

## ARTIKEL RISET

# Tinjauan Perubahan Stress Coulomb Ko-Seismik Pada Sekuens Gempa Palu M 7,5 28 September 2018

Elvira Mardhatillah\*, Ade Anggraini and Mochamad Nukman

Received: July 29, 2020 | Accepted: Aug. 05, 2020 | Published: Dec. 21, 2020 | DOI: 10.22146/jfi.v24i3.58237

## Ringkasan

Pada tanggal 28 September 2018 Kota Palu dan sekitarnya diguncang gempa dengan kekuatan M 7,5. Gempa tersebut diikuti serangkaian gempa susulan di mana tujuh diantaranya mempunyai kekuatan yang cukup besar ( $M > 4,5$ ). Untuk memahami interaksi gempa utama dan gempa susulan, pada penelitian ini dilakukan analisis perubahan stress Coulomb statis yang disebabkan oleh gempa utama M 7,5 (ko-seismik) terhadap gempa susulannya. Dengan menggunakan program Coulomb 3.3, perubahan stress Coulomb statis dihitung berdasarkan model patahan sumber (gempa utama) dan mekanisme sumber patahan penerima (gempa susulan). Dalam penelitian ini digunakan enam (6) model patahan sumber dari studi yang sudah ada sebelumnya yaitu berdasarkan pengolahan data InSAR, teleseismik, dan *broadband*, serta satu (1) model usulan berupa bidang patahan segmen tunggal dengan distribusi slip yang seragam. Perhitungan perubahan stress Coulomb statis dilakukan dengan mode *specified fault* dimana *receiver fault* merupakan tujuh gempa susulan yang memiliki magnitudo signifikan ( $M > 4,5$ ). Model baru yang dibangun memiliki perhitungan perubahan stress Coulomb statis di nodal plane I menunjukkan empat dari tujuh gempa susulan (57%) dan nodal plane II enam dari tujuh gempa susulan (86%) berada pada pola merah (nilai stress Coulomb positif). Hasil perhitungan menunjukkan sebagian besar gempa susulan terletak pada pola merah ( $\Delta\sigma_f > 0$ ) yaitu daerah dengan peningkatan stress atau dengan kata lain gempa susulan tersebut dipicu oleh gempa utama. Model patahan dengan dua segmen patahan yang terletak di darat dan di laut, merupakan model bidang patahan sumber terbaik yang dapat menjelaskan terjadinya gempa susulan. Dibandingkan dengan model lain, model ini memiliki persentase terbesar dari tujuh gempa susulan yang terjadi pada pola merah. Peta distribusi peningkatan stress yang disebabkan oleh gempa utama adalah data penting untuk mitigasi bencana. Penelitian ini dapat memberikan informasi awal untuk kemungkinan area yang mempunyai potensi menjadi tempat munculnya gempa di masa datang.

**Kata Kunci** : stress Coulomb, gempa Palu 2018, bahaya gempa.

## Abstract

On September 28, 2018 the city of Palu and its vicinity were struck by M 7.5 earthquake. The earthquake was followed by a series of aftershocks where seven of them considered to have strong magnitude ( $M > 4.5$ ). Analysis of static Coulomb stress change caused by the Palu Earthquake in 2018 has been performed to understand the interaction of the mainshock and its aftershocks. Static Coulomb stress changes are calculated based on the source fault model and the focal mechanism of the receiver fault using Coulomb 3.3 software. In this paper, we use six source fault models that already published based on InSAR, teleseismic, and broadband data processing, and one proposed model based on evenly distributed slip along a single fault plane. Calculation of static stress Coulomb changes is performed using the specified fault mode where the receiver fault is seven aftershocks with significant magnitude mentioned above. One proposed model has calculated static Coulomb stress change on nodal plane I showing four of seven aftershocks (57%) and nodal plane II six of seven aftershocks (86%) are in the red pattern (positive Coulomb stress). Results show most aftershocks are located in the red pattern ( $\Delta\sigma_f > 0$ , increased stress) on the static Coulomb stress change map, it means that the aftershocks are triggered by the mainshock. The model with two fault segments located on land and at sea, is the best source fault model that can explain the occurrence of aftershocks. Compared to other models, this model has the largest percentage of the seven aftershocks that occur in the red pattern. The distribution map of increased stress imparted by the mainshock is important data for disaster mitigation. This research can provide preliminary information for the possible area prone to earthquake occurrence in future.

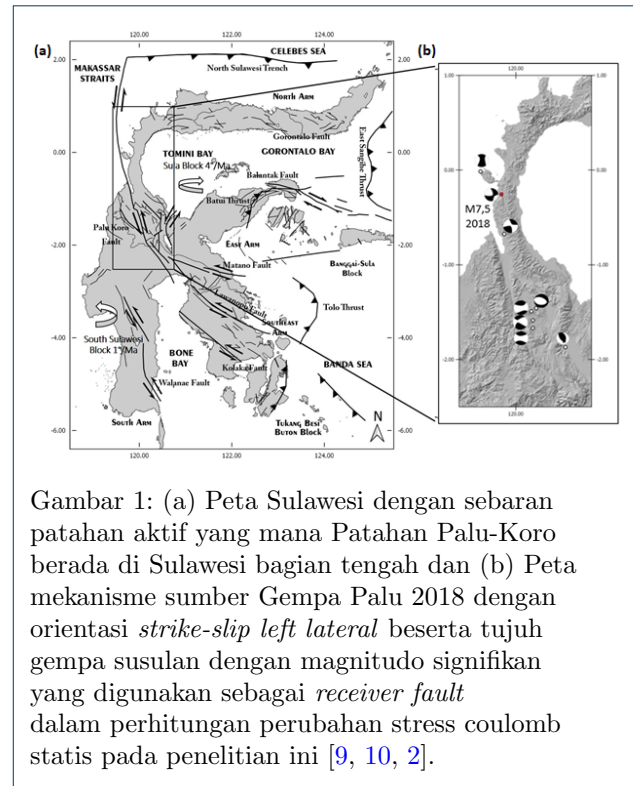
**Keywords**: Coulomb stress; Palu earthquake 2018; earthquake hazard.

