

## INKONSISTENSI TEC GIM DARI DATA GNSS SEBAGAI PREKURSOR GEMPABUMI DI WILAYAH MALUKU UTARA TAHUN 2019

**Bambang Sunardi, Supriyanto Rohadi, Sulastri, Rahmat Setyo Yuliatmoko**

Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika  
Jl. Angkasa 1 No 2 Kemayoran, Jakarta Pusat 10720 Telp. (021) 4246321  
e-mail: b.sunardi@gmail.com

(Diterima 15 Oktober 2020, Disetujui 3 Desember 2020)

### ABSTRAK

Saat ini GNSS (Global Navigation Satellite Systems) telah berkembang pesat hingga banyak diaplikasikan untuk keperluan komersial maupun penelitian, salah satunya prekursor gempabumi. Deteksi prekursor gempabumi menggunakan TEC (Total Electron Content) di ionosfer belakangan ini menjadi salah satu metode yang cukup menjanjikan. Makalah ini fokus pada penyelidikan inkonsistensi TEC sebelum gempabumi besar di wilayah Maluku Utara selama tahun 2019. Data gempabumi mengacu pada U.S. Geological Survey, sedangkan data TEC dari GIM (Global Ionosphere Maps) yang berasal dari GNSS internasional. Anomali TEC diamati dengan menerapkan metode korelasi TEC di dekat episenter gempa bumi hingga diperoleh indeks inkonsistensi TEC. Klasifikasi anomali TEC diputuskan manakala indeks inkonsistensi diluar ambang batas yang ditetapkan. Indeks Dst pada rentang waktu yang sama dipergunakan untuk menganalisis inkonsistensi TEC akibat badai geomagnetik. Hasil penelitian terhadap gempabumi 7 Januari 2019 Mw 6.6, gempabumi 7 Juli 2019 Mw 6.9, gempabumi 14 Juli 2019 Mw 7.2, serta gempabumi 14 November 2019 Mw 7.1 menunjukkan inkonsistensi TEC 29 hingga 1 hari sebelum kejadian gempabumi utama. Merujuk hasil ini, investigasi inkonsistensi TEC sebelum gempabumi besar dapat terus dikembangkan hingga dapat mencapai tingkat keberhasilan yang diharapkan.

**Kata kunci :** *gempabumi, GNSS, prekursor, TEC GIM, Maluku Utara.*

### ABSTRACT

*Currently, the GNSS has grown rapidly and is widely applied for commercial and research purposes, one of which is an earthquake precursor. Precursor detection of major earthquakes using TEC in the ionosphere has recently become a promising method. This paper focuses on investigating TEC inconsistencies before major earthquakes in the North Maluku region during 2019. Earthquake data refers to the U.S. Geological Survey, while the TEC data comes from GIM which comes from international GNSS. TEC anomaly was observed by applying the TEC correlation method near the epicenter of the earthquake to obtain the TEC inconsistency index. The TEC anomaly classification is decided when the inconsistency index is outside a defined threshold. The Dst index in the same time frame is used to analyze TEC inconsistencies due to geomagnetic storms. The results of research on the January 7, 2019 Mw 6.6 earthquake, the July, 7 2019 Mw 6.9 earthquake, the July 14, 2019 Mw 7.2 earthquake, and the November 14, 2019 Mw 7.1 earthquake showed TEC inconsistency 29 to 1 day before the mainshock. Referring to these results, investigations of TEC inconsistencies prior to the major earthquake can be continuously developed until they reach the expected success rate.*

**Keywords :** *earthquake, GNSS, precursor, TEC GIM, North Maluku.*

### 1. PENDAHULUAN

Sistem GNSS (Global Navigation Satellite Systems) telah berkembang pesat hingga banyak diaplikasikan untuk keperluan komersial maupun penelitian (Gregorczyk, 2017). Ionosfer adalah lapisan atmosfer bumi yang berada pada ketinggian sekitar 50 hingga 1000 km. Sebagian besar lapisan ionosfer terdiri dari partikel terionisasi yang dapat mempengaruhi sinyal satelit menjadi tertunda atau sebaliknya. Besarnya efek ionosfer ditentukan oleh jumlah Total Electron Content (TEC) dan frekuensi gelombang elektromagnetik (Gregorczyk, 2017).

