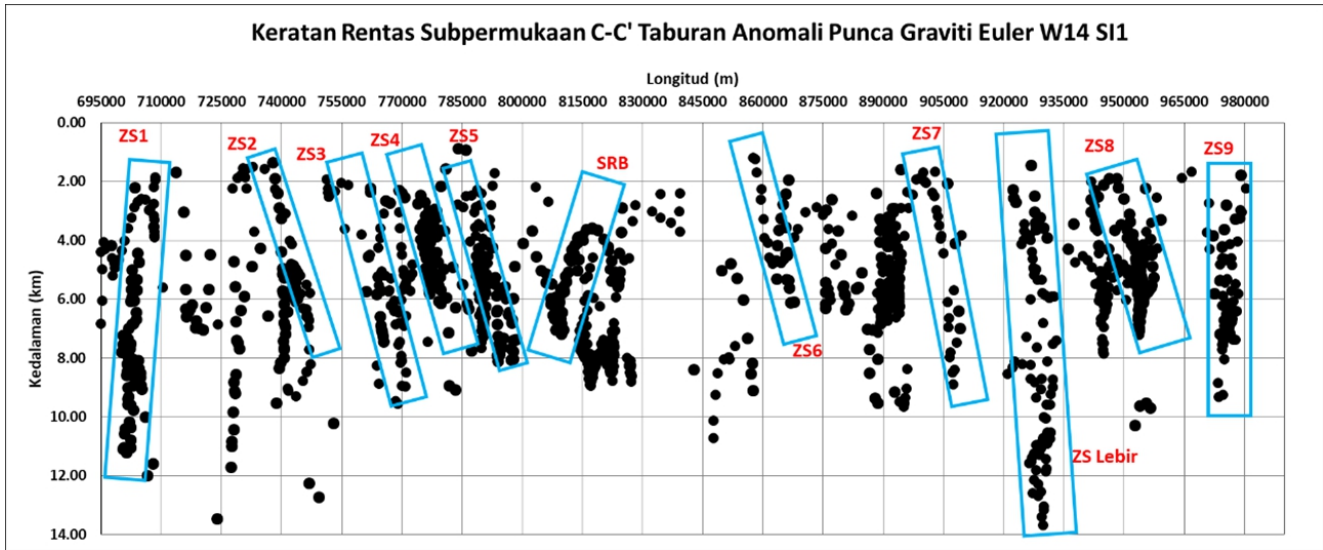
Garis profil C-C' dengan panjang 290km terletak di longitud 100.7^oT dan latitud 4.04^oU (Rajah 8). Keratan rentas yang dibina di sepanjang garis profil C-C' ini terdiri daripada 9 zon sesar telah dikenalpasti termasuk zon Sutura Raub-Bentong dan zon sesar Lebir (Rajah 8). Maklumat pencirian setiap zon sesar ini ditunjukkan dalam Jadual 3. Bagi zon sesar 1 nilai sudut kemiringan yang disukat ialah 72^o dengan anggaran kedalaman di sekitar 11 km. Bagi zon sesar 2 pula mempunyai nilai sudut kemiringan 30^o ke arah timur dan berjurus ke arah timur laut-barat daya berserta kedalaman maksimum sebanyak 8.5 km. Zon sesar 3 juga miring ke arah timur dengan sudut kemiringan sebanyak 24^o dan berjurus ke arah barat laut-tenggara dengan kedalaman maksimum adalah 9 km. Manakala bagi zon sesar 4, sudut kemiringan yang disukat ialah 23^o berserta kedalaman di sekitar 7.7 km. Zon sesar 5 yang terletak 8km dari timur zon sesar 4, mempunyai sudut kemiringan 31^o yang berarah timur berserta jurus ke barat laut-tenggara. Anggaran kedalaman bagi zon sesar 5 ini ialah 8 km. Jurus zon SRB ialah di sekitar U350^oT dan kemiringan yang disukat adalah 71^o ke arah U80^oT dengan kedalaman maksimum ialah 7 km. Bagi zon sesar 6, sudut kemiringan yang disukat ialah 27^o berarah ke tenggara dengan kedalaman maksimum ialah 6 km. Manakala bagi zon sesar 7 pula, nilai sudut kemiringan yang diperolehi ialah 58^o dengan anggaran kedalaman di sekitar 8.9 km. Bagi zon sesar Lebir, nilai sudut kemiringan yang disukat ialah 80^o berarah tenggara dan berjurus ke arah barat laut-tenggara dengan kedalaman maksimum 17.6 km. Zon sesar 8 mempunyai nilai sudut

kemiringan sebanyak 58^o dengan kedalaman maksimum sebanyak 7 km. Zon sesar 9 pula mempunyai nilai kemiringan 64^o berarah tenggara dengan jurus ke arah timur laut-barat daya.