## 1 PENDAHULUAN

Sulawesi Utara memiliki tingkat seismisitas yang signifikan karena adanya subduksi di sepanjang *megathrust*. Patahan yang tercatat sangat aktif di Sulawesi yaitu Patahan Palu-Koro. Area patahan ini merupakan tempat terjadinya beberapa gempa yang merusak diantaranya gempa tahun 1937, 2005, 2012, dan 2018. Berdasarkan katalog gempa USGS dari tahun 2000 sampai 2018 terdapat lima gempa dengan magnitudo  $> 6$  di sepanjang Patahan Palu-Koro. Patahan Palu-Koro melewati wilayah Palu dengan jumlah penduduk yang padat sekitar 374.000 orang. Patahan Palu-Koro menjadi bagian penting untuk terus dilakukan penelitian karena pergerakan sesarnya terus aktif dengan kecepatan 39 mm/tahun dengan orientasi *left-lateral strike-slip* [1].

Pada 28 September 2018, gempa bumi dengan magnitudo M 7,5 terjadi dengan episenter gempa berada di koordinat  $119,846^{\circ}\text{E}$   $0,256^{\circ}\text{S}$  dengan kedalaman 20 km [2]. Menurut Tim Pusat Gempa Nasional (2018) [3], semua aktivitas Gempa Palu 2018 dari gempa pendahulu, gempa utama, dan gempa susulan menunjukkan adanya kaitan dengan aktivitas Patahan Palu-Koro yang ditandai dengan kedalaman yang dangkal dan gempa susulan membentuk klaster yang berorientasi utara-selatan, ditunjukkan pada Gambar 1. Hasil survei lapangan menunjukkan sebaran retakan permukaan berada di Segmen Palu dan Saluki. Slip yang terjadi pada Gempa Palu 2018 didominasi oleh slip dengan tipe *strike-slip left lateral* dan sebagian kecil *normal slip* [4, 5, 6]. Gempa Palu dengan kekuatan M 7,5 ini menyebabkan korban meninggal dan hilang sebanyak 3.072 orang dengan kerusakan rumah kategori berat sebanyak 65.045 unit rumah [7]. Korban meninggal sebagian besar di Kota Palu, Donggala, Sigi, Parigi, Mountong, dan Pasang Kayu, Sulawesi Barat. Menurut Wang dkk (2019) [8], Gempa Palu 2018 menghasilkan *rupture* sepanjang 210 km dengan *strike* yang berbeda. Area slip utama terkonsentrasi pada kedalaman 0 sampai 20 km dengan slip maksimum 3,9 m. Gempa yang terjadi di Palu memicu bencana alam lainnya seperti tsunami di Teluk Palu dan likuefaksi yang besar di daerah Petobo dan Balaroa di Kota Palu.

Deretan gempa susulan yang muncul setelah Gempa Palu 2018 mengindikasikan bahwa ada hubungan kehadiran gempa susulan terhadap gempa utama. Mekanisme terjadinya suatu gempa bumi tektonik sering dikaitkan dengan adanya *static stress triggering*. Patahan yang melepaskan *stress* akan



Gambar 1: (a) Peta Sulawesi dengan sebaran patahan aktif yang mana Patahan Palu-Koro berada di Sulawesi bagian tengah dan (b) Peta mekanisme sumber Gempa Palu 2018 dengan orientasi *strike-slip left lateral* beserta tujuh gempa susulan dengan magnitudo signifikan yang digunakan sebagai *receiver fault* dalam perhitungan perubahan stress coulomb statis pada penelitian ini [9, 10, 2].

mentransferkan *stress* ke bidang patahan tersebut dan ke daerah sekitar bidang patahan [11]. Batuan yang menerima *stress* dari gempa utama bisa terpicu untuk mengalami peningkatan *stress* dan mengalami pematahan selanjutnya atau sebaliknya. Kriteria yang digunakan untuk mempelajari hubungan *stress* antara patahan yang satu dengan patahan lainnya adalah menggunakan kriteria pematahan *Coulomb* (*Coulomb Failure Criterion*). *Earthquake triggering* merupakan proses perubahan stress suatu gempa bumi yang dapat mendorong atau menghambat aktivitas seismik di daerah sekitarnya atau memicu gempa bumi lain pada jarak yang jauh [12]. *Static stress triggering* atau *earthquake triggering* dapat dibuktikan dengan perhitungan perubahan stress Coulomb. Perubahan stress Coulomb digunakan untuk memprediksi wilayah mana yang mengalami peningkatan stress sehingga memicu terjadinya slip di masa yang akan datang atau sebaliknya. Pola spasial dari perubahan stress Coulomb yang disebabkan gempa utama menggunakan kriteria pematahan *Coulomb* berkorelasi baik dengan pola spasial gempa susulan [13]. Gempa susulan biasanya terjadi di area positif perubahan stress Coulomb daripada negatif stress Coulomb.

Model bidang patahan Gempa Palu 2018 menjadi penting dalam perhitungan perubahan stress Coulomb statis. Model patahan akan mempengaruhi nilai dari perubahan stress Coulomb statis. Beberapa penelitian

\*Correspondence: [elviramardhatillah95@mail.ugm.ac.id](mailto:elviramardhatillah95@mail.ugm.ac.id)

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

†Equal contributor

terkait model bidang patahan Gempa Palu 2018 telah dilakukan oleh beberapa peneliti menggunakan data satelit dengan teknik pengolahan data InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) dan data teleseismik [5, 14, 8, 4]. Beberapa penelitian tersebut juga menghitung perubahan stress Coulomb di patahan atau di luar patahan menggunakan satu model bidang patahan yang dibangun [8, 15, 16]. Hui dkk., 2018 [17] telah menghitung perubahan stress Coulomb yang diakibatkan oleh gempa pendahulu terhadap Gempa Palu 2018. Penelitian ini mendapatkan hasil bahwa Gempa Palu 2018 terjadi pada pola merah dari peta perubahan stress Coulomb, yang berarti Gempa Palu 2018 terpicu oleh gempa pendahulu Mw 6,1. Penelitian ini juga melihat interaksi dengan gempa susulan yang mana gempa susulan berada di zona merah dari perubahan stress Coulomb. Perhitungan perubahan stress Coulomb statis menjelaskan adanya interaksi antara gempa pendahulu dengan gempa susulan dan gempa utama Palu 2018. Gunawan dkk., 2020 telah menghitung perubahan stress Coulomb Gempa Palu 2018 dengan menggunakan tiga model bidang patahan sumber terhadap kehadiran gempa susulan sebagai patahan penerima.