TEC merupakan salah satu parameter penting di ionosfer bumi. TEC dapat diturunkan dari pengukuran GNSS. Teknologi GNSS terkini dapat menyediakan data TEC ionosfer dengan akurasi tinggi, kontinu dan mendekati waktu yang sesungguhnya. TEC dapat diturunkan dari kerapatan elektron dengan cara menghitung integral kerapatan elektron sepanjang sinyal satelit GPS ke penerima di bumi (Asnawi, 2012; Sunardi, 2016). Nilai TEC umumnya diukur dalam elektron per meter persegi. Satuan TEC dinyatakan dalam TECU dimana 1 TECU sama dengan  $10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup>.

Ketidaknormalan TEC di ionosfer sebelum gempabumi besar belakangan ini telah menjadi salah satu parameter prekursor gempabumi yang cukup menjanjikan (Sharma et al., 2020; Sharma et al., 2018; Heki dan Enomoto, 2015; Heki, 2011; Dimitar et al., 2011; Liu et al., 2011; Pullinets, 2004). TEC dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya aktivitas matahari dan gangguan medan magnet bumi.

Meskipun belum ada konsensus terkait proses fisis perubahan TEC di ionosfer sebelum kejadian gempabumi, namun beberapa hipotesis telah dikemukakan oleh banyak peneliti sebelumnya. Variasi TEC di ionosfer yang berkaitan dengan proses tektonik salah satunya dijelaskan dengan konsep LAIC (Litosphere Atmosphere Ionosphere Coupling) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Proses persiapan gempabumi umumnya ditandai dengan adanya *stress* batuan dibawah permukaan bumi. Akibat proses tersebut, gelombang elektromagnetik dan ion-ion listrik dapat terpancarkan hingga lapisan ionosfer dan dapat mengakibatkan modifikasi distribusi dan dinamika kerapatan elektron (Kamogawa, 2006; Pulinet, 2000; Kim, 1999; Sunardi, 2016).

## 2. TEC DAN PREKURSOR GEMPABUMI

Anomali TEC sebelum kejadian gempabumi telah menarik untuk diteliti lebih jauh khususnya di bidang geosains (Shi et al., 2019). Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengungkap anomali TEC di ionosfer yang teramati pada daerah zona persiapan gempabumi sebelum terjadinya gempabumi utama (Jin et al., 2014; Pulinets, 1998; Heki, et al., 2011; Liu et al., 2004).

Data TEC berbasis GNSS banyak dipergunakan dalam studi terkait seismo-ionosfer. Tariq et al. (2019) menggunakan data TEC berbasis GNSS untuk mendeteksi 60 anomali seismo-ionosfer dari tiga gempa bumi besar ( $M > 7.0$ ) di Nepal dan perbatasan Iran-Irak selama 2015-2017. Hasil yang diperoleh menunjukkan prekursor di ionosfer umumnya terjadi dalam sepuluh hari. Ulukavak dan Yalcinkaya (2017) memanfaatkan data TEC berbasis GNSS untuk menentukan anomali ionosfer pada kasus gempabumi Baja California 2010 dengan magnitudo  $M_w$  7.2. Hasil studi menunjukkan anomali ionosfer positif dan negatif terjadi satu hingga lima puluh hari sebelum gempabumi.