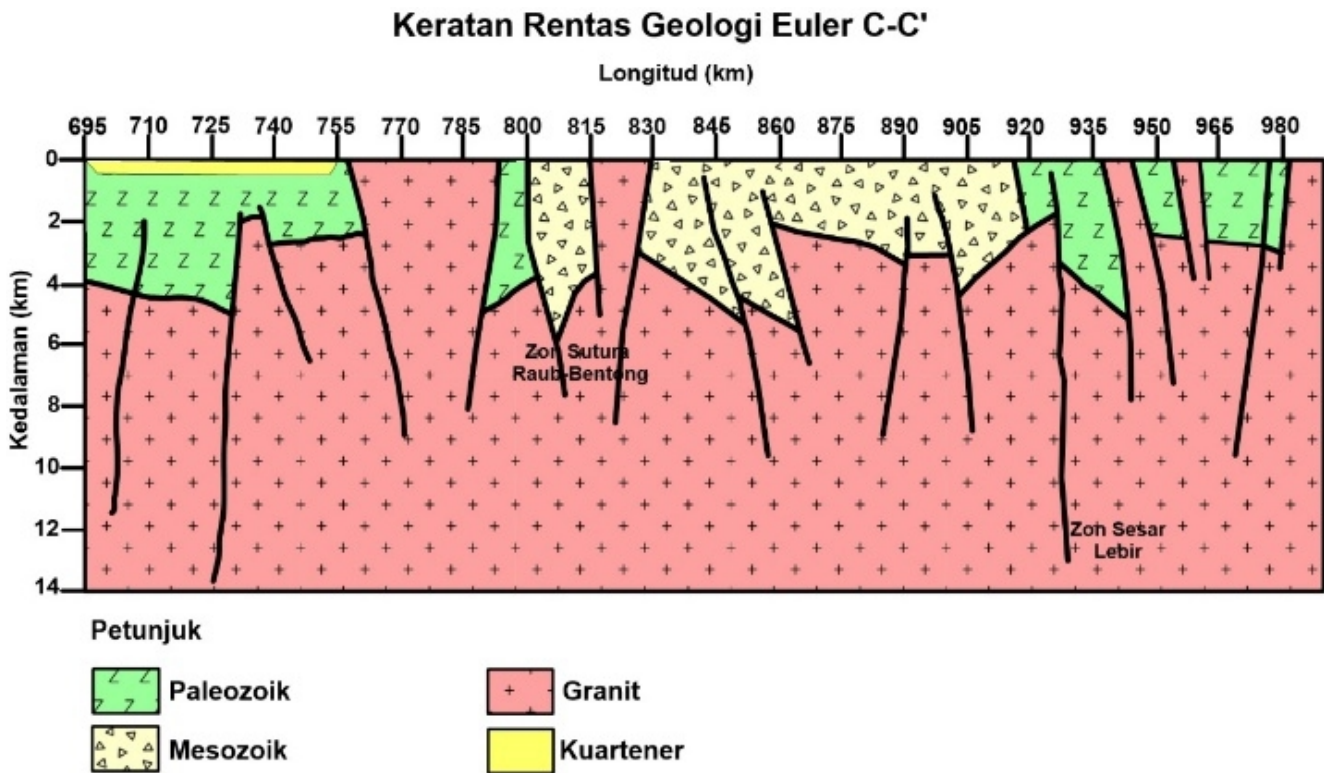
Jadual 3 Pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas profil C-C' berdasarkan taburan anomali Euler W14 S11

Zon Sesar (ZS)	Kedalaman (km)	Kemiringan (°)
ZS1	11	72
ZS2	8.5	30
ZS3	9	24
ZS4	7.7	23
ZS5	8	31
Sutura Raub-Bentong	7	71
ZS6	6	27
ZS7	8.9	58
ZS Lebir	17.6	80
ZS8	7	58
ZS9	9.3	64

Keratan rentas geologi C-C' yang ditunjukkan dalam Rajah 9 mempamerkan struktur sesar yang lebih rencam memotong kompleks granit dan juga batuan metamorf berdasarkan keratan rentas Euler. Purata kedalaman batuan metasedimen yang dibatasi oleh batuan granit adalah di antara 2 km-4 km. Kebanyakan struktur sesar adalah jenis separuh graben yang memotong batuan Paleozoik di jalur timur dan barat dan Mesozoik di jalur tengah.



Rajah 8 Keratan rentas subpermukaan C-C' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1



Rajah 9 Keratan rentas geologi C-C' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1

d. Garis Profil D-D'

Keratan rentas profil D-D' yang terletak di longitud 104°T dan latitud 4.95°U sepanjang 330 km (Rajah 10) yang terdiri daripada 8 zon sesar termasuk zon sesar Bok Bak, zon Sutura Raub-Bentong, dan zon sesar Lebir. Maklumat pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas diberikan dalam Jadual 4. Berdasarkan keratan rentas yang ditunjukkan dalam

Rajah 10, zon sesar Bok Bak yang berjurus 320° mempunyai nilai sudut kemiringan 51° ke arah timur dengan kedalaman maksimum 6.1 km. Bagi zon sesar 1 nilai sudut kemiringan yang disukat ialah 46° berarah barat dengan jurus berarah timur laut dan anggaran kedalaman di sekitar 9.2 km. Kedudukan zon SRB pada garis profil ini mempunyai nilai sudut kemiringan 36° ke arah barat dan berjurus hampir utara-selatan dengan kedalaman maksimum di