Penelitian ini menganalisis interaksi gempa tektonik berdasarkan pola perubahan stress Coulomb statis yang disebabkan oleh Gempa Palu 2018. Perhitungan perubahan stress Coulomb statis membutuhkan parameter sumber gempa Palu 2018 sebagai *source fault* dan gempa susulan sebagai *receiver fault*. Penelitian ini juga melihat pengaruh dari perbedaan enam model bidang patahan terhadap pola perubahan stress Coulomb statis. Perubahan stress Coulomb statis yang didapatkan berdasarkan model yang berbeda akan dianalisis terhadap tujuh gempa susulan yang terjadi di sekitar patahan sumber. Penelitian ini mengusulkan dan membangun model patahan sumber Gempa Palu 2018 berdasarkan geometri patahan dari tujuh gempa susulan dan menghitung perubahan stress Coulomb statis dari model tersebut, serta menghitung perubahan *shear stress* dan *normal stress*. Hasil dari penelitian ini berupa peta pola perubahan stress Coulomb yang dikorelasikan dengan peta geologi dan distribusi gempa susulan secara keseluruhan. Penelitian ini memberikan informasi bagaimana korelasi antara teori *static stress triggering* dengan kasus Gempa Palu 2018.

## TEKTONIK REGIONAL

Lengan Barat Daya dan Lengan Utara Sulawesi terbentuk akibat interaksi dari 3 lempeng, yaitu : lempeng Indo-Australia, Laut Sulawesi, and bagian timur dari Sundaland, yang terjadi sejak Zaman

Kapur sampai sekarang [18, 19, 20, 21]. Lengan Sulawesi Tengah terbentuk akibat proses kolisi berarah Timur-Barat antara Blok Sulawesi Timur dengan mikrokontinen Banggai – Sula yang terjadi sejak Pliosen Awal sampai sekarang. Kolisi antar plate tersebut terakomodasikan dengan adanya struktur sesar anjak, lipatan, dan sesar geser yang terjadi di lengan Sulawesi Tengah. Proses pengangkatan di Sulawesi Tengah ini diidentifikasi dari kehadiran ofiolit [21].

Struktur regional yang terbentuk akibat kolisi Timur-Barat adalah patahan geser kiri (*left lateral fault*) berarah Barat Daya – Tenggara, yang di kenal sebagai Patahan Palu Koro [18, 19, 22, 23]. Zona Patahan Palu Koro membentang dari Barat-Daya Sulawesi yang terhubung dengan Palung Sulawesi Utara, dimana blok Laut Sulawesi menunjam di bawah Blok Sulawesi Utara. Zona Patahan Palu Koro memanjang ke selatan sampai ke Teluk Palu dan daratan Sulawesi Tengah sepanjang 300 km kearah tenggara.

Segmentasi Patahan Palu Koro dengan tipe en-echelon dapat di temukan di bagian utara (Donggala) yang mengindikasikan adanya zona yang lebih kompleks dan struktur yang masih aktif [21]. Zona yang lebih lebar dalam bentuk struktur graben terdapat di kota Palu dan memanjang kearah tenggara [19, 21]. Segmentasi Patahan Palu Koro ini di gunakan sebagai acuan pada penelitian ini untuk menentukan zonasi penambahan stress dan kemungkinan adanya *release stress* dengan menghitung perubahan stress Coulomb dari Gempa 7,5 M 2018.

## 2 METODE PENELITIAN

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini untuk melihat interaksi antara gempa susulan dan gempa utama menggunakan perhitungan stress Coulomb yang bersifat statis untuk menentukan apakah suatu gempa susulan dipicu oleh gempa utama karena ada perubahan stress yang diakibatkan gempa utama. Perubahan stress yang diakibatkan gempa utama menyebabkan terganggunya stress geser dan stress normal pada patahan di sekitarnya. Perubahan stress Coulomb statis merupakan penjumlahan dari stress geser dan stress normal yang dikalikan dengan koefisien gesek efektif yang dapat dilihat pada persamaan 1 *mainshock*

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_\beta + \mu'(\Delta\sigma_\beta) \quad (1)$$

Persamaan 1 merupakan persamaan untuk menghitung perubahan stress Coulomb ( $\Delta\sigma_f$ ) dengan  $\Delta\tau_\beta$  merupakan perubahan stress geser,

$\mu'$  merupakan koefisien gesek efektif, dan  $\Delta\sigma_\beta$  merupakan perubahan stress normal (negatif jika bidang patahan rapat/*clamping*). Besar koefisien gesek efektif antara 0,0 sampai 0,75 dengan nilai rerata  $\mu'=0,4$ . Potensial slip akan meningkat jika  $\Delta\sigma_f > 0$  (pola merah) dan berkurang jika  $\Delta\sigma_f < 0$  (pola biru). Perubahan stress Coulomb  $\Delta\sigma_f$  bisa bernilai positif atau negatif. Wilayah yang memiliki perubahan stress Coulomb positif diartikan sebagai wilayah yang mengalami peningkatan *stress* dan dapat mempercepat terjadinya slip pada bidang patah. Wilayah yang memiliki stress Coulomb negatif diartikan sebagai wilayah yang mengalami penurunan stress dan menunda terjadinya slip pada bidang patah.

Penelitian ini menggunakan data gempa bumi utama Palu September 2018 dan data gempa susulan yang berada di sekitarnya dengan kawasan koordinat  $116,5^\circ - 123,5^\circ$  BT dan  $-4^\circ - 3^\circ$  LU. Data penelitian yang digunakan adalah data sekunder berupa data kejadian gempa bumi utama 28 September 2018 dan data gempa susulan dari 28 September 2018 sampai 31 Desember 2019. Data yang dibutuhkan berupa informasi koordinat, kedalaman, magnitudo, dan mekanisme fokus gempa. Data penelitian diperoleh dari data katalog gempa bumi USGS (*United States Geological Survey*) dan katalog gempa bumi BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika).

