

Αιφνίδιες αλλαγές στις εκπομπές διοξειδίου του αζώτου μετά την επιβολή απαγόρευσης κυκλοφορίας λόγω της πανδημίας COVID-19

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ (ΕΥ)

Δημήτριος Μπαλής
Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής



ΜΕΛΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ

Μαρία-Ελισσάβητ Κουκουλή,
Μεταδιδάκτορας Ερευνήτρια
Τμήματος Φυσικής ΑΠΘ

Ιωάννα Σκουλίδου,
Υποψήφια Διδάκτορας
Τμήματος Φυσικής ΑΠΘ

Ανδρέας Καραβιάς,
Μεταπτυχιακός Φοιτητής
Τμήματος Γεωγραφίας
Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου
Αθηνών

Ισαάκ Παρχαρίδης,
Καθηγητής Τμήματος
Γεωγραφίας Χαροκοπέιου
Πανεπιστημίου Αθηνών

Astrid Manders,
Researcher TNO, Climate,
Air and Sustainability,
Utrecht, The Netherlands

Arjo Segers,
Researcher TNO, Climate,
Air and Sustainability,
Utrecht, The Netherlands

Jos van Geffen,
Researcher Royal
Netherlands
Meteorological Institute
(KNMI),
De Bilt, The Netherlands

Henk Eskes,
Researcher Royal
Netherlands Meteorological
Institute (KNMI), De Bilt, The
Netherlands.

Περιβάλλον

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρωτόγνωρη οδηγία που δόθηκε για πρώτη φορά εν καιρώ ειρήνης κατά τη σύγχρονη εποχή για σχεδόν ολοκληρωτική απαγόρευση κυκλοφορίας του πληθυσμού της Ελλάδας, ως μέσο προστασίας από το σοβαρό οξύ αναπνευστικό σύνδρομο Coronavírus-2, κοινώς γνωστό ως COVID-19, έχει προκαλέσει ακούσιες θετικές συνέπειες στα επίπεδα ποιότητας του αέρα της χώρας. Οι μέσες μηνιαίες τιμές της τροποσφαιρικής στήλης διοξειδίου του αζώτου (NO₂), όπως μετρήθηκαν από το δορυφορικό όργανο S5P/TROPOMI, δείχνουν μια μέση μείωση από -3% σε -26% (-1% σε -27%) με μέσο όρο -22% (-11%) για τον Μάρτιο και τον Απρίλιο 2020 αντίστοιχα, σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, στις έξι μεγαλύτερες ελληνικές μητροπολιτικές περιοχές, που οφείλεται, κυρίως, σε μειώσεις εκπομπών οχημάτων. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν σημαντικές επιπτώσεις στις εκπομπές των πλοίων που κινήθηκαν στο Αιγαίο, καθώς και γύρω από τα μεγάλα Ελληνικά λιμάνια,

15

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ/ KEYWORDS

Ποιότητα αέρα
Διοξείδιο του αζώτου
NO₂
Εκπομπές
Sentinel-5P
TROPOMI
LOTOS-EUROS
COVID-19
Πανδημία
Αθήνα
Ελλάδα

AUTH

RC 19

Research

Covid-19

περίπου -12% (-5%). Για την πρωτεύουσα, την Αθήνα, ήταν εφικτή η εβδομαδιαία ανάλυση των δεδομένων και διαφάνηκε σημαντική μείωση του φορτίου NO₂ μεταξύ -8% και -43% για επτά από τις οκτώ εβδομάδες που μελετήθηκαν. Προσομοιώσεις από το μοντέλο χημείας και μεταφοράς LOTOS-EUROS δείχνουν ότι το μέγεθος αυτών των μειώσεων δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στη διαφορά μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζουν τα επίπεδα του NO₂ κατά τον Μάρτιο και τον Απρίλιο του 2020 και τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους του προηγούμενου έτους. Λαμβάνοντας υπόψη αυτόν τον παράγοντα, η προκύπτουσα μείωση εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 0% και -37% για τις πέντε μεγαλύτερες πόλεις, με μέσο όρο ~ -10%. Καθώς οι μεταφορές είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος τομέας που επηρεάζει την ποιότητα του αέρα της Ελλάδας, αυτή η περίπτωση μπορεί να βοηθήσει τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής να εφαρμόσουν πιο στοχοθετημένα μέτρα, για να βοηθήσουν την Ελλάδα να μειώσει περαιτέρω τις εκπομπές της, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ποιότητας του αέρα.

Αυτή η εργασία αποτελεί μέρος της δημοσιευμένης εργασίας των Koukouli, M.-E., Skoulidou, I., Karavias, A., Parcharidis, I., Balis, D., Manders, A., Segers, A., Eskes, H., and van Geffen, J.: Sudden changes in nitrogen dioxide emissions over Greece due to lockdown after the outbreak of COVID-19, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 1759–1774, <https://doi.org/10.5194/acp-21-1759-2021>, 2021.