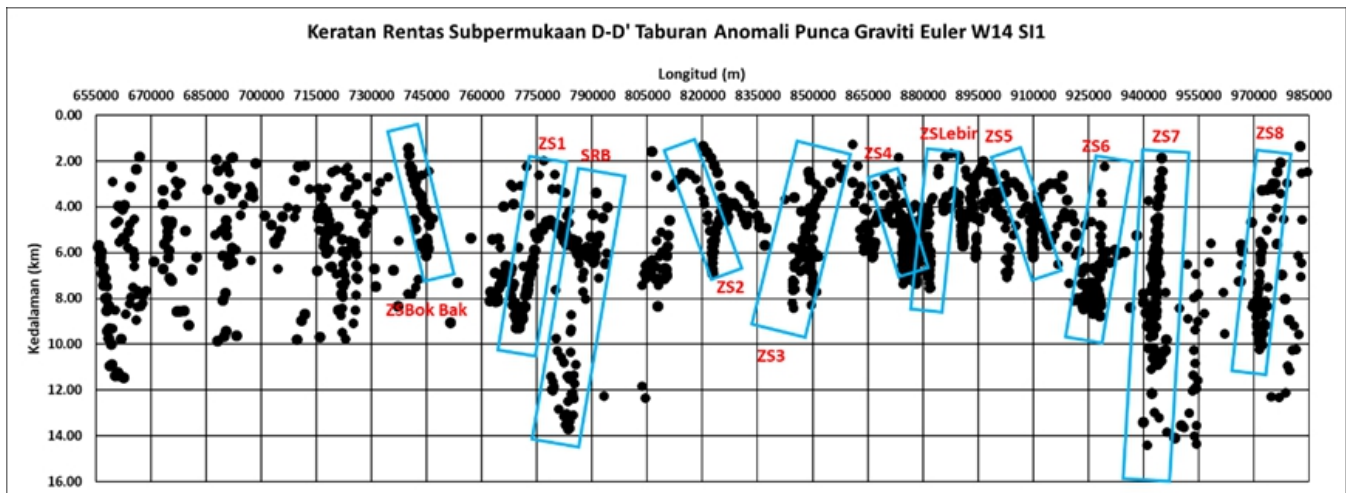
sekitar 13.7 km. Bagi zon sesar 2, sudut kemiringan yang diperolehi ialah 62° ke arah timur laut-barat daya berjurus barat laut-tenggara dengan anggaran kedalaman di sekitar 7 km. Zon sesar 3 pada keratan rentas ini mempunyai sudut kemiringan 69° ke arah barat daya yang berjurus ke arah barat laut-tenggara dengan kedalaman maksimum 8.2 km. Zon sesar 4 pula mempunyai sudut kemiringan 55° yang berarah timur beserta kedalaman maksimum 6.4 km. Bagi zon sesar Lebir dengan sudut kemiringan 26° yang berarah barat dengan jurus ke arah barat laut-tenggara beserta anggaran kedalaman 7.4 km. Bagi zon sesar 5 pula sudut kemiringan yang disukat ialah 68° ke arah timur dengan jurus timur laut-barat daya beserta kedalaman maksimum ialah 6.2 km. Zon sesar 6 pula mempunyai 18° sudut kemiringan yang berarah barat dengan kedalaman 8.8 km. Bagi zon sesar 7 pula, mempunyai sudut kemiringan sebanyak 17° dengan anggaran kedalaman di sekitar 14.1 km. Zon sesar 8 pula mempunyai sudut kemiringan 40° dengan anggaran kedalaman 10.2 km.

Keratan rentas geologi D-D' menunjukkan jasad batolit banjaran granit Titiwangsa selebar 90 km yang terdapat dalamnya sesar Bok Bak yang berkedalaman 6 km-8 km (Rajah 11). Pembentukan rejaman granit ini telah melonjakkan blok tersesar kepingan batuan Paleozoik selebar 15 km di bahagian timur banjaran Titiwangsa dan blok tersesar kepingan Mesozoik di sebelah barat

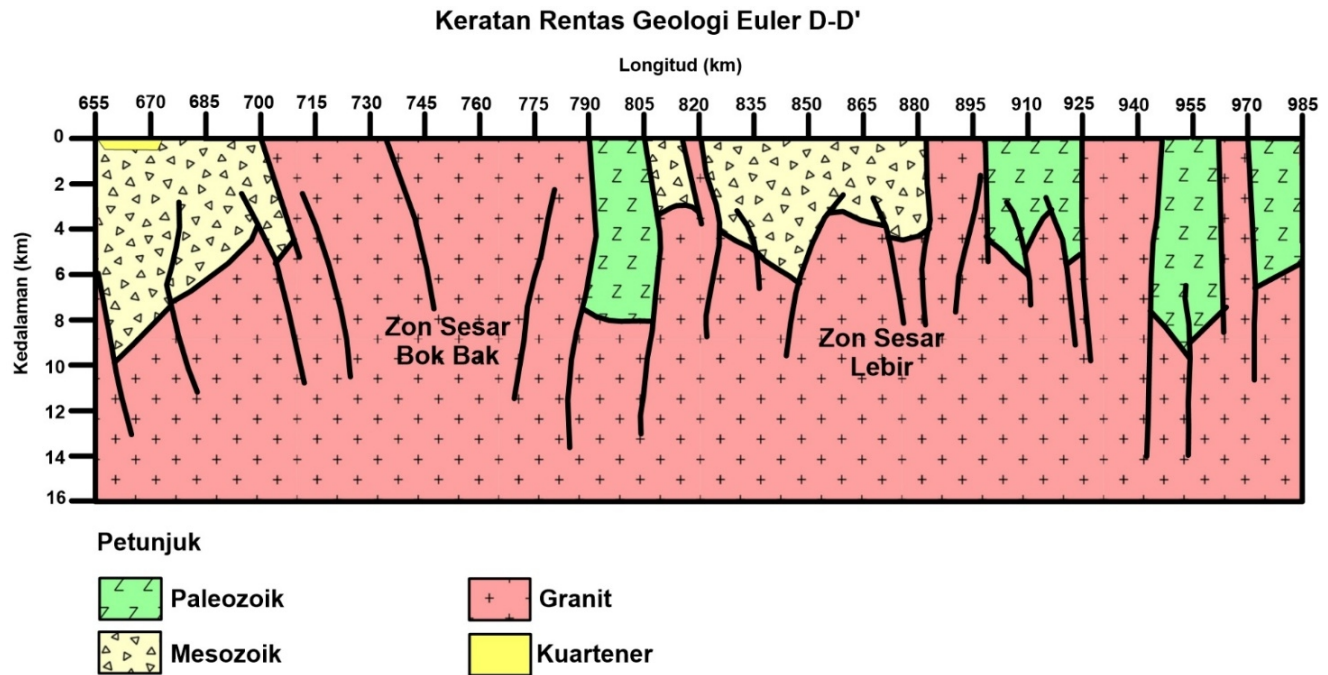
banjaran yang mempunyai kelebaran 45 km. Batuan sisa rabung jelas dibentuk oleh batuan Mesozoik yang didasari oleh batuan granit dalam kompleks zon sesar Lebir. Tiga kepingan nipis batuan Paleozoik selebar 15 km-30 km berada di antara kompleks jalur timur yang menunjukkan banyak sesar.