Perhitungan perubahan stress Coulomb statis menggunakan *software Coulomb 3.3*. Penelitian ini mengasumsikan bahwa medium bersifat elastik *half-space*, homogen, dan isotropik. Tetapan awal yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari modulus young =  $8 \times 10^5$  bar, rasio poisson = 0,25, dan koefisien gesek efektif = 0,4. Penentuan korelasi bidang patahan dengan momen magnitudo menggunakan rumus empiris Well Coppersmith (1994) [24], serta penentuan geometri dan slip patahan menggunakan aturan Aki Richards (1980,2002) [25, 26]. Rumus empiris yang digunakan tersebut sudah ter-*setting* pada *Coulomb 3.3*. Hasil pola perubahan stress Coulomb statis dilakukan dengan dua cara yaitu perubahan stress Coulomb statis di luar patahan (secara spasial) berdasarkan *specified fault* dan perubahan stress Coulomb statis pada bidang patahan berdasarkan *rake* setiap *subfault* (*on the fault with individual rake*). Hasil peta pola perubahan stress Coulomb statis dengan kedua cara ini akan menjelaskan kemungkinan pergerakan ketujuh gempa susulan yang signifikan dan kemungkinan keberadaan gempa susulan tersebut terjadi di pola merah (mengalami peningkatan perubahan stress Coulomb) atau sebaliknya. Model patahan sumber Gempa Palu 2018 yang diusulkan pada penelitian ini

dibangun manual menggunakan *Coulomb 3.3* dengan *tools building an input file from a simple X,Y map*. Penentuan parameter *dip* dan *rake* menggunakan data USGS, sedangkan *strike* berdasarkan orientasi dari distribusi gempa susulan. Peta perubahan stress Coulomb statis akan divalidasi menggunakan peta geologi dan distribusi gempa susulan secara keseluruhan.

Perhitungan perubahan stress Coulomb membutuhkan dua parameter yaitu *source fault* dan *receiver fault*. *Source fault* merupakan patahan sumber yang menyebabkan perubahan stress Coulomb pada patahan di sekitarnya dan *receiver fault* merupakan patahan yang menerima perubahan stress akibat *source fault*. Perhitungan perubahan stress Coulomb menggunakan kriteria *specified fault* dari *receiver fault*. Parameter yang dibutuhkan untuk masukan *receiver fault* yaitu *strike*, *dip*, *rake*, dan kedalaman sedangkan parameter yang dibutuhkan pada *source fault* meliputi *strike*, *dip*, *rake*, dan nilai slip pada setiap *subfault* [27]. Tujuh gempa susulan yang digunakan sebagai *receiver fault* disajikan pada Tabel 1. Perubahan stress Coulomb statis dihitung terhadap *nodal plane* I dan II pada *receiver fault*. Perhitungan terhadap dua *nodal plane* ini dilakukan agar mengetahui bagian *nodal plane* mana yang mengalami peningkatan stress akibat gempa utama.

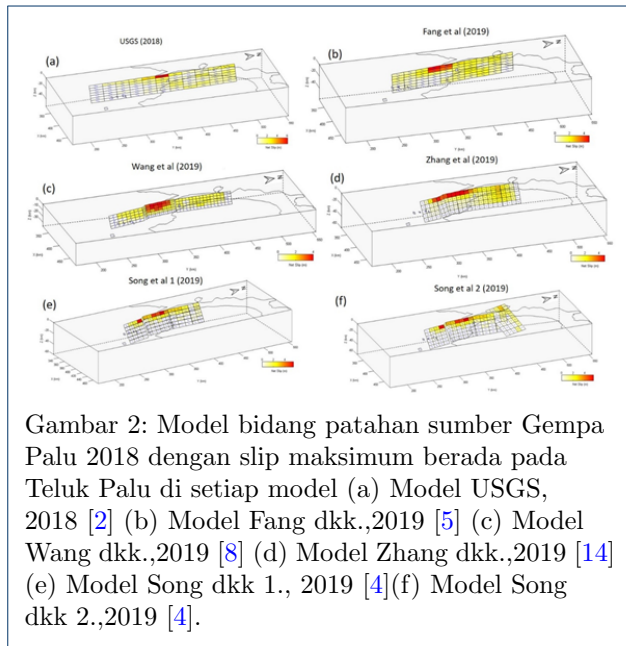
### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Enam model bidang patahan sumber Gempa Palu 2018 yang digunakan menghasilkan peta pola stress Coulomb statis yang berbeda. Penelitian ini telah melakukan perhitungan perubahan stress Coulomb statis di luar bidang patahan (spasial) dan pada bidang patahan (*on the fault*). Perbedaan ini dihasilkan karena perbedaan beberapa parameter yang mempengaruhi nilai perubahan stress Coulomb statis. Parameter yang mempengaruhi nilai tersebut adalah nilai slip pada bidang patahan, orientasi bidang patahan sumber, dan kedalaman. Model bidang patahan sumber Gempa Palu 2018 dengan enam model yang berbeda dibangun menggunakan *Coulomb 3.3* yang dapat dilihat pada Gambar 2. Model USGS dibagi menjadi 77 *subfault*, Model Fang dkk dibagi menjadi 70 *subfault*, Model Wang dkk dibagi menjadi 105 *subfault*, Model Zhang dkk dibagi menjadi 115 *subfault*, Model Song dkk 1 segmen dibagi menjadi 96 *subfault*, dan Model Song dkk 2 segmen dibagi menjadi 133 *subfault*. Slip maksimum pada setiap model bidang patahan sumber berada di sekitar Teluk Palu.

Peta pola perubahan stress Coulomb secara spasial dengan salah satu *specified fault* 221/58/-170 dari *receiver fault* ditunjukkan pada Gambar 3. Patahan yang berada di sekeliling patahan sumber yang

Tabel 1: Gempa susulan yang digunakan sebagai *receiver fault*

No	Waktu (UTC)	Mw	Longitude (°) E	Latitude (°) N	Depth (km)	Geometri Patahan (°)		
						Strike	Dip	Rake
1	21:24:01 28-09-18	5	120,181	-1,586	10	221	58	-170
						126	82	-32
2	10:30:18 29-09-18	5,1	120,215	-1,459	10	295	52	-75
						91	41	-109
3	05:43:34 01-10-18	5,2	119,626	-0,015	10	317	64	15
						220	77	153
4	23:46:38 01-10-18	5,2	119,877	-0,675	10	350	79	8
						259	83	169
5	16:07:48 22-10-19	5,1	120,180	-1,669	10	229	81	-170
						137	80	-9
6	10:45:06 03-03-19	4,9	120,164	-1,491	10	300	76	-27
						37	64	-164
7	01:32:00 24-03-19	5,5	120,524	-1,870	10	353	37	112
						146	56	74