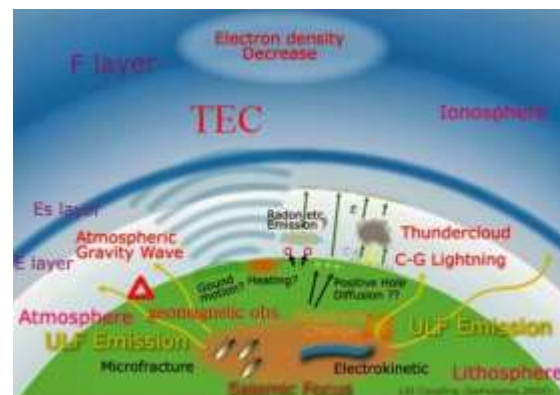
Yildirim et al. (2016) menyelidiki gangguan ionosfer terkait gempabumi Laut Aegea tanggal 24 Mei 2014 dengan magnitudo 6.5. Hasil penelitian menunjukkan nilai TEC meningkat 3 hari sebelum gempabumi. Penelitian Liu et al. (2004) terkait gempabumi di Taiwan antara tahun 1999 dan 2002 menunjukkan 80% kasus anomali ionosfer sebelum gempabumi dengan magnitudo lebih dari 6. Dalam kasus gempabumi Tohoku 2011, jaringan GPS (Global Positioning System) di Jepang menunjukkan secara

jelas adanya anomali TEC sebelum kasus tersebut (Heki, 2011; Jin et al., 2014, Dogan et al., 2011; Dimitar, 2011).

Penelitian TEC juga banyak dilakukan dengan mengambil kasus-kasus gempabumi di Indonesia. Dalam kasus gempabumi Aceh 2004 dengan magnitudo 9.1, telah dilaporkan munculnya anomali TEC lima hari sebelum gempabumi terjadi (Liu et al., 2010). Subakti (2015) melakukan analisis variasi GPS-TEC terkait dengan gempabumi besar di wilayah Sumatera. Hasil penelitian menunjukkan munculnya anomali TEC pada 9 kasus dari 10 kasus gempabumi yang menjadi obyek penelitian. Anomali TEC muncul 1 hingga 6 hari sebelum gempabumi terjadi. Penelitian TEC sebelum gempabumi di Indonesia lainnya juga menunjukkan adanya anomali TEC di ionosfer yang terdeteksi sebelum kejadian gempabumi (Sunardi, 2015; Sunardi, 2016).

Di sekitar Maluku Utara terdapat tiga lempeng utama yang saling berinteraksi, yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Disamping itu, terdapat juga beberapa lempeng mikro seperti Halmahera, Maluku, dan Sangihe. Kondisi tektonik yang kompleks tersebut menjadikan Maluku Utara sebagai salah satu wilayah dengan tingkat kegempaan yang tinggi. Selama tahun 2019 setidaknya ada empat gempabumi dengan magnitudo lebih besar dari  $M_w$  6.5. Pemantauan inkonsistensi TEC di ionosfer terkait dengan proses persiapan gempabumi layak dilakukan di wilayah ini mengingat relatif banyak gempabumi kuat yang terjadi.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki inkonsistensi TEC sebelum gempabumi di wilayah Maluku Utara dan sekitarnya pada tahun 2019 dengan magnitudo diatas 6.5. Data TEC dari GIM yang secara kontinyu dikeluarkan digunakan untuk mengkalkulasi indeks inkonsistensi TEC sebagai dasar penentuan prekursor gempabumi. Analisis detail dari empat gempabumi pada tahun 2019 di sekitar wilayah penelitian disajikan dalam makalah ini.



**Gambar 1.** Konsep LAIC: Litosphere Atmosphere Ionosphere Coupling (Kamogawa, 2006)

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini fokus pada penyelidikan inkonsistensi TEC di ionosfer sebelum gempabumi di Maluku Utara dan sekitarnya pada tahun 2019 dengan magnitudo lebih besar dari Mw 6.5. Data gempabumi diakses dari katalog U.S. Geological Survey. Pada tahun 2019, di sekitar wilayah Maluku Utara terdapat setidaknya empat gempabumi dengan magnitudo diatas Mw 6.5 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Perhitungan data TEC merupakan langkah awal dalam penelitian ini. Data TEC GIM (Global Ionosphere Map) dipergunakan untuk menentukan indeks inkonsistensi di area terdekat dengan pusat gempabumi. Data TEC GIM diperoleh dari CODE (Center for Orbit Determination in Europe) menggunakan data semua stasiun IGS yang masuk dalam cakupannya. Data CODE GIM (CODG) menawarkan resolusi spasial 2.5 kali 5.0 derajat, dan resolusi temporal 1 jam (Schaer, 1999).