Jadual 4 Pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas profil D-D' berdasarkan taburan anomali Euler W14 S11

Zon Sesar (ZS)	Kedalaman (km)	Kemiringan (°)
ZS Bok Bak	6.1	51
ZS1	9.2	46
Sutura Raub-Bentong	13.7	36
ZS2	7	62
ZS3	8.2	69
ZS4	6.4	55
ZS Lebir	7.4	26
ZS5	6.2	68
ZS6	8.8	18
ZS7	14.4	17
ZS8	10.2	40



Rajah 10 Keratan rentas subpermukaan D-D' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1



Rajah 11 Keratan rentas geologi D-D'' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1

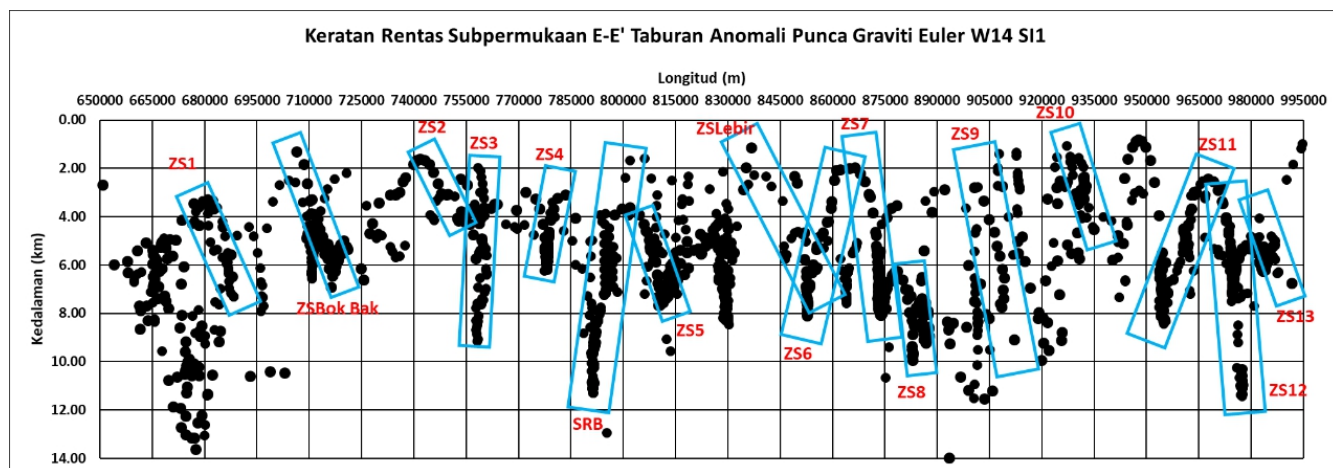
e. Garis Profil E-E'