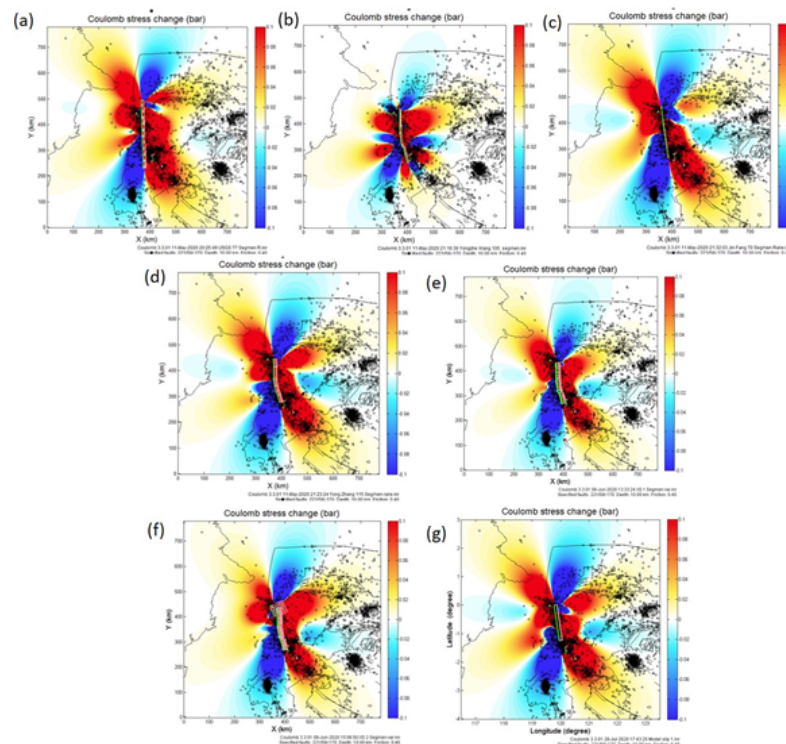


memiliki orientasi sama dengan patahan penerima (221/58/-170) yang digunakan dalam menghitung perubahan stress Coulomb statis, jika berada di pola merah maka patahan tersebut akan ter-*trigger* atau akan mengalami peningkatan stress sehingga memicu terjadi *slip* pada patahan lebih cepat. Sebaliknya, jika patahan dengan orientasi yang sama dengan 221/58/-170 berada di pola biru maka stress pada patahan tersebut mengalami penurunan sehingga estimasi waktu untuk terjadinya *slip* pada patahan tersebut akan mengalami penundaan.

Peta pola perubahan stress Coulomb statis yang dihasilkan pada Penelitian ini juga menghitung perubahan stress Coulomb pada koordinat tujuh gempa susulan yang digunakan sebagai *receiver fault*. Hasil perhitungan perubahan *shear stress*, *normal*

*stress*, dan *Coulomb stress* pada *nodal plane* I dan II pada *receiver fault* untuk enam model patahan sumber dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil dari perubahan stress Coulomb statis pada enam model yang berbeda menjelaskan bahwa sebagian besar dari tujuh gempa susulan memiliki perubahan stress Coulomb positif. Model bidang patahan sumber USGS,2018 [2], Fang dkk.,2019 [5], Wang dkk.,2019 [8], dan Zhang dkk., 2019 memiliki persentase 57 % dari tujuh gempa susulan terjadi pada pola merah di *nodal plane* I dan 71 % pada *nodal plane* II *receiver fault*. Model Song dkk., 2019 [4] dengan satu segmen di darat memiliki persentase 86 % dari tujuh gempa susulan yang terjadi pada pola merah di *nodal plane* I atau II. Model Song dkk.,2019 [4] dengan dua segmen yang berada di laut dan di darat merupakan model yang cocok untuk menjelaskan kehadiran 100 % dari tujuh gempa susulan terjadi di pola merah pada peta pola perubahan stress Coulomb statis. Persentase pada setiap model bidang patahan sumber di paparkan pada Tabel 3.

Gunawan dkk. (2020) [28] telah melakukan penelitian dengan menghitung perubahan stress Coulomb menggunakan tiga model patahan sumber Gempa Palu 2018. Model patahan sumber yang digunakan adalah Model Socquet dkk.,2019 [29], Model Song dkk.,2019 [4], dan Model Zhang dkk.,2019 [14]. Perhitungan perubahan stress Coulomb berdasarkan *specified fault* dengan orientasi *receiver fault* 346/60/0 yang menggambarkan orientasi dari patahan Palu-Koro. Gunawan dkk., 2019 menganalisis kehadiran dari gempa susulan yang terjadi pada 28 September 2018- 10 Oktober 2018 dengan pola merah pada peta perubahan stress Coulomb. Model Song dkk., 2019 [4] merupakan model yang memiliki persentase rata-rata gempa susulan terbesar terjadi pada pola peningkatan stress dari model lainnya pada perhitungan perubahan stress Coulomb. Model



Gambar 3: Peta pola perubahan stress coulomb statis dengan orientasi patahan penerima 221/58/-170 pada bidang patahan sumber Gempa Palu 2018 (a) Model USGS., 2018 [2] (b) Model Fang dkk.,2019 [5] (c) Model Wang dkk.,2019 [8] (d) Model Zhang dkk., 2019 [14] (e) Model Song dkk 1.,2019 [4] (f) Model Song dkk 2.,2019 [4] (g) Dari penelitian ini.

song dkk memiliki 51 %, Model Socquet 43 %, dan Model Zhang 29 %. Jika dibandingkan dengan tujuh model patahan sumber pada penelitian ini dengan hasil yang didapatkan oleh Gunawan dkk. (2020) [28] didapatkan hasil yang sama bahwa Model Song dkk dengan dua segmen memiliki persentase terbesar dari enam model lainnya yang digunakan dalam perhitungan perubahan stress Coulomb statis dengan 100 % tujuh gempa susulan yang digunakan sebagai *receiver fault* berada pada pola merah.

Perubahan stress Coulomb statis juga di hitung pada bidang patahan tepatnya di setiap subfault dipengaruhi oleh nilai slip/*rake* dari setiap *subfault*. Perubahan stress Coulomb *on the fault* dihitung berdasarkan nilai *rake* masing-masing (*individual rake*) *subfault* dari semua model bidang patahan sumber. Perubahan stress Coulomb dari masing-masing *subfault* dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar ini menjelaskan gambaran dari bagian *subfault* yang memiliki pola merah dan pola biru yang berkorelasi dengan peningkatan dan penurunan perubahan Coulomb stress statis pada setiap *subfault* berdasarkan *rake* dari masing-masing subfault.