AUTH

RC 19

ΠΗΓΗ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ

Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «ΠΑΝελλαδική υποδομή για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής σύστασης και κλιματικής Αλλαγής (ΠΑΝΑΚΕΙΑ)» (MIS 5021516), καθώς και στο πλαίσιο της Πράξης «Καινοτόμο Σύστημα Παρακολούθησης και Πρόγνωσης της Ποιότητας του Αέρα (ΚΑΣΤΟΜ)» (code T1EDK-01697, MIS 5031298) που εντάσσονται στη Δράση «Ενίσχυση Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας» και χρηματοδοτούνται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης)

Εισαγωγή

Αιφνίδιες αλλαγές στην ποιότητα αέρα από δορυφορικές παρατηρήσεις

Αιφνίδιες αλλαγές στα επίπεδα εκπομπών αερίων ρύπων από δορυφορικές παρατηρήσεις έχουν ήδη αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Ενδεικτικά, αναφέρουμε την εργασία των Castellanos και Boersma, 2012, οι οποίοι ανέφεραν σημαντικές μειώσεις των οξειδίων του αζώτου στην Ευρώπη λόγω της περιβαλλοντικής πολιτικής και της οικονομικής ύφεσης βάσει των παρατηρήσεων OMI / Aura μεταξύ 2004 και 2010. Οι Vrekoussis et al., 2013 και Zyrichidou et al., 2019, για τον Ελλαδικό χώρο, αναφέρουν ισχυρούς συσχετισμούς μεταξύ των επιπέδων ρύπων και των οικονομικών δεικτών που δείχνουν ότι η οικονομική ύφεση του 2008 είχε ως αποτέλεσμα αναλογικά χαμηλότερα επίπεδα ρύπων σε μεγάλες περιοχές της Ελλάδας. Συγκεκριμένα, οι Zyrichidou et al., 2019, για τα έτη 2008 έως 2015, έδειξαν ότι, ενώ οι χειμερινές τάσεις του τροποσφαιρικού NO₂ ήταν αρνητικές, οι τάσεις για την φορμαλδεΐδη ήταν στατιστικώς σημαντικά θετικές και οφείλονται στην αυξημένη χρήση οικονομικότερων μεθόδων θέρμανσης (π.χ. τζάκια και ξυλόσομπες). Όσον αφορά στην πανδημία COVID-19, αναφέρουμε τα ευρήματα των Liu et al., 2020, οι οποίοι, με βάση τόσο το δορυφορικό όργανο OMI/Aura όσο και το S5P/TROPOMI, υπολόγισαν μια πτώση 48% στην τροποσφαιρική στήλη NO₂ από τις 20 ημέρες κατά μέσο όρο πριν από την Κινέζικη πρωτοχρονιά 2020 έως τις 20 ημέρες μετά, κατά 20% μεγαλύτερη από αυτήν των τελευταίων ετών. Οι Bauwens et al., 2020, με βάση τους ίδιους αισθητήρες, αναφέρουν, επίσης, μια μέση πτώση της στήλης NO₂ σε όλες τις κινεζικές πόλεις -40% σε σχέση με την ίδια περίοδο το 2019, ενώ οι μειώσεις στη Δυτική Ευρώπη και τις ΗΠΑ βρέθηκαν να κυμαίνονται μεταξύ -20 έως -38%.

Δορυφορικές παρατηρήσεις της τροποσφαιρικής στήλης διοξειδίου του αζώτου

Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιούμε τα ελεύθερης πρόσβασης τροποσφαιρικά δεδομένα NO₂ από τον S5P/TROPOMI (Veefkind et al., 2012), v1.2 και v1.3, για την χρονική

περίοδο Μάρτιος-Απρίλιος 2019 και για Μάρτιος-Απρίλιος του 2020¹. Ο αλγόριθμος που παράγει αυτά τα δεδομένα περιγράφεται από τους van Geffen et al. (2019), ενώ η επικύρωσή/αξιολόγησή τους σε σχεδόν πραγματικό χρόνο παρουσιάζεται μέσω της ιστοσελίδας του S5P Mission Performance Center². Για λεπτομέρειες πάνω στον αλγόριθμο και συγκεκριμένες οδηγίες για τη χρήση των δεδομένων παραπέμπουμε στο επίσημο TROPOMI Algorithm Theoretical Basis Document³, στο Product User Manual⁴ καθώς και στο Product Readme File⁵. Σε αυτήν την εργασία, οι παρατηρήσεις για την περιοχή της Ελλάδας, του Αιγαίου, της Μικράς Ασίας και της Κωνσταντινούπολης, με συντεταγμένες μεταξύ 19° και 30°Α και 34° και 42°Β, αθροίστηκαν σε πλέγμα 0.10x0.05° για διαφορετικά χρονικά σενάρια που συζητούνται παρακάτω. Ο δείκτης ποιότητας qa_flag ≥ 75 χρησιμοποιήθηκε ως φίλτρο, όπως συνιστάται, διασφαλίζοντας ότι τα εναπομείναντα δεδομένα αντιστοιχούν σε ανέφελες παρατηρήσεις.

Προσομοιώσεις του μοντέλου

Το μοντέλο χημείας και μεταφοράς LOTOS-EUROS v2.2.001 (Manders et al., 2017) χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις της στήλης διοξειδίου του αζώτου πάνω από τον Ελλαδικό χώρο για τον Μάρτη και τον Απρίλη του 2019 και του 2020. Το μοντέλο LOTOS-EUROS είναι το εθνικό μοντέλο για την ποιότητα αέρα της Ολλανδίας (Vlemmix et al., 2015) και συμμετέχει στην επιχειρησιακή πρόγνωση του Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Το μοντέλο διαχωρίζει 10 κατακόρυφα επίπεδα από την επιφάνεια ως τα 175hPa, ενώ τα μετεωρολογικά πεδία ανακτήθηκαν από την ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) σε χωρική ανάλυση 7x7km. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές προέρχονται από τη βάση εκπομπών CAMS-REG (CAMS Regional European emissions) για το έτος 2015 σε χωρική ανάλυση 0.1°x0.05° (Kuenen et al., 2014). Για τις ανάγκες αυτής της εργασίας, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με ωριαία ανάλυση στο ίδιο πλέγμα και χωρική ανάλυση, όπως και οι δορυφορικές μετρήσεις. Λεπτομερής αξιολόγηση των προσομοιώσεων NO₂ από το LOTOS-EUROS για όλη την Ελλάδα έδειξε ότι, σε σύγκριση με τις in situ μετρήσεις συγκέντρωσης, ο συσχετισμός κυμαίνεται μεταξύ 0,42 έως 0,55 για τους διάφορους σταθμούς ποιότητας αέρα που μελετήθηκαν, ενώ, σε σύγκριση με τις μετρημένες στήλες από επίγεια όργανα MAXDOAS η συσχέτιση κυμαίνεται μεταξύ 0,41 και 0,55 για το αστικό φορτίο και μεταξύ 0,58 και 0,64 για συγκρίσεις σε καθαρότερες περιοχές (Skoulidou et al., 2020). Η περιοχή που μελετήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία φαίνεται και στην Εικ. 1.