LAIC (Lithosphere Atmosphere Ionosphere Coupling) dapat memodifikasi distribusi dan dinamika kerapatan elektron di ionosfer. Dalam penelitian ini, penyelidikan inkonsistensi TEC dilakukan dengan memanfaatkan data TEC GIM sekitar satu bulan sebelum kejadian gempabumi. Data TEC GIM yang dipergunakan adalah data yang terdekat dengan area gempabumi. Data TEC GIM dapat diakses melalui <http://ftp.aiub.unibe.ch/>. Anomali TEC ditentukan dengan menghitung indeks inkonsistensi.

Data TEC GIM terdekat dengan area gempabumi yang telah diperoleh sebelumnya digunakan untuk menghitung nilai rata-rata TEC pada jam tertentu hingga didapatkan variasi diurnal rata-rata bulanan TEC. Selanjutnya dilakukan korelasi antara diurnal TEC harian dengan diurnal rata-rata bulanan TEC hingga diperoleh nilai koefisien korelasi. Indeks inkonsistensi dihitung dengan melakukan perbandingan simpangan koefisien korelasi harian terhadap nilai rata-rata koefisien korelasi dengan deviasi standar koefisien korelasinya. Anomali TEC ditentukan apabila nilai indeks inkonsistensi diluar ambang batas yang telah ditetapkan, yaitu lebih kecil dari -1 (Muslim, 2015; Sunardi, 2016, 2018; Rohadi, 2017).

**Tabel 1.** Parameter gempabumi di Maluku Utara periode tahun 2019 dengan magnitudo Mw > 6.5 (U.S. Geological Survey)

Waktu	Bujur	Lintang	Depth	M
7 Januari 2019	2.258	126.758	43.21	6.6
7 Juli 2019	0.5126	126.1892	35	6.9
14 Juli 2019	-0.5858	128.034	18.98	7.2
14 November 2019	1.6213	126.4156	33	7.1

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, variasi TEC juga dapat dipengaruhi oleh badai geomagnetik. Untuk itulah, inkonsistensi TEC yang disebabkan oleh faktor-faktor selain gempabumi perlu dicermati lebih mendalam. Dalam penelitian ini, data yang berkaitan dengan badai geomagnetik yaitu indeks Dst dipergunakan untuk mengevaluasi inkonsistensi TEC terkait dengan badai geomagnetik. Data indeks DST diperoleh dari layanan indeks Dst Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Indikasi badai geomagnetik yang dapat mempengaruhi konsentrasi TEC di ionosfer adalah nilai indeks Dst kurang dari -30 nT, seperti ditunjukkan pada Tabel 2 (Gonzales, 1999).

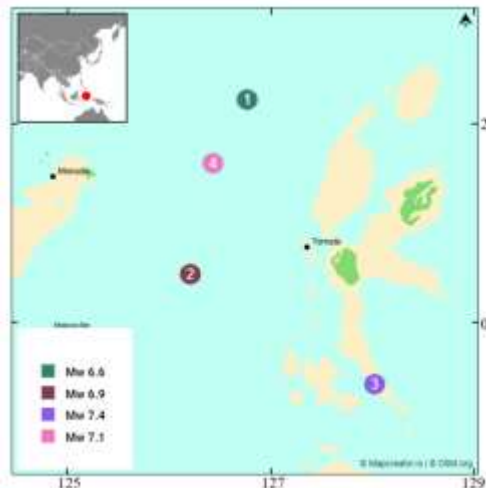
**Tabel 2.** Klasifikasi intensitas badai geomagnetik (Gonzales, 1999)

Rentang Indeks Dst	Kriteria Badai
-30 nT > Dst > -50 nT	Badai lemah
-50 nT > Dst > -100 nT	Badai sedang
-100 nT > Dst > -200 nT	Badai kuat
-200 nT > Dst > -300 nT	Badai sangat kuat
Dst < -300 nT	Badai ekstrim