Perubahan stress Coulomb statis pada bidang patahan ini akan menjelaskan kemungkinan *subfault* mana yang memiliki kemungkinan besar mengalami *slip* dimasa yang akan datang. Hasil ini menjelaskan bahwa bagian *slip* maksimum di Teluk Palu sebagai akibat dari pelepasan stress (pola biru) yang cukup besar sehingga ada kemungkinan stress yang dilepaskan pada gempa utama Palu 2018 akan ter-transfer ke *subfault* di bidang patahan sumber yang memiliki pola merah. *Subfault* yang memiliki pola merah kemungkinan akan mengalami peningkatan stress dan mempercepat terjadinya *slip* pada *subfault* tersebut dimasa yang akan datang.

Model slip pada studi ini dibuat dengan model yang sederhana dengan nilai slip merata di bidang patahan (Gambar 5). Model dalam penelitian ini dibangun berdasarkan analisa dari enam model penelitian sebelumnya dan tujuh gempa susulans yang di gunakan sebagai *receiver fault*. Model penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa nilai slip maksimum yang terjadi pada bidang patahan Gempa Palu 2018 berada di sekitar Teluk Palu. Berdasarkan hal ini maka dibangun model bidang patahan sumber pada

Tabel 2: Hasil perhitungan *shear stress*, *normal stress*, dan *Coulomb stress* pada enam model patahan sumber

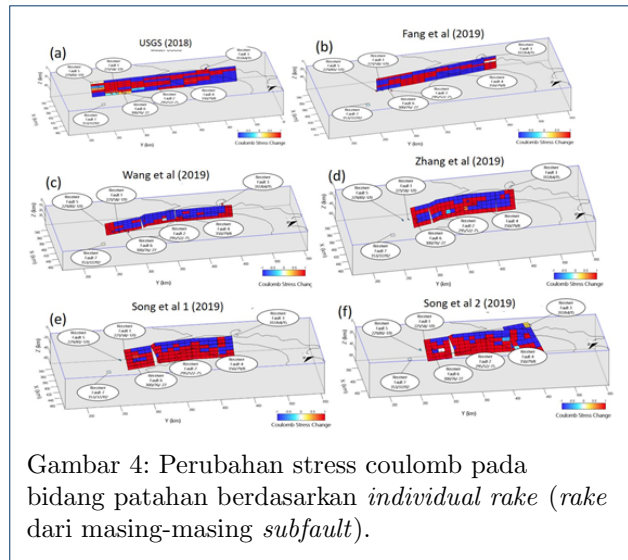
Receiver Fault	Model	Nodal Plane I			Nodal Plane II		
		Shear (bar)	Normal (bar)	Coulomb (bar)	Shear (bar)	Normal (bar)	Coulomb (bar)
1	USGS	0,336	1,432	0,909	0,332	0,42	0,5
2		0,381	0,578	0,612	0,387	0,214	0,472
3		0,149	-2,96	-1,036	0,178	0,787	0,493
4		-11,791	-5,091	-13,827	-11,889	-8,77	-15,397
5		0,114	1,455	0,696	0,121	0,355	0,263
6		0,559	0,658	0,822	0,565	0,901	0,926
7		-0,071	0,044	-0,053	-0,071	0,115	-0,025
1	Fang dkk	0,129	3,011	1,334	0,116	1,219	0,604
2		0,761	1,082	1,194	0,773	0,405	0,935
3		-1,566	0,704	-1,284	-1,52	6,572	1,108
4		-2,581	0,599	-2,341	-2,656	-4,285	-4,37
5		-0,15	3,364	1,196	-0,132	0,608	0,111
6		1,01	1,566	1,636	1,021	1,533	1,634
7		-0,072	0,049	-0,052	-0,072	0,103	-0,031
1	Wang dkk	1,705	-5,725	-0,585	1,725	-1,359	1,182
2		-0,012	0,067	0,015	-0,009	0,595	0,229
3		0,462	0,241	0,558	0,46	-0,711	0,175
4		0,122	-6,386	-2,433	-0,684	-24,571	-10,512
5		0,425	-4,951	-1,556	0,39	0,572	0,619
6		1,256	-0,844	0,918	1,234	-3,103	-0,007
7		0,004	0,002	0,005	0,004	0,001	0,005
1	Zhang dkk	1,426	2,414	2,392	1,425	1,222	1,913
2		0,985	1,577	1,616	1,002	0,552	1,223
3		-0,446	0,826	-0,115	-0,423	3,872	1,126
4		-10,665	-6,977	-13,456	-10,739	-13,83	-16,271
5		0,941	1,25	1,441	0,943	0,643	1,2
6		2,013	2,227	2,904	2,029	2,779	3,14
7		-0,025	0,014	-0,019	-0,025	0,044	-0,007
1	Song dkk 1	1,626	4,388	3,381	1,622	0,919	1,99
2		0,759	1,548	1,378	0,782	0,242	0,879
3		-0,215	0,483	-0,022	-0,207	1,803	0,515
4		31,99	33,569	45,418	31,629	29,606	43,471
5		1,118	2,071	1,946	1,126	0,442	1,302
6		1,535	2,333	2,468	1,56	3,969	3,148
7		-0,027	0,016	-0,021	-0,027	0,038	-0,012
1	Song dkk 2	1,641	4,437	3,416	1,638	1,015	2,044
2		0,789	1,695	1,467	0,814	0,194	0,891
3		6,506	-2,462	5,521	6,544	-0,154	6,482
4		104,55	-3,401	103,189	102,585	129,517	154,391
5		1,107	2,116	1,954	1,115	0,503	1,316
6		1,519	2,557	2,541	1,544	3,943	3,121
7		-0,036	0,022	-0,027	-0,036	0,052	-0,015

Tabel 3: Persentase terjadinya tujuh gempa susulan pada pola merah *Coulomb stress*

No	Model	Gempa susulan berada di pola merah (stress Coulomb positif)	
		Nodal Plane I	Nodal Plane II
1.	USGS	57%	71%
2.	Fang dkk	57%	71%
3.	Wang dkk	57%	71%
4.	Zhang dkk	57%	71%
5.	Song dkk 1 Segmen	86%	86%
6.	Song dkk 2 Segmen	100%	100%

penelitian ini dengan nilai slip yang tersebar merata di sepanjang Teluk Palu dan melewati sumber Gempa