¹ <https://scihub.copernicus.eu/>

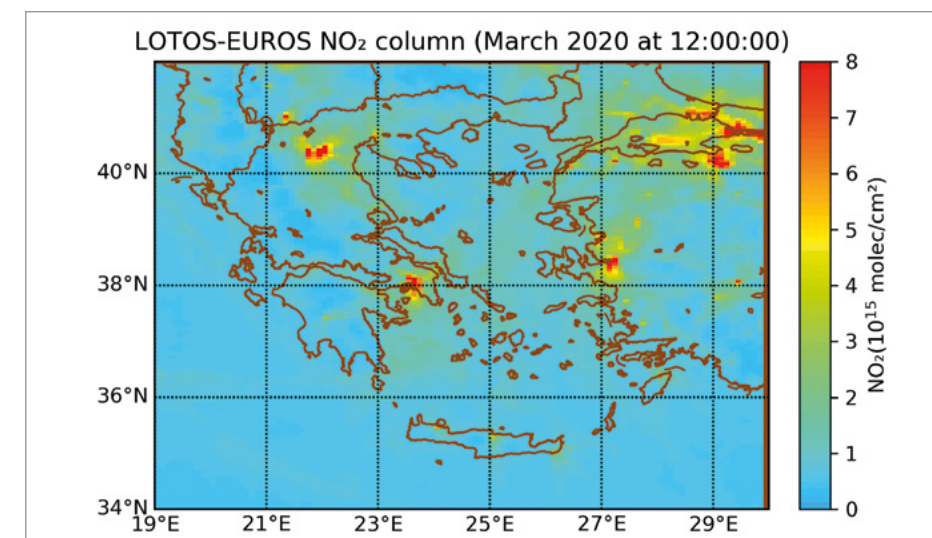
² <https://mpc-vdaf-server.tropomi.eu/>

³ <http://www.tropomi.eu/document/atbd-nitrogen-dioxide>

⁴ <http://www.tropomi.eu/document/product-user-manual-nitrogen-dioxide-0>

⁵ <http://www.tropomi.eu/document/product-readme-file-nitrogen-dioxide>

Εικ. 1. Μέση μηνιαία προσομοίωση τροποσφαιρικής στήλης NO₂ για τον Μάρτιο 2020 από το μοντέλο LOTOS-EUROS, στις 12:00 UTC, την κατά προσέγγιση ώρα διέλευσης του TROPOMI πάνω από την περιοχή



Μεθοδολογία

Για να διασφαλιστεί ότι η παρατηρούμενη μείωση των επιπέδων NO₂ δεν οφείλεται σε διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες μεταξύ των δύο υπό μελέτη ετών, υπολογίστηκαν οι σχετικές διαφορές στις στήλες NO₂ που παρέχονται από το μοντέλο LOTOS-EUROS, και η μέση διαφορά τους ορίστηκε ως η αναμενόμενη συνεισφορά από τις διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες. Έτσι, διαμορφώθηκε ένα τυπικό επίπεδο πάνω από το οποίο αναμένουμε μειώσεις που σχετίζονται με τις εκπομπές του αερίου. Οι όποιες διαφορές στις δορυφορικές παρατηρήσεις περιέχουν την αλληλένδετη επίδραση των διαφορών στις συγκεντρώσεις λόγω μετεωρολογίας αλλά και λόγω εκπομπών. Στην εφαρμογή του μοντέλου οι εκπομπές διατηρήθηκαν σταθερές για τις δύο περιόδους, αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι ορθές μετεωρολογικές συνθήκες για το 2019 και το 2020, ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης της μετεωρολογίας στις συγκεντρώσεις. Καθώς οι δορυφορικές παρατηρήσεις δεν είναι διαθέσιμες για όλες τις ημέρες και όλες τις περιοχές, λόγω πιθανής νεφοκάλυψης, οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, τελικώς, αφορούν μόνο στις ίδιες μέρες και ρικελ, όπου υπάρχει δορυφορική μέτρηση. Συνεπώς, η ανάλυση ήταν εφικτή σε μηνιαία βάση για όλο τον Ελλαδικό χώρο. Μόνο για την περίπτωση της Αθήνας, όπου εμφανίζονται και οι ισχυρότερες εκπομπές λόγω αυτοκίνησης, ήταν εφικτή η ανάλυση σε εβδομαδιαία βάση.