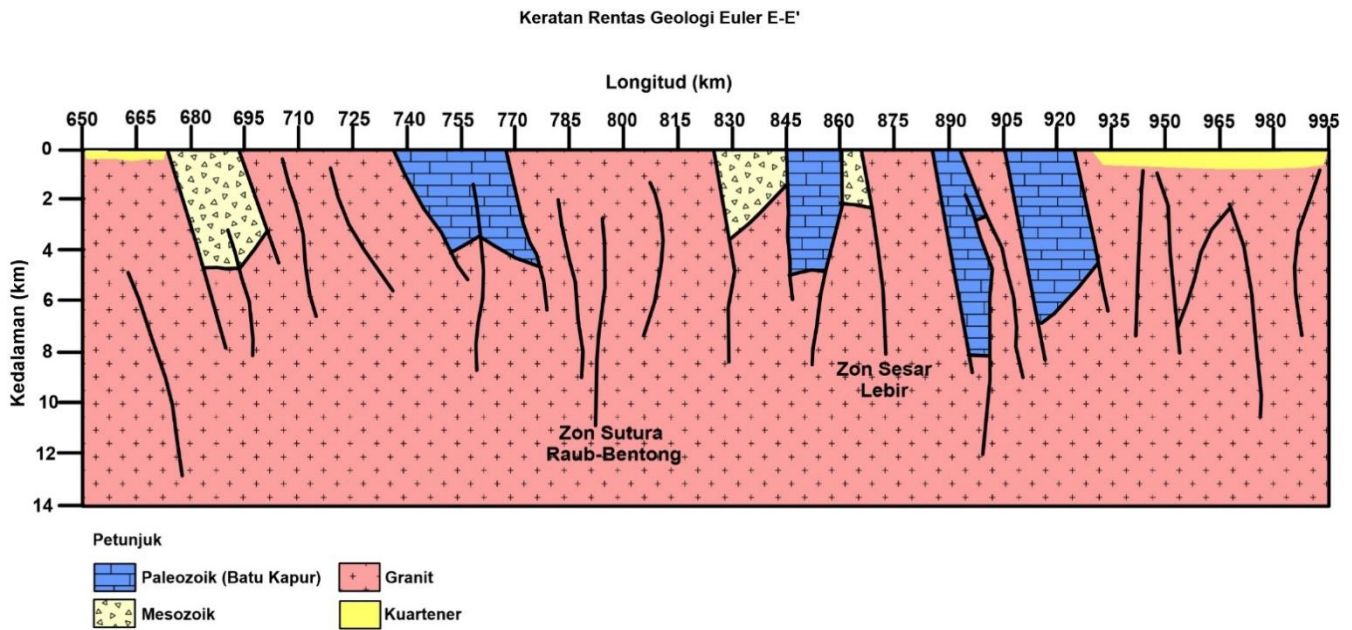
Garis profil E-E' sepanjang 300 km terletak di longitud 100.7°T dan latitud 4.04°U (Rajah 12). Keratan rentas yang ditunjukkan dalam Rajah 12 terdiri daripada 13 potensi sesar termasuk zon sesar Bok Bak, zon SRB dan zon sesar Lebir. Bagi zon sesar 1, sudut kemiringan yang disukat adalah 63° ke arah timur yang berjurus utara-selatan dengan anggaran kedalaman maksimum sebanyak 7.3 km Berdasarkan peta Euler, kedudukan lineamen Euler bagi zon sesar Bok Bak didapati bertindan menghampiri dengan kedudukan zon sesar Bok Bak berdasarkan maklumat geologi pada garis profil E-E'. Zon ini mempunyai nilai sudut kemiringan 60° dengan kedalaman maksimum 7.3 km yang berjurus U330°T seperti yang dilaporkan oleh Burton (1965). Bagi zon sesar 2, sudut kemiringan yang disukat adalah 72° dengan kedalaman maksimum ialah 4.2 km. Zon sesar 3 yang mempunyai anggaran kedalaman di sekitar 9.2 km mempunyai sudut kemiringan berjumlah 35°. Diikuti dengan zon sesar 4 yang mempunyai sudut kemiringan 52° berserta kedalaman maksimum 6.2 km. Bagi zon SRB pula, kedalaman anggaran yang dicerap adalah 11.2 km dengan sudut kemiringan bernilai 48° ke arah barat dengan jurus utara-selatan. Zon sesar 5 pula mempunyai sudut kemiringan 67° ke arah tenggara dengan jurus timur laut-barat daya berserta kedalaman maksimum di sekitar 7.5 km. Bagi

zon sesar Lebir di keratan rentas ini, nilai sudut kemiringan yang disukat ialah 77° ke arah utara timur laut yang berjurus utara barat laut-selatan tenggara dengan anggaran kedalaman di sekitar 7 km. Zon sesar 6 pula mempunyai sudut kemiringan 55° berarah timur laut dengan jurus ke arah barat laut-tenggara berserta kedalaman maksimum sebanyak 8.2 km. Zon sesar 7 juga mempunyai nilai kedalaman maksimum seperti zon sesar 6 ialah 8.2 km namun sudut kemiringan yang disukat ialah 37° ke arah timur laut. Zon sesar 8 pula mempunyai sudut kemiringan di sekitar 67° ke arah utara timur laut yang berjurus ke arah utara barat laut-selatan barat daya dengan anggaran kedalaman yang berjumlah 9 km. Bagi zon sesar 9 yang mempunyai sudut kemiringan 67° ke arah utara timur laut dengan kedalaman yang dianggarkan di sekitar 9 km. Zon sesar 10 terletak 20 km dari timur zon sesar 9, mempunyai nilai sudut kemiringan 66° ke arah utara timur laut dengan kedalaman maksimum 4.5 km. Zon sesar 11 pula mempunyai sudut kemiringan 65° yang berarah timur laut-barat daya berserta anggaran kedalaman di sekitar 8.5 km. Manakala bagi zon sesar 12, kedalaman yang disukat adalah di sekitar 11.4 km dengan sudut kemiringan di sekitar 33°. Zon sesar 12 pula mempunyai sudut kemiringan sebanyak 74° dengan kedalaman maksimum di sekitar 6.8 km. Maklumat pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas diberikan dalam Jadual 5.