Palu 2018. Penentuan model bidang patahan sumber dengan satu segmen sederhana berdasarkan batas area dari slip pada model sebelumnya juga didasari pada penelitian Zhou dkk.,2019 pada kasus Gempa Gorkha 2015. Model ini juga berdasarkan sebaran dan nilai stress Coulomb statis dari tujuh gempa susulan yang berada di sekitar patahan sumber. Model yang didapatkan berdasarkan kedua faktor ini lalu di validasi menggunakan peta geologi berupa sebaran patahan dan distribusi gempa susulan secara keseluruhan. Secara seismologi model patahan sumber pada penelitian ini mengakomodir gempa susulan dan secara geologi hasil dari perhitungan stress Coulomb statis berkorelasi dengan keberadaan sebaran patahan. Pola perubahan stress Coulomb positif *overlap* dengan



distribusi gempa susulan dan sebaran patahan di sekitar wilayah patahan sumber Gempa Palu 2018. Patahan sumber yang dibangun dengan orientasi patahan (*strike/dip/rake*) 352/67/-17. Model bidang patahan sumber pada penelitian ini memiliki panjang 138,53 km dan lebar 30 km. Model bidang patahan yang dibangun dengan slip tersebar merata di sepanjang bidang patahan dikorelasikan dengan nilai perubahan stress Coulomb dengan tujuh *receiver fault* yang digunakan pada enam model bidang patahan sebelumnya. Nilai perubahan stress Coulomb pada *receiver fault* yang digunakan mendapatkan hasil yang sama dengan nilai model bidang patahan yang sebelumnya. Tabel 4 memaparkan nilai perubahan stress untuk model sederhana dengan slip merata di seluruh bidang patahan. Perhitungan perubahan stress Coulomb statis di *nodal plane* I pada *receiver fault* (gempa susulan) menunjukkan empat dari tujuh gempa susulan (57%) berada pada pola merah (nilai stress Coulomb positif) sedangkan pada *nodal plane* II enam dari tujuh gempa susulan (86%) memiliki nilai stress Coulomb positif. Estimasi model patahan sumber Gempa Palu 2018 berdasarkan nilai perubahan stress Coulomb dari tujuh gempa susulan yang digunakan mampu menjelaskan keterkaitan teori *stress triggering* merujuk pada enam model penelitian sebelumnya.

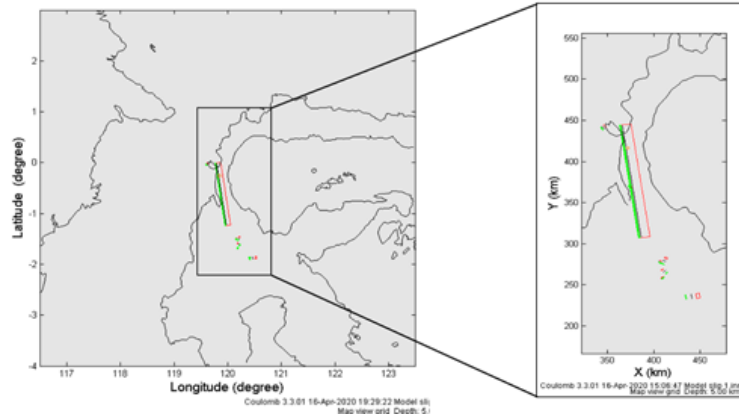
Hasil penelitian ini berupa peta perubahan stress Coulomb statis secara spasial di validasi menggunakan peta geologi berupa sebaran patahan dan distribusi *aftershock* secara keseluruhan. Validasi menggunakan cara tersebut dilakukan karena kita tidak mengetahui seberapa besar nilai stress absolut dari batuan dan nilai komponen tensor stress secara pasti. Distribusi gempa susulan secara keseluruhan membentuk klaster

pada sebaran patahan di Sulawesi. Klaster tersebut sebagian besar tersebar merata di sepanjang Patahan Palu-Koro. Peta stress Coulomb yang dihasilkan pada penelitian ini menunjukkan patahan penerima dengan orientasi tertentu menghasilkan pola merah di bagian utara patahan Palu-koro. Hal ini didukung dengan studi geologi yang memprediksi bahwa yang lebih destruktif dimasa yang akan datang adalah pada bagian utara (Donggala). Bagian utara Patahan Palu-Koro banyak struktur *en-echelon* yang sempit menunjukkan adanya *faulting* yang sedang tumbuh, sedangkan bagian selatan (Palu) strukturnya lebih melebar (*pull-apart*), pasti akan teraktivasi atau *subsidence*. Kemungkinan pusat gempa tidak berada di sekitar wilayah tersebut, tapi hanya sebagai efek samping yang juga destruktif. Hasil dari peta pola perubahan stress Coulomb statis untuk beberapa kasus *specified fault*, pola merah berkorelasi dengan sebaran patahan dan distribusi gempa susulan secara keseluruhan. Peta pola perubahan stress Coulomb statis yang dihasilkan dapat digunakan sebagai prediksi untuk wilayah yang memiliki kemungkinan kondisi stressnya mencapai titik kritis yang ditandai dengan pola merah pada peta sehingga dimasa yang akan datang akan terjadi gempa atau kemungkinan kerusakan pada area tersebut. Wilayah yang memiliki kondisi yang belum mencapai kritis atau berada di fase relaksasi ditandai dengan pola biru pada peta yang berarti kemungkinan di area tersebut aman untuk kasus gempa di masa yang akan datang atau pada area tersebut tertunda waktu untuk terjadinya gempa dari waktu yang seharusnya.

## 4 KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah sebagian besar dari gempa susulan terjadi pada pola merah yang berarti mengalami peningkatan stress dan kehadirannya terpicu oleh gempa utama. Model bidang patahan sumber Song dkk. (2019) [4] dengan dua segmen yang berada di darat dan di laut merupakan model yang cocok untuk menjelaskan kehadiran dari tujuh gempa susulan yang dijadikan *receiver fault* terjadi pada pola merah peningkatan stress yang mendukung teori *static stress triggering* yang sudah dibuktikan oleh penelitian sebelumnya. Model bidang patahan sumber yang dibangun pada penelitian ini dengan slip 1,7 m merata di sepanjang bidang patahan juga dapat menjelaskan jika kehadiran gempa susulan terpicu oleh gempa utama. Gempa susulan yang terjadi pada pola biru kemungkinan terpicu oleh bagian *subfault* pada bidang patahan sumber yang memiliki orientasi slip yang sama dengan *subfault* tersebut. Coulomb stress terbagi atas dua yaitu stress Coulomb statis dan dinamis.





Gambar 5: Model bidang patahan sumber Gempa Palu 2018 dengan slip merata pada bidang patahan.