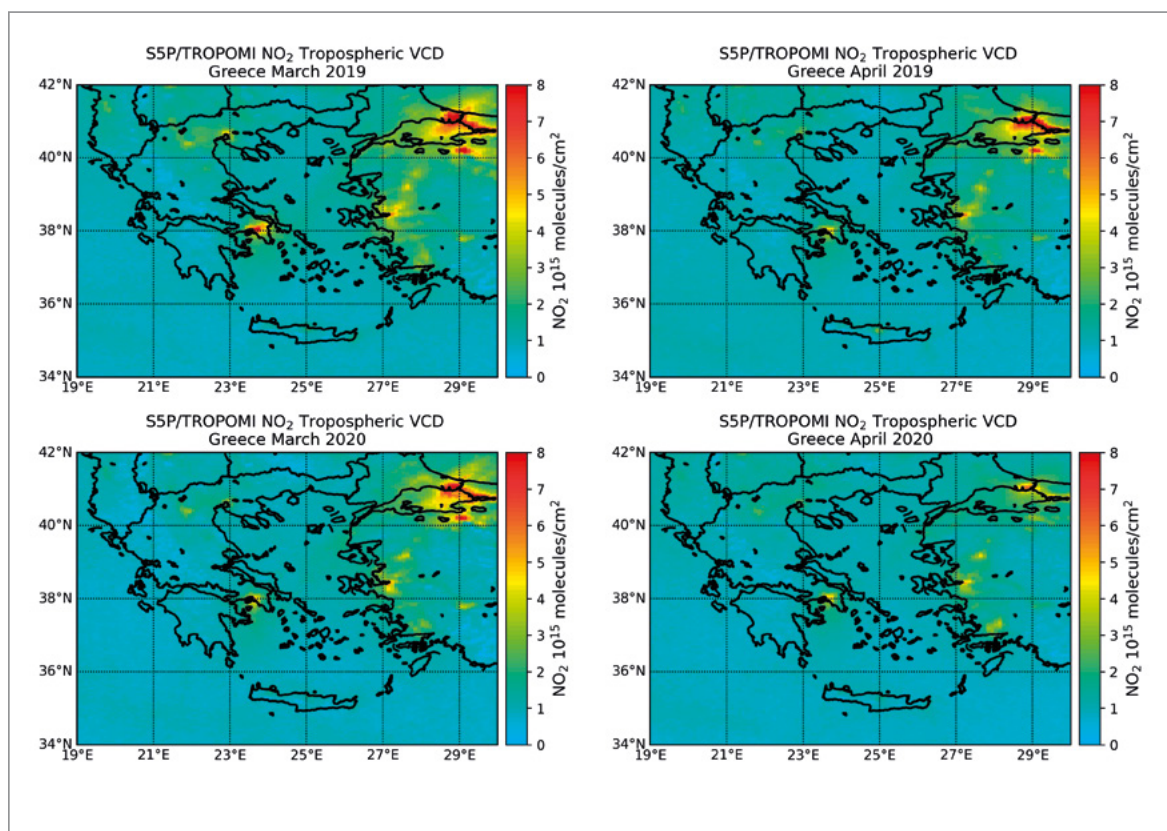
Αποτελέσματα

Στην παρακάτω ενότητα, παρουσιάζεται πρώτα η επίδραση της απαγόρευσης της κυκλοφορίας στα μηνιαία επίπεδα NO₂ (α) σε ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος, (β) στις έξι πόλεις της Ελλάδος με τον μεγαλύτερο αριθμό κατοίκων και (γ) στις εκπομπές των πλοίων στο Αιγαίο Πέλαγος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση της απαγόρευσης στην Αθήνα, σε εβδομαδιαίο επίπεδο.

Επιδράσεις της απαγόρευσης της κυκλοφορίας στα μηνιαία επίπεδα του NO₂

Στην Εικ. 2 φαίνονται τα μέσα μηνιαία επίπεδα τροποσφαιρικού NO₂ πάνω από την περιοχή της Ελλάδας, των βόρειων γειτονικών χωρών, του Αιγαίου Πελάγους, των παράλιων της Τουρκίας και την Κωνσταντινούπολη, για τα έτη 2019 (αριστερά) και 2020 (δεξιά), και για τους μήνες Μάρτιο (πάνω) και Απρίλιο (κάτω). Παρόλο που οι περιοχές, όπου εμφανίζονται υψηλές εκπομπές NO₂, (όπως είναι η Τουρκία και οι πορείες των ακτοπλοϊκών γραμμών) διακρίνονται έντονα το 2019, οι διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες μεταξύ Μαρτίου και Απριλίου επηρεάζουν αισθητά τα σημεία στα οποία εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές του NO₂ κάθε φορά αλλά και τα απόλυτα επίπεδα της τιμής του NO₂ σε αυτές. Οι μεγάλες τιμές NO₂ στην Κωνσταντινούπολη και στα στενά του Βοσπόρου παραμένουν υψηλές και τον Μάρτιο του 2020 (πάνω δεξιά), ενώ τα περισσότερα αστικά κέντρα εκπομπών στην Ελλάδα απουσιάζουν από τον αντίστοιχο χάρτη και, ιδιαίτερα, πάνω από την Αθήνα, όπου παρατηρείται μία κατακόρυφη μείωση των επιπέδων NO₂. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Ελλάδα είχε εφαρμόσει ήδη το μέτρο της απαγόρευσης της κυκλοφορίας μέσα στην τρίτη εβδομάδα του Μαρτίου, ενώ η Τουρκία επέβαλε διακοπτόμενους περιορισμούς στις μετακινήσεις από τις αρχές του Απριλίου. Τον Απρίλιο του 2020, όπως αναμενόταν, τα επίπεδα του NO₂ έχουν μειωθεί και στις περιοχές υψηλών επιπέδων NO₂ της Τουρκίας.