Jadual 5 Pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas profil E-E' berdasarkan taburan anomali Euler W14 S11

Zon Sesar (ZS)	Kedalaman (km)	Kemiringan ($^{\circ}$)
ZS1	7.3	63
ZS Bok Bak	7	60
ZS2	4.2	72
ZS3	9.2	35
ZS4	6.2	52
Sutura Raub-Bentong	11.2	48
ZS5	7.5	67
ZS Lebir	7	77
ZS6	8.2	55
ZS7	8.2	37
ZS8	10	67
ZS9	9	67
ZS10	4.5	66
ZS11	8.5	65
ZS12	11.4	33
ZS13	6.8	74

**Rajah 12** Keratan rentas subpermukaan E-E' taburan anomali punca graviti Euler W14 S11



Rajah 13 Keratan rentas geologi E-E'' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1

Rajah 13 menunjukkan keratan rentas geologi E-E' iaitu yang terletak di bahagian utara Semenanjung Malaysia hanya menunjukkan batuan granit dominan yang memotong sebahagian kecil batuan Paleozoik jenis berkapur dan batuan Mesozoik. Pada umumnya, batuan granit didapati banyak tersesar dimana kedudukan zon sesar Lebir dan zon Sutura Raub-Bentong dapat dianggarkan kedudukannya. Kebanyakan sesar dikesan sehingga pada kedalaman 12 km berdasarkan anomali Euler. Batuan Mesozoik dan Paleozoik yang terpotong berbentuk kepingan nipis yang memanjang ke arah dalam bumi.

f. Garis Profil F-F'

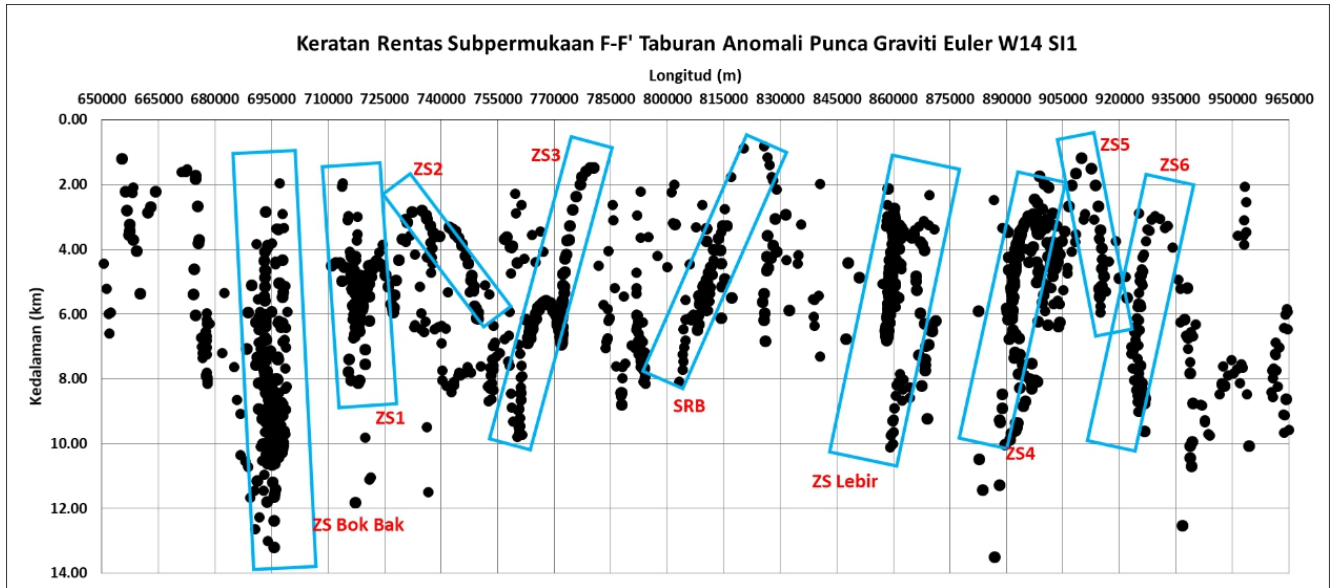
Garis profil F-F' dengan panjang 240 km terletak utara Semenanjung Malaysia dengan longitud 100.3⁰T dan latitud 5.8 ⁰U (Rajah 14). Keratan rentas ini terdiri daripada 6 zon potensi sesar termasuk zon sesar Bok Bak, zon Sutura Raub-Bentong dan zon sesar Lebir seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 14. Berdasarkan keratan rentas ini, zon sesar Bok Bak ini mempunyai sudut kemiringan 14⁰ berarah timur laut-barat daya dengan jurus 320⁰ berserta anggaran kedalaman di sekitar 13.2 km. Zon sesar 1 pula mempunyai nilai sudut kemiringan 25⁰ ke arah timur dengan jurus utara timur laut-selatan barat daya dan kedalaman di sekitar 8.2 km. Zon sesar 2 yang mempunyai sudut kemiringan yang disukat 82⁰ ke arah timur laut dengan jurus utara barat laut-selatan tenggara berserta kedalaman 4.2 km. Zon sesar 3 pula mempunyai sudut kemiringan di sekitar 69⁰ yang berarah barat dengan jurus hampir utara-selatan berserta kedalaman 5.8 km. Bagi zon Sutura Raub-Bentong, sudut kemiringan yang disukat ialah 69⁰ juga ke arah barat seperti zon sesar 3 berserta kedalaman maksimum di sekitar 9.8 km. Zon sesar Lebir mempunyai sudut kemiringan 18⁰ ke arah barat

dengan kedalaman maksimum 10.2 km. Bagi zon sesar 4, anggaran kedalaman yang diperolehi adalah di sekitar 10 km dengan sudut kemiringan sebanyak 30⁰. Zon sesar 5, sudut kemiringan yang disukat ialah 48⁰ berserta kedalaman maksimum 6 km. Zon sesar 6 pula mempunyai nilai sudut kemiringan sebanyak 24⁰ dengan kedalaman di sekitar 9 km. Maklumat pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas diberikan dalam Jadual 6.