Tabel 4: Hasil perhitungan *shear stress*, *normal stress*, dan *Coulomb stress* pada model bidang patahan baru penelitian ini

Receiver Fault	Model	Nodal Plane I			Nodal Plane II		
		Shear (bar)	Normal (bar)	Coulomb (bar)	Shear (bar)	Normal (bar)	Coulomb (bar)
1		1,044	0,837	1,379	1,045	1,04	1,461
2		1,191	1,406	1,753	1,202	0,848	1,542
3		-1,477	2,989	-0,281	-1,465	4,387	0,29
4	Dari studi ini	-6,045	-1,891	-6,801	-6,092	-0,167	-6,159
5		0,726	0,575	0,956	0,725	0,547	0,944
6		1,602	1,943	2,379	1,607	0,713	1,892
7		-0.005	0.000	-0.005	-0,005	0,023	0,004

Pada penelitian ini baru dikaji berdasarkan statis, disarankan untuk penelitian selanjutnya menggunakan pendekatan Coulomb stress dinamis dan menggunakan gempa susulan yang sudah di relokasi.

**PENULIS**

- Elvira Mardhatillah  
Dari :  
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Gadjah Mada
- Ade Angraini  
Dari :  
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Gadjah Mada
- Mochamad Nukman  
Dari :  
(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan , Universitas Gadjah Mada

**Pustaka**

- Socquet A, Simons W, Vigny C, McCaffrey R, Subarya C, Sarsito D, et al. Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006;111(B8).
- USGS. Earthquake;. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional, Hanifa NR, Djarwadi D, Sarsito DA. Gempa Palu Provinsi Sulawesi Tengah 28 September 2018 (M7. 4);.
- Song X, Zhang Y, Shan X, Liu Y, Gong W, Qu C. Geodetic observations of the 2018 Mw 7.5 Sulawesi earthquake and its implications for the kinematics of the Palu fault. *Geophysical Research Letters*. 2019;46(8):4212–4220.
- Fang J, Xu C, Wen Y, Wang S, Xu G, Zhao Y, et al. The 2018 Mw 7.5 Palu earthquake: A supershear rupture event constrained by InSAR and broadband regional seismograms. *Remote Sensing*. 2019;11(11):1330.
- Ulrich T, Vater S, Madden EH, Behrens J, van Dinther Y, Van Zelst I, et al. Coupled, physics-based modeling reveals earthquake displacements are critical to the 2018 Palu, Sulawesi Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*. 2019;176(10):4069–4109.
- BNPB. No Title;. Available from: <https://bnpb.cloud/dibi/laporan5>.
- Wang Y, Feng W, Chen K, Samsonov S. Source Characteristics of the 28 September 2018 Mw 7.4 Palu, Indonesia, Earthquake Derived from the Advanced Land Observation Satellite 2 Data. *Remote Sensing*. 2019;11(17):1999.
- Watkinson I, Hall R. The Palu-Koro and Matano faults , Sulawesi , Indonesia : Evolution of an active strike-slip fault system. *Geophysical Research Abstracts*. 2011;13:8270–8270.
- Watkinson IM, Hall R. Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: Evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards. *Geological Society Special Publication*. 2017;441(1):71–120.
- King GCP, Stein RS, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994;84(3):935–953.
- Freed AM. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annu Rev Earth Planet Sci*. 2005;33:335–367.
- Harris RA. Introduction to special section: Stress triggers, stress

- shadows, and implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998;103(B10):24347–24358.
14. Zhang Y, Chen YT, Feng W. Complex multiple-segment ruptures of the 28 September 2018, Sulawesi, Indonesia, earthquake. *Science Bulletin*. 2019;64(10):650–652.
  15. Lee S, Wong T, Lin T, Liu T. Complex Triggering Supershear Rupture of the 2018 M w 7.5 Palu, Indonesia, Earthquake Determined from Teleseismic Source Inversion. *Seismological Research Letters*. 2019;90(6):2111–2120.
  16. He L, Feng G, Li Z, Feng Z, Gao H, Wu X. Source parameters and slip distribution of the 2018 Mw 7.5 Palu, Indonesia earthquake estimated from space-based geodesy. *Tectonophysics*. 2019;772:228216.
  17. Hui G, Li S, Wang P, Suo Y, Wang Q, Somerville ID. Linkage between reactivation of the sinistral strike-slip faults and 28 September 2018 Mw7. 5 Palu earthquake, Indonesia. *Science Bulletin*. 2018;63(24):1635–1640.
  18. Katili JA. Volcanism and plate tectonics in the Indonesian island arcs. *Tectonophysics*. 1975;26(3-4):165–188.
  19. Hamilton WB. *Tectonics of the Indonesian region*. vol. 1078. US Government Printing Office; 1979.
  20. Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2002;20(4):353–431.
  21. Bellier O, Sébrier M, Seward D, Beaudouin T, Villeneuve M, Putranto E. Fission track and fault kinematics analyses for new insight into the Late Cenozoic tectonic regime changes in West-Central Sulawesi (Indonesia). *Tectonophysics*. 2006;413(3-4):201–220.
  22. Beaudouin T, Bellier O, Sébrier M. Champs de contrainte et de déformation déduits de l'analyse des mécanismes au foyer des séismes de la région de Sulawesi (Indonésie) : Implications géodynamiques. *Bulletin de la Société Géologique de France*. 2003;174(3):305–317.
  23. van Leeuwen TM. Stratigraphy and tectonic setting of the Cretaceous and Paleogene volcanic-sedimentary successions in northwest Sulawesi, Indonesia: implications for the Cenozoic evolution of Western and Northern Sulawesi. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2005;25(3):481–511.
  24. Wells DL, Coppersmith KJ. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*. 1994;84(4):974–1002.
  25. Aki K, Richards PG. *Quantitative Seismology*, 932 pp. WH Freeman, New York; 1980.
  26. Aki K, Richards PG. *Quantitative seismology*. vol. II; 1980.
  27. Toda S, Stein RS, Sevilgen V, Lin J. *Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—user guide*. US Geological Survey open-file report. 2011;1060(2011):63.
  28. Gunawan E, Widiyantoro S, Supendi P, Nishimura T. Identifying the most explainable fault ruptured of the 2018 Palu-Donggala earthquake in Indonesia using coulomb failure stress and geological field report. *Geodesy and Geodynamics*. 2020;.
  29. Socquet A, Hollingsworth J, Pathier E, Bouchon M. Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake from space geodesy. *Nature Geoscience*. 2019;12(3):192–199.