Εικ. 2. Μέσες μηνιαίες τιμές της τροποσφαιρικής στήλης NO₂ από τον TROPOMI, σε 10¹⁵ molecules/cm², για τον Μάρτιο (πάνω) και τον Απρίλιο (κάτω), για το 2019 (αριστερά) και το 2020 (δεξιά)

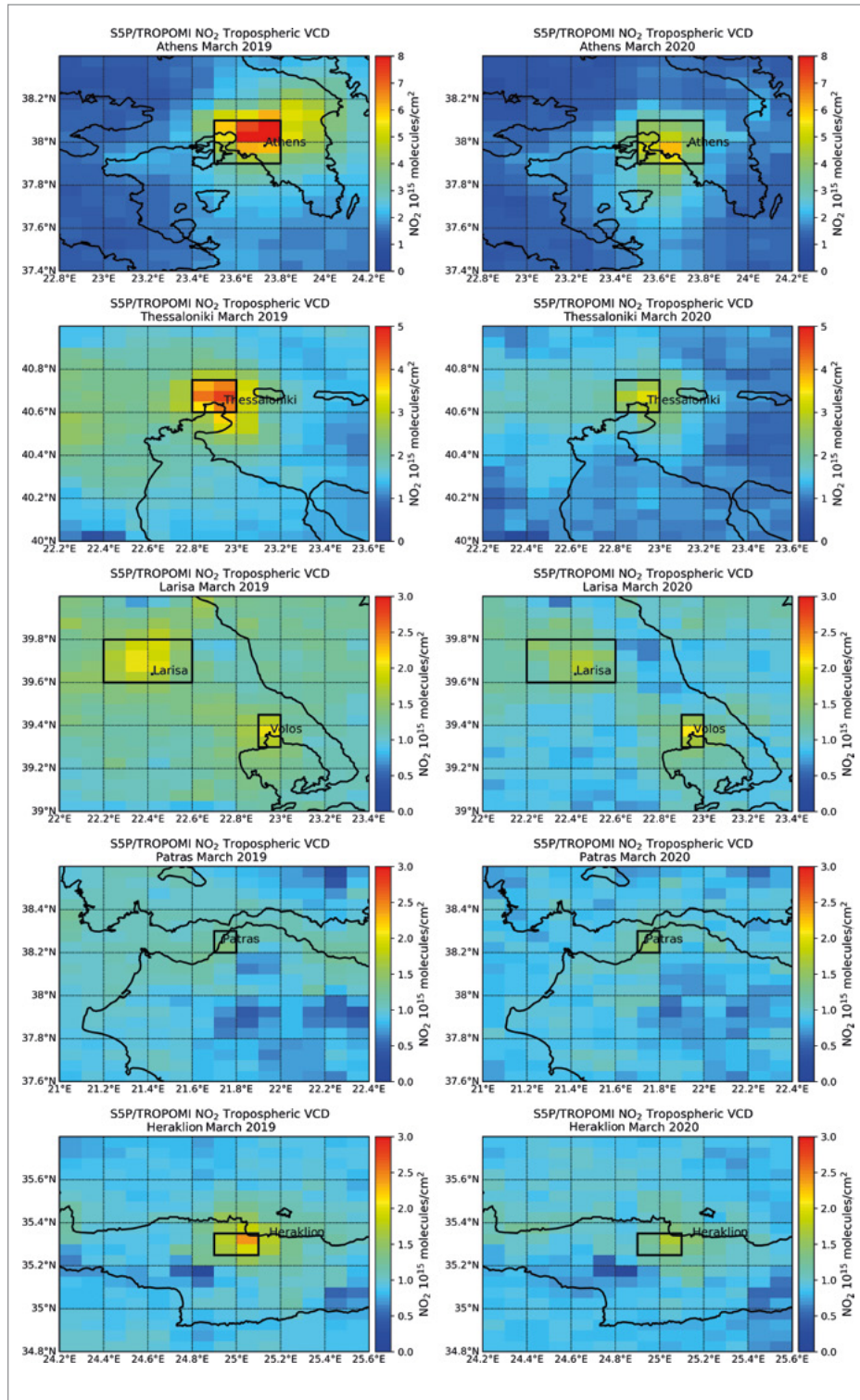


Στην Εικ. 3 η μέση τιμή για την τροποσφαιρική στήλη NO₂ από τον TROPOMI, σε 10¹⁵ molecules/cm², δίνεται για τον Μάρτιο του 2019 (αριστερά) και 2020 (δεξιά) για τις έξι μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, από πάνω προς τα κάτω: Αθήνα [37.98° N, 23.72° E], Θεσσαλονίκη [40.64° N, 22.94° E], Λάρισα [39.63° N, 22.41° E], Βόλος [39.36° N, 22.95° E], Πάτρα [38.24° N, 21.73° E] και Ηράκλειο [35.33° N, 25.14° E]. Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα σε περιοχές, όπου αναμένονται οι μεγαλύτερες διαφορές στις εκπομπές λόγω της μεγάλης αυτοκίνησης. Οι έξι αυτές πόλεις, σύμφωνα με τη Ελληνική Στατιστική Αρχή και την απογραφή πληθυσμού του 2011⁶, περιλαμβάνουν τα 4,45 εκ των 10,8 εκατομμυρίων του ελληνικού πληθυσμού. Οι αντίστοιχες μέσες τιμές και η διαφορά των επιπέδων του 2020 σε σχέση με το 2019 δίνονται στον Πίνακα 1.

Στην Εικ. 4, δίνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της τροποσφαιρικής στήλης NO₂ από τον TROPOMI, σε 10¹⁵ molecules/cm², για τον Μάρτιο (πάνω) και τον Απρίλιο (κάτω) του 2019 (μπλε) και του 2020 (πορτοκαλί) στις έξι μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, από τα αριστερά προς τα δεξιά: Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Λάρισα, Βόλος, Πάτρα και Ηράκλειο. Γενικά, τα επίπεδα NO₂ είναι ανάλογα του πληθυσμού της κάθε πόλης, με την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη να έχουν τα υψηλότερα επίπεδα, ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις πόλεις παρουσιάζουν μια παρόμοια κατάσταση. Στον Πίνακα 1 δίνονται τα στατιστικά στοιχεία που σχετίζονται με την Εικ. 4. Αρχικά, παρατηρείται ότι για τον μήνα Μάρτιο οι σχετικές διαφορές στα επίπεδα του NO₂ που μετρήθηκαν από το δορυφορικό όργανο μεταξύ 2019 και 2020, κυμαίνονται μεταξύ -3 και -34%, ενώ για τον μήνα Απρίλιο μεταξύ -1% και -27%. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση του Βόλου, όπου παρατηρείται μία αύξηση ίση με 5%. Γενικά, όπως φάνηκε ήδη στην Εικ. 3, τα επίπεδα NO₂ είναι υψηλότερα στις περιπτώσεις του Μαρτίου σε σχέση με τα αντίστοιχα του μήνα Απριλίου. Υπενθυμίζεται, επίσης, ότι λόγω πιθανής νεφοκάλυψης οι μήνες δεν μπορούν να είναι το ίδιο αντιπροσωπευτικοί για όλες τις πόλεις.