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Anomali TEC sebelum kasus gempabumi besar di Maluku Utara dan sekitarnya pada periode tahun 2019 dianalisis menggunakan metode indeks inkonsistensi. Dalam penelitian ini, indeks inkonsistensi TEC yang dianalisis dibatasi untuk kasus gempabumi dengan *moment magnitude* (Mw) lebih besar dari 6.5. Adapun lokasi ke empat gempabumi tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Kasus pertama yang dianalisis adalah gempabumi Mw 6.6 yang terjadi di Halmahera Utara pada tanggal 7 Januari 2019 pukul 00:27:18 WIB. Variasi indeks inkonsistensi TEC sekitar satu bulan sebelum gempabumi tersebut telah diamati, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai indeks inkonsistensi yang dapat dipertimbangkan sebagai anomali TEC di ionosfer adalah manakala diluar ambang batas yang telah ditetapkan (apabila kurang dari -1). Inkonsistensi TEC yang cukup menonjol teramati pada tanggal 21 dan 29 Desember 2018 yaitu 17 dan 9 hari sebelum kejadian gempabumi. Badai geomagnetik juga diamati pada tanggal 21 dan 29 Desember 2018 sesuai data dari layanan indeks Dst Kyoto. Pada kedua tanggal tersebut tidak dijumpai adanya badai geomagnetik, sehingga inkonsistensi TEC yang terjadi dimungkinkan berkaitan dengan aktivitas sebelum kejadian gempabumi Halmahera Mw 6.6.



**Gambar 2.** Gempabumi Mw > 6.5 di Maluku Utara tahun 2019 (sumber peta : mapcreator).

Gempabumi Ternate dengan magnitudo Mw 6.9 terjadi pada tanggal 7 Juli 2019 dengan episenter di 126.1892 BT dan 0.5126 LU. Tiga inkonsistensi TEC yang cukup menonjol teramati sebelum gempabumi terjadi, yaitu pada tanggal 12 Juni 2019, 28 Juni 2019, dan 5 Juli 2019 atau 25 hari, 8 hari, dan 2 hari sebelum gempabumi terjadi (Gambar 4). Nilai indeks Dst dalam kondisi normal pada ketiga tanggal tersebut sehingga inkonsistensi TEC kemungkinan disebabkan oleh aktivitas *pre-seismic* sebelum gempabumi tersebut.

Kasus berikutnya adalah gempabumi di Halmahera Selatan pada tanggal 14 Juli 2019 dengan magnitudo Mw 7.2, dengan posisi di 128.034 BT dan 0.5858 LS, kedalaman mendekati 19 km. Hasil pengamatan indeks inkonsistensi TEC di dekat sumber gempabumi selama sebulan sebelum kejadian diperlihatkan pada Gambar 5. Inkonsistensi TEC yang menonjol terlihat pada tanggal 29 Juni 2019 dan 11 Juli 2019, atau 15 hari dan 3 hari sebelum kejadian gempabumi tersebut. Badai geomagnetik juga tidak teramati pada tanggal tersebut sehingga inkonsistensi TEC tersebut bukan disebabkan oleh adanya badai geomagnetik, dan kemungkinan disebabkan oleh proses persiapan terjadinya gempabumi.

Kasus keempat adalah gempabumi Maluku Utara dengan magnitudo Mw 7.1 pada tanggal 14 November 2019, dengan posisi di 126.6213 BT, 1.6213 LU, serta kedalaman 33 km. Hasil pengamatan indeks inkonsistensi TEC dan indeks Dst sebelum gempabumi ditunjukkan pada Gambar 6. Nilai indeks inkonsistensi nampak tidak normal pada tanggal 16 Oktober 2019, diikuti tanggal 25 Oktober 2019 dan 13 November 2019 atau 29 hari, 20 hari dan 1 hari sebelum gempabumi. Indeks Dst pada tanggal tersebut tidak menunjukkan adanya badai geomagnetik sehingga anomali TEC yang terjadi kemungkinan disebabkan oleh aktivitas *pre-seismic* sebelum gempabumi tersebut.