Jadual 6 Pencirian zon sesar di sepanjang keratan rentas profil F-F' berdasarkan taburan anomali Euler W14 S1

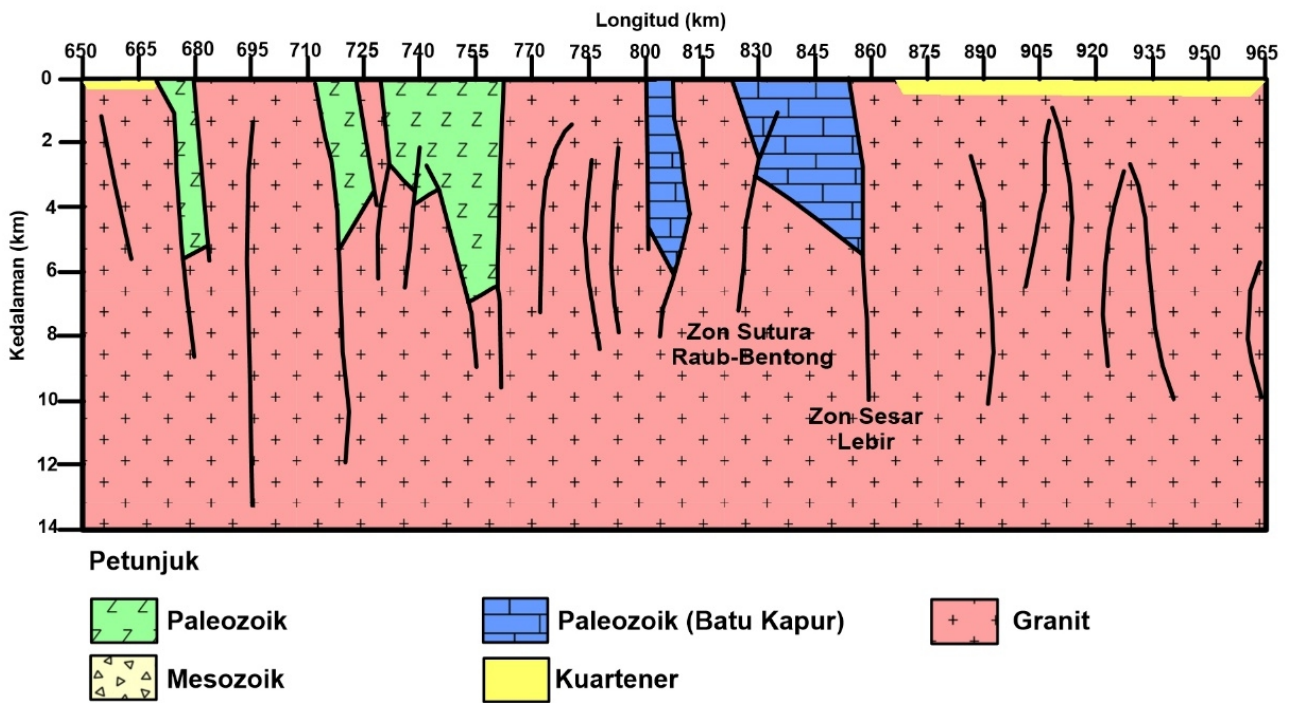
Zon Sesar (ZS)	Kedalaman (km)	Kemiringan (°)
ZS Bok Bak	13.2	14
ZS1	8.2	25
ZS2	4.2	82
ZS3	5.8	69
Sutura Raub-Bentong	9.8	69
ZS Lebir	10.2	18
ZS4	10	30
ZS5	6	48
ZS6	9	24

Keratan rentas geologi F-F' merupakan keratan rentas geologi paling utara dan paling pendek iaitu di sekitar 315 km. Keratan ini pada keseluruhannya menunjukkan kompleks granit dan sedikit batuan Paleozoik yang dibatasi oleh sesar Lebir dan zon SRB. Kelebaran batuan Paleozoik tersebut adalah di sekitar 15-30 km dengan kedalaman mencapai 8 km (Rajah 15).



Rajah 14 Keratan rentas subpermukaan E-E' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1

Keratan Rentas Geologi Euler F-F'



Rajah 15 Keratan rentas geologi E-E' taburan anomali punca graviti Euler W14 S1

4.0 KESIMPULAN

Berdasarkan kesemua hasil yang diperolehi sepanjang enam profil, keseluruhan Semenanjung Malaysia dari arah timur ke barat adalah terdiri daripada blok-blok yang tersesar membentuk graben dan separuh graben pada arah jurus dominan utara-selatan dan barat barat laut-timur tenggara. Ini dibuktikan dengan peta taburan punca anomali Euler yang berkedudukan setara dengan peta struktur tektonik Semenanjung Malaysia dan peta keratan rentas profil kedalaman anomali Euler yang menunjukkan kedudukan sesar-sesar tersebut di bahagian dalam bumi pada kedalaman maksimum sehingga 14 km.