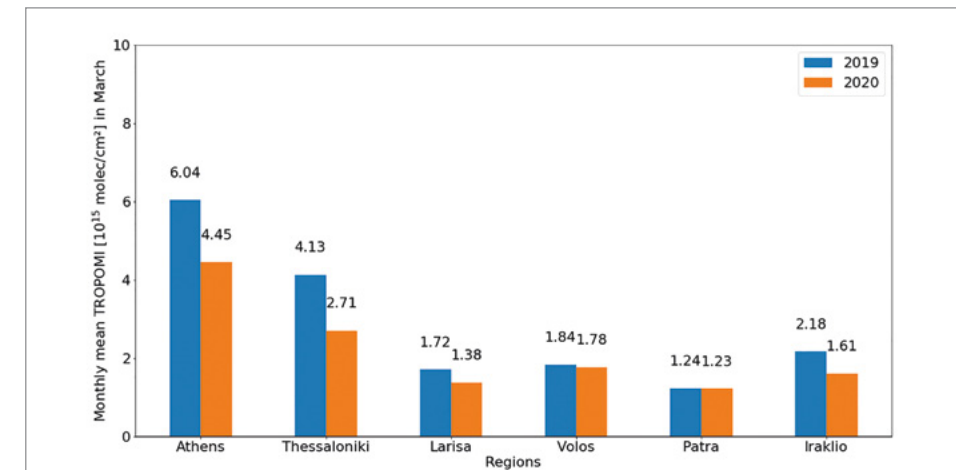
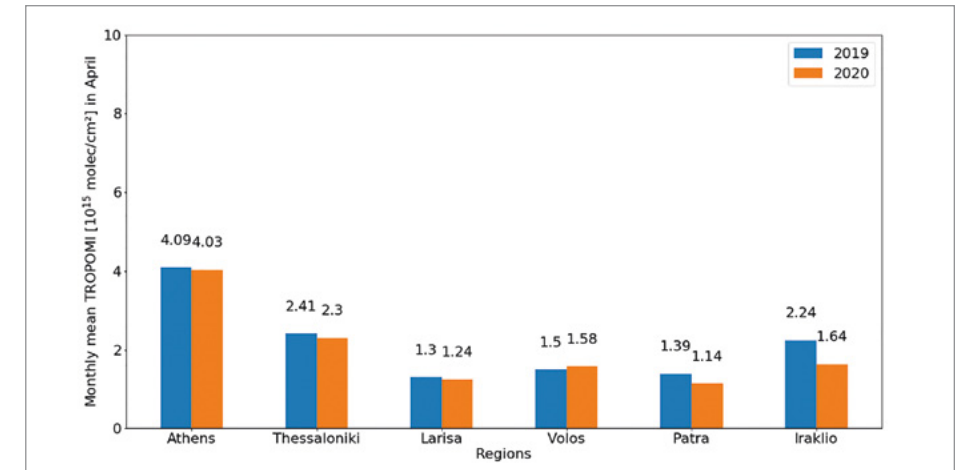
Στο πρώτο/πάνω γράφημα της Εικ. 5, απεικονίζονται οι απόλυτες διαφορές των μέσων μηνιαίων τιμών της τροποσφαιρικής στήλης NO₂ (10¹⁵ molecules/cm²) μεταξύ 2020 και 2019 για τον TROPOMI (πορτοκαλί), και το LOTOS-EUROS (μπλε), και για τις έξι μεγαλύτερες πόλεις στην Ελλάδα, δηλαδή για την Αθήνα, τη Θεσσαλονίκη, τη Λάρισα, τον Βόλο, την Πάτρα και το Ηράκλειο. Στο γράφημα αυτό παρουσιάζονται οι απόλυτες και όχι οι σχετικές διαφορές, καθώς μία σχετικά μικρή μεταβολή σε χαμηλές τιμές NO₂ θα είχε σαν αποτέλεσμα μια εσφαλμένη εικόνα μιας μεγάλης μείωσης, όπως φαίνεται στην περίπτωση της Πάτρας (δεύτερη από τα δεξιά), η οποία έχει τις χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις, μεταξύ 1,14±0,01 and 1,39±0,01x10¹⁵ molecules/cm² για τους μήνες που μελετήθηκαν. Στο κάτω διάγραμμα της Εικ. 5, οι μεταβολές στις εκπομπές έχουν ποσοτικοποιηθεί υπολογίζοντας τις ποσοστιαίες διαφορές του LOTOS-EUROS μεταξύ του 2019 και του 2020 και τις αντίστοιχες από τον TROPOMI και αφαιρώντας τις δύο αυτές ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ τους. Οι μεταβολές υπολογίστηκαν περίπου -12% για την Αθήνα, -9% για τη Θεσσαλονίκη, -12% για τη Λάρισα, σχεδόν μηδενικές για τον Βόλο (όπως ήδη φαίνεται και από τις παρατηρήσεις του TROPOMI στον τρίτο χάρτη της Εικ. 3), -37% για την Πάτρα και, απροσδόκητα θετικές, +15%, για το Ηράκλειο.