**Gambar 3.** Indeks inkonsistensi TEC, dan Dst sebelum gempabumi Halmahera Utara 7 Januari 2019 Mw 6.6



**Gambar 4.** Indeks inkonsistensi TEC, dan Dst sebelum gempabumi Ternate 7 Juli 2019 Mw 6.9





**Gambar 5.** Indeks inkonsistensi TEC, dan Dst sebelum gempabumi Halmahera Selatan 14 Juli 2019 Mw 7.2



**Gambar 6.** Indeks inkonsistensi TEC, dan Dst sebelum gempabumi Maluku Utara 14 November 2019 Mw 7.1

Secara umum, analisis indeks inkonsistensi TEC di ionosfer sebulan sebelum kejadian empat gempabumi di Maluku Utara pada tahun 2019 menunjukkan kemunculan lebih dari satu anomali TEC. Hasil ini juga sejalan dengan beberapa penelitian lainnya (Muslim, 2015; Sunardi, 2015; Sunardi, 2016; Sharma et al., 2018; Sharma et al., 2019; Sharma et al., 2020; Chetia et. Al., 2020).

Anomali TEC dalam bentuk indeks inkonsistensi diluar ambang batas yang ditentukan teramati mulai 29 hingga 1 hari sebelum gempabumi terjadi. Hasil ini memperkuat hipotesis yang telah ada sebelumnya terkait mekanisme LAIC (Lithosphere Atmosphere Ionosphere Coupling) yang menyebutkan adanya kaitan antara aktivitas *pre-seismic* di bawah permukaan bumi dengan perubahan kepadatan elektron di ionosfer.

Penelitian lanjutan perlu terus dikembangkan sehingga akan dapat diperoleh tingkat keberhasilan sesuai dengan yang diharapkan. Penelitian lebih lanjut terkait metode pemisahan anomali TEC akibat proses-proses dibawah permukaan bumi sebelum kejadian gempabumi dengan faktor-faktor penyebab inkonsistensi TEC lainnya menjadi subjek penelitian yang perlu terus dikembangkan. Hasil penelitian ini juga mendorong pengembangan sistem monitoring inkonsistensi TEC untuk deteksi prekursor gempabumi yang dapat bekerja secara otomatis dan mendekati waktu yang sebenarnya.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Inkonsistensi TEC yang cukup menonjol dan dapat diklasifikasikan sebagai anomali TEC sebelum gempabumi Halmahera Utara 7 Januari 2019 Mw 6.6, gempabumi Ternate 7 Juli 2019 Mw 6.9, gempabumi Halmahera Selatan 14 Juli 2019 Mw 7.2 serta gempabumi Maluku Utara 14 November 2019 Mw 7.1 teramati 29 hingga 1 hari sebelum gempabumi terjadi. Penelitian lebih lanjut perlu terus dilakukan sehingga dapat diperoleh tingkat keberhasilan deteksi prekursor gempabumi sesuai yang diharapkan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Center for Orbit Determination in Europe atas akses data GIM. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Prof. Dr. Buldan Muslim, M.Si dan Alpon Sepriando, M.Sc atas diskusi terkait metode korelasi TEC. Terimakasih juga penulis sampaikan kepada Kapuslitbang BMKG atas dukungannya dalam terselesaikannya publikasi ini.