Penghargaan

Setinggi-tinggi penghargaan kepada Program Geologi Universiti Kebangsaan Malaysia kerana memberi kebenaran menggunakan kemudahan di Program Geologi dan kepada *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)* kerana kemudahan memuat turun data bagi penyelidikan ini.

Rujukan

- [1] Lyatsky, H. V. 2010. Magnetic and Gravity Methods in Mineral Exploration: The Value of Well-Rounded Geophysical Skills. *CSEG RECORDER* 2010. 30-35.
- [2] Unternehr, P., G. Péron-Pinvidic, G. Manatschal, and E. Sutra, 2010. Hyper-extended Crust in the South Atlantic: In Search of a Model. *Petroleum Geoscience*. 16: 207-215. DOI: <https://doi.org/10.1144/1354-079309-904>.
- [3] Gosh, G. K., and Dasgupta, R. 2013. Edge Detection and Depth Estimation using 3D Euler Deconvolution, Tilt Angle Derivative and TDX Derivative using Magnetic Data of Thrust Fold Belt Area of Mizoram. *10th Biennial International Conference & Exposition*. 1- 7.
- [4] Bai, Y., Williams, S. E., Muller, R. D., Liu, Z., and Hosseinpour, M. 2014. Mapping Crustal Thickness using Marine Gravity Data: Methods and Uncertainties. *Geophysics*. 79(2): 27-36 DOI: <https://doi.org/10.1190/geo2013-0270.1>.
- [5] Thurston, J. B. and Smith R. S. 1997. Automatic Conversion of Magnetic Data to Depth, Dip, and Susceptibility Contrast Using SPITM Method. *Geophysics*. 62: 807-813 DOI : <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444190>.
- [6] Thompson, D. T. 1982. EULDPH: A New Technique for Making Computer-assisted Depth Estimates from Magnetic Data. *Geophysics*. 47: 31-37 DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1441278>.
- [7] Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., and Somerton, I. W. 1990. Magnetic Interpretation in Three Dimensions Using Euler Deconvolution. *Geophysics*. 55: 80-91 DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1442774>.
- [8] Zhang, C., Mushayandebvu, M. F., Reid A. B., Fairhead J. D., and Odegard M. E. 2000. Euler Deconvolution of Gravity Tensor Gradient Data. *Geophysics*. 65: 512-520. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444745>.
- [9] Cooper, G. R. J. 2004. Euler Deconvolution Applied to Potential Field Gradients. *Exploration Geophysics*. 35: 165-170. DOI: <http://dx.doi.org/10.1071/EG04165>.
- [10] Hill, P., Vankey, B., Langenheim, V. 1997. *Introduction to Potential Fields: Magnetism*. USGS.
- [11] Ghosh, G. K., and C. L. Singh. 2014. Spectral Analysis and Euler Deconvolution Technique of Gravity Data to Decipher the Basement Depth in the DehradunBadrinath Area. *J. Geol. Soc. India*. 83(5): 501-512. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12594-014-0077-3>.
- [12] Ghosh, G. K. 2016. Interpretation of Gravity Data using 3D Euler Deconvolution, Tilt Angle, Horizontal Tilt Angle and Source Edge Approximation of the North-West Himalaya. *Acta Geophysica*. 64(4): 1112-1138. DOI: <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0042>.
- [13] Ng Tham Fatt. 1994. Microstructures of the Deformed Granites of Eastern Kuala Lumpur - Implications for Mechanisms and Temperatures of Deformation. *Geol. Soc. Malaysia, Bulletin*. 35: 47-59.
- [14] Mustaffa Kamal Shuib. 2009. Major Faults (in) Hutchison, C. S. and Tan, D. K. 2009 *Geology of Peninsular Malaysia*. *Geological Society of Malaysia*. 252.
- [15] Cooper, G. R. J., and D. R. Cowan. 2004. Filtering Using Variable Order Vertical Derivatives. *Computers & Geosciences*. 30: 455-459 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.001>.
- [16] Mushayandebvu, M. F., V. Lesur, Reid, A. B., and Fairhead, J. D. 2004. Grid Euler Deconvolution with Constraints for 2D Structures. *Geophysics*. 69(2): 489-496.
- [17] Gout, R. E., Khattach, D., Houari, M-R., Kaufmann, O. & Aqil, H. 2010. Main Structural Lineaments of North-Eastern Morocco Derived from Gravity and Aeromagnetic Data. *Journal of African Earth Sciences*. 58: 255-271.
- [18] Ghosh, G. K. & Dasgupta, R. 2013. Edge Detection and Depth Estimation Using 3D Euler Deconvolution, Tilt angle Derivatives and TDX Derivatives using Magnetic Data of Thrust Fold Belt Area of Mizoram. *10th Biennial International Conference & Exposition*. DOI: <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0042>.
- [19] Reid, A. B. 1997. Euler Deconvolution, Past, Present and Future: A Review. *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Edited by A. G. Gubins. 1997. 861-864.