⁶ <https://www.statistics.gr/2011-census-pop-hous>



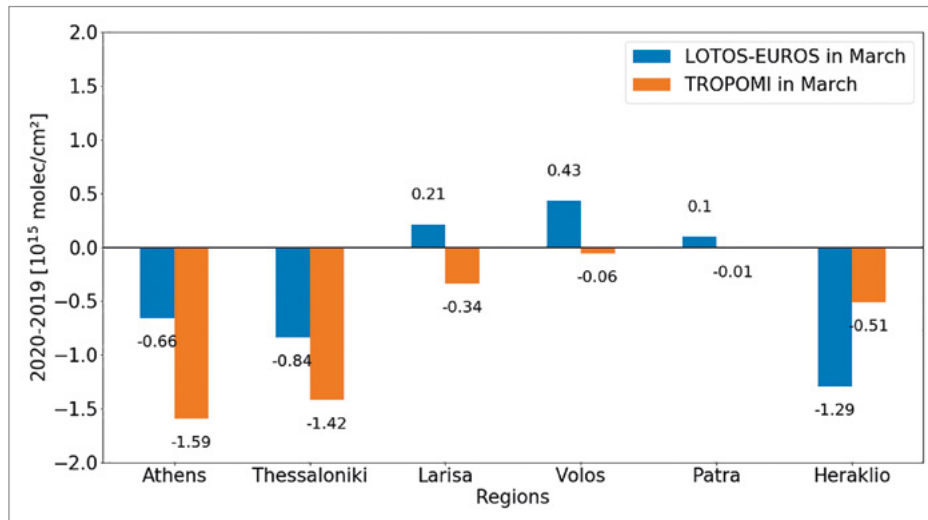
Εικ. 3. Μέσες μηνιαίες τιμές της τροποσφαιρικής στήλης NO₂ από τον TROPOMI, σε 10¹⁵ molecules/cm², για τον Μάρτιο 2019 (αριστερά) και 2020 (δεξιά), για τις έξι μεγάλες πόλεις της Ελλάδας, από πάνω: Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Λάρισα και Βόλο, Πάτρα και Ηράκλειο. Τα έντονα τετράγωνα στην αριστερή στήλη δηλώνουν τα ριχελς που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Εικ. 4. Μέσες μηνιαίες τιμές της τροποσφαιρικής στήλης NO₂ από τον TROPOMI, σε 10¹⁵ molecules/cm², για τον Μάρτιο (πάνω) και τον Απρίλιο (κάτω) για το 2019 (μπλε) και για το 2020 (πορτοκαλί) για τις έξι μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδος, από τα αριστερά προς τα δεξιά: Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Λάρισα, Βόλος, Πάτρα και Ηράκλειο



Πίνακας 1. Μέσες μηνιαίες τιμές τροποσφαιρικής στήλης NO₂ από τον TROPOMI, σε 10¹⁵ molecules/cm² στις έξι μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας για τον Μάρτη (αριστερές στήλες) και τον Απρίλη (δεξιές στήλες) για τα έτη 2019 και 2020, καθώς και η σχετική τους διαφορά, η τυπική απόκλιση και ο αριθμός των ριχελς που χρησιμοποιήθηκαν.

Location	03.2019	03.2020	% diff	04.2019	04.2020	% diff
Αθήνα [12]	6,04±0,48	4,45±0,22	-26%	4,09±0,14	4,03±0,11	-1%
Θεσσαλονίκη [6]	4,13±0,14	2,71±0,16	-34%	2,41±0,09	2,30±0,11	-5%
Λάρισα [6]	1,72±0,06	1,38±0,04	-19%	1,30±0,03	1,24±0,02	-5%
Βόλος [3]	1,84±0,08	1,78±0,12	-3%	1,50±0,08	1,58±0,11	+5%
Πάτρα [2]	1,24±0,07	1,23±0,06	-	1,39±0,01	1,14±0,01	-18%
Ηράκλειο [4]	2,18±0,14	1,61±0,10	-26%	2,24±0,15	1,64±0,07	-27%