## KONTRIBUSI ANGGOTA

Kontribusi anggota: BS melakukan pengolahan data, menyiapkan plot, melakukan analisis dan interpretasi data. BS, dan S menyediakan data TEC GIM dan indeks Dst. BS, SR, dan RSY menyiapkan dan mereview naskah publikasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Asnawi, Ekawati, S., Prabowo, D. U., 2012. Variasi Total Electron Content Ionosfer Pada Awal Peningkatan Aktivitas Matahari Siklus Ke 24, *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, Vol. 7, No. 1, 1-10.
- Chetia, T., Sharma, G., Dey, Ch., and Raju, P. L. N., 2020. Multi-Parametric Approach for Earthquake Precursor Detection in Assam Valley (Eastern Himalaya, India) using Satellite and Ground Observation Data. *Geotectonics*, Vol. 54 (1), 83–96. <https://doi.org/10.1134/S0016852120010045>.
- Dimitar, O., Pullinets, S., Alexey, R. A., Konstantin, T., Dimitri, D., Menax, K., Patrick, T., 2011. Atmosphere-Ionosphere Response to The M9 Tohoku Earthquake Revealed by Multi Instrument Space-Borne and Ground Observations: Preliminary Results, *Earthquake Science*, 24, 557–564. <https://doi.org/10.1007/s11589-011-0817-z>.
- Dogan, U., Ergintav, S., Skone, S., Arslan, N., Oz, D., 2011. Monitoring of The Ionosphere TEC Variations During The 17th August 1999 Izmit Earthquake Using GPS Data, *Earth Planets Space*, 63, 1183-1192. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.07.020>.
- Gonzales, W. D., Tsurutani, B. T., Clua de Gonzales, A. L., 1999. Interplanetary Origin of Magnetic Storms, *Space Sci. Rev.*, 88.
- Gregorczyk, A. K., Wielgosz, P., and Borkowski, A., 2017. Ionosphere Model for European Region Based on Multi-GNSS Data and TPS Interpolation, *Remote Sens*, 9 (12), 1221. <https://doi.org/10.3390/rs9121221>.
- Heki, K., 2011. Ionospheric Electron Enhancement Preceding The 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 38 (17312), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047908>.
- Heki, K., and Enomoto, Y., 2015. Mw Dependence of The Preseismic Ionospheric Electron Enhancements, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120 (8), 7006-7020. <https://doi.org/10.1002/2015JA021353>.
- Jin, S., Jin, R., Li, J. H., 2014. Pattern and Evolution of Seismo-Ionospheric Disturbances Following The 2011 Tohoku Earthquakes from GPS Observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119 (9), 7914–7927, <https://doi.org/10.1002/2014JA019825>.
- Kamogawa, M., 2006. Preseismic Lithosphere-Atmosphere-Ionosfer Coupling, *EOS Trans. American Geophysical Union*, Vol. 87 (40), 417-424.
- Kim, V. P., Hegai, V. V., 1999. *A Possible Presage of Strong Earthquakes In The Night-Time Mid-Latitude F2 Region Ionosphere, Atmospheric And Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated With Earthquakes*, Tokyo: Terra Scientific Publishing Company.
- Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Shan, S. J., Tsai, Y. B., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., and Yu, S. B., 2004. Pre-Earthquake Ionospheric Anomalies Registered By Continuous GPS TEC Measurements. *Annales Geophysicae*, Vol. 22 (5), 1585-1593. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-1585-2004>.
- Liu, J. Y., Chen, C. H., Chen, Y. I., Yang, W. H., Oyama, K. I., and Kuo, K. W., 2010. A Statistical Study of Ionospheric Earthquake Precursors Monitored by Using Equatorial Ionization Anomaly of GPS TEC In Taiwan During 2001–2007, *J. Asian. Earth. Sci.*, Vol. 39 (2), 76-80. <https://doi.org/10.1016/j.jseaeas.2010.02.012>.
- Liu, J. Y., Le, H., Chen, Y. I., Chen, C. H., Liu, L., Wan, W., Su, Y. Z., Sun Y. Y., Lin, C. H., Chen M. Q., 2011. Observations and Simulations of Seismoionospheric GPS Total Electron Content Anomalies Before The 12 January 2010 M7 Haiti Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 116, A04302, 1-9. <https://doi.org/10.1029/2010JA015704>.
- Muslim, B., 2015. Pengujian Teknik Korelasi Untuk Deteksi Pengaruh Aktivitas Gempa Bumi Besar Pada Ionosfer, *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol 12, No 2.
- Pulinets, S. A., Boyarchuk, K. A., Hegai, V. V., Kim, V. P., Lomonosov, A. M., 2000. Quasielectrostatic model of atmospherethermosphere-ionosphere coupling, *Adv Space Res*, Vol. 26 (8), 1209-1218. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)01223-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)01223-5).
- Pulinets, S. A., 1998. Strong Earthquakes Prediction Possibility With The Help Of Topside Sounding From Satellites, *Adv. Space. Res*, 21(3), 455–458. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00880-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00880-6).
- Pulinets, S., 2004. Ionospheric Precursors of Earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3), 413-436. DOI:10.3319/TAO.2004.15.3.413(EP).
- Rohadi, S., Sakya, A. E., Muslim, B., Sunardi, B., Sulastrri, Sepriando, A., 2017. Py-Ionoquake: Sistem Deteksi Anomali Total Electron Content (TEC) Untuk Studi Prekursor Gempa Bumi, *Prosising SNSA 2016*, Bandung, 22 November 2016.