Επιδράσεις της απαγόρευσης της κυκλοφορίας σε εβδομαδιαίο επίπεδο στην Αθήνα

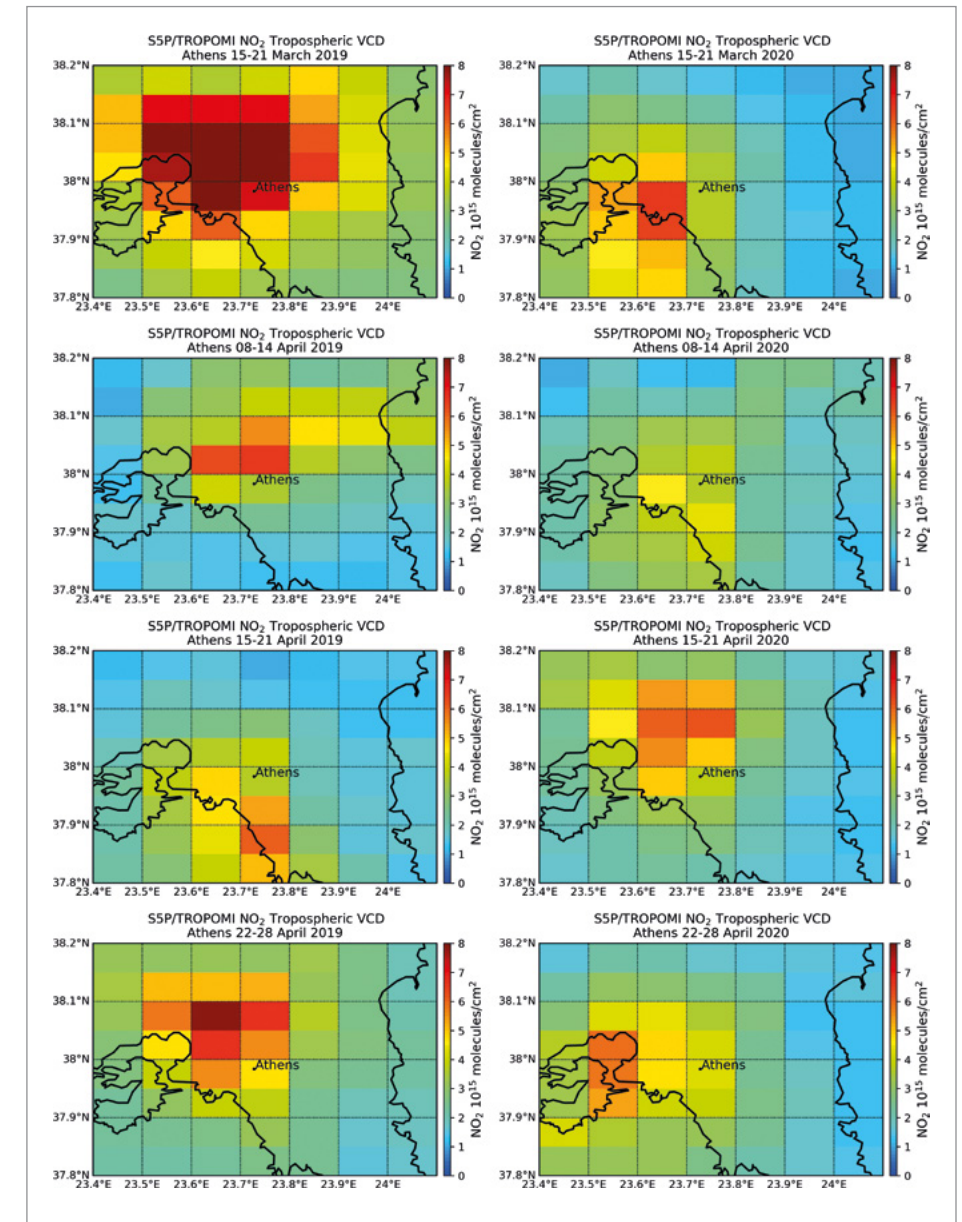
Η μεγαλύτερη μείωση λόγω της επιβολής των μέτρων για την αντιμετώπιση του COVID-19 παρατηρείται στην πόλη της Αθήνας και τα περίχωρά της. Στην Εικ. 6, οι εβδομαδιαίες μέσες τιμές της τροποσφαιρικής στήλης NO_2 από τον TROPOMI, σε 10^{15} molecules/cm², πάνω από την Αθήνα για το 2019 (αριστερά) και το 2020 (δεξιά) εμφανίζονται για τις εβδομάδες 15-21 Μαρτίου (πρώτη σειρά), 8-14 Απριλίου (δεύτερη σειρά), 15-21 Απριλίου (τρίτη σειρά) και 22-28 Απριλίου (τέταρτη σειρά). Εκτός από την προφανή μείωση των τιμών, εξίσου εμφανής είναι και η επίδραση των ανέμων τόσο για τη θέση του τοπικού μέγιστου όσο και για τη διασπορά του ρύπου, η οποία ενισχύει περαιτέρω την απόφαση που πάρθηκε για τη μη εκτέλεση άμεσων συγκρίσεων μεταξύ των δορυφορικών μετρήσεων και του μοντέλου. Το μέσο εβδομαδιαίο φορτίο NO_2 πάνω από την Αθήνα φαίνεται στο επάνω γράφημα της Εικ. 7, όπου οι μέσες τιμές του 2019 εμφανίζονται με μπλε χρώμα και οι τιμές του 2020 με πορτοκαλί χρώμα και για τις δύο εβδομάδες του Μαρτίου και του Απριλίου. Παρόλο που η αντιπροσωπευτικότητα των εβδομαδιαίων επιπέδων δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να θεωρηθεί ίση μεταξύ των ετών, οι δορυφορικές παρατηρήσεις βλέπουν χαμηλότερες στήλες NO_2 που κυμαίνονται μεταξύ -8% και -43%, για όλες τις εβδομάδες πλην της προτελευταίας. Η συμβολή των μετεωρολογικών παραγόντων μπορεί να εκτιμηθεί με τους αντίστοιχους εβδομαδιαίους μέσους όρους του LOTOS-EUROS. LOTOS-EUROS μεταξύ των ετών 2019 και 2020, καθώς και η αντίστοιχη ποσοστιαία διαφορά για τις δορυφορικές παρατηρήσεις. Στην τελευταία σειρά της Εικ. 7 δίνεται η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο σχετικών διαφορών. Το γεγονός ότι το μοντέλο προέβλεπε αύξηση του NO_2 για τις περισσότερες εβδομάδες, με την υπόθεση ότι οι πρωτογενείς εκπομπές των προσομοιώσεων παρέμειναν σταθερές μεταξύ των δύο ετών, καταλήγει σε υψηλότερη εκτιμώμενη μείωση στα επίπεδα του διοξειδίου του αζώτου για την Αθήνα σε εβδομαδιαία βάση, μεταξύ -1% και -56%.

Εικ. 5.

Πάνω: Μέσες μηνιαίες απόλυτες διαφορές τροποσφαιρικής στήλης (10^{15} molecules/cm²) μεταξύ 2020 και 2019 από τον TROPOMI (πορτοκαλί) και το LOTOS-EUROS (μπλε) για τις έξι μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδος, από αριστερά προς τα δεξιά: Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Λάρισα, Βόλος, Πάτρα και Ηράκλειο. Κάτω: Οι ποσοστιαίες διαφορές που αποδίδονται στις μεταβολές των εκπομπών.