- Schaer, S., 1999, Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System, *Ph.D. Thesis*, Astronomical Institute, University of Berne, Bern, Switzerland.
- Sharma, G., Mohanty, S., Champatiray, P. K., Singh, M. S., Sarma, K., and Raju, P. L. N., 2018. Total Electron Content and Epicentral Distance of 2015 Mw 7.8 Nepal Earthquake Revealed by Continuous Observations Data, *Current Science*, 115(1), 27-29.
- Sharma, G., Champatiray, P. K., and Kannaujiya, S., 2019. *Ionospheric Total Electron Content for Earthquake Precursor Detection*. Book Chapter in Remote Sensing of Northwest Himalayan Ecosystems, Springer Nature, Singapore, 57-66.
- Sharma, G., Saikia, P., Walia, D., Banerjee, P., Rajua, P.L.N., 2020. TEC Anomalies Assessment for Earthquakes Precursors in North-Eastern India and Adjoining Region Using GPS Data Acquired During 2012–2018, *Quaternary International*. Available online 22 July 2020. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.07.009>.
- Shi, K., Liu, X., Guo, J., Liu, L., You, X., Wang, F., 2019. Pre-Earthquake and Coseismic Ionosphere Disturbances of the Mw 6.6 Lushan Earthquake on 20 April 2013 Monitored by CMONOC, *Atmosphere*, 10 (4), 216. <https://doi.org/10.3390/atmos10040216>.
- Subakti, H., Puspito, N. T., Widarto, D. S., 2008. Analisis Variasi GPS–TEC Yang Berhubungan Dengan Gempabumi Besar Di Sumatera, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol. 9 (1), 11-23. <http://dx.doi.org/10.31172/jmg.v9i1.18>.
- Sunardi, B., Muslim, B., Pakpahan, S., 2015. Anomali Total Electron Content (TEC) Sebelum Gempabumi Kuat di Indonesia Tahun 2014, *Prosiding Seminar Nasional Fisika 2015*, 378-384.
- Sunardi, B., dan Sulastrri, 2016. Pemantauan Anomali Total Electron Content (TEC) Berkaitan Dengan Kejadian Gempabumi di Sekitar Wilayah Jawa Tahun 2015, *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol 1, No. 2, 95-102. <http://doi.org/10.21009/SPEKTRA>.
- Sunardi, B., Muslim, B., Sakya, A. E., Rohadi, S., Sulastrri, Murjaya, J., 2018. Ionospheric Earthquake Effects Detection Based on Total Electron Content (TEC) GPS Correlation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 132. Doi :10.1088/1755-1315/132/1/012014.
- Tariq, M. A., Shah, M., Pajares, M. H., Iqbal, T., 2019. Pre-Earthquake Ionospheric Anomalies Before Three Major Earthquakes By GPS-TEC and GIM-TEC Data During 2015–2017, *Advances in Space Research*, Vol. 63 (7), 2088-2099. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.028>.
- Ulukavak, M., and Yalcinkaya, M., 2017. Precursor Analysis of Ionospheric GPS-TEC Variations Before The 2010 M7.2 Baja California Earthquake, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 8 (2), 295-308. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1208684>.
- Yildirim, O., Inyurt, S., Mekik, C., 2016. Review of Variations In Mw< 7 Earthquake Motions On Position And TEC (Mw= 6.5 Aegean Sea Earthquake Sample. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16 (2), 543-557. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-543-2016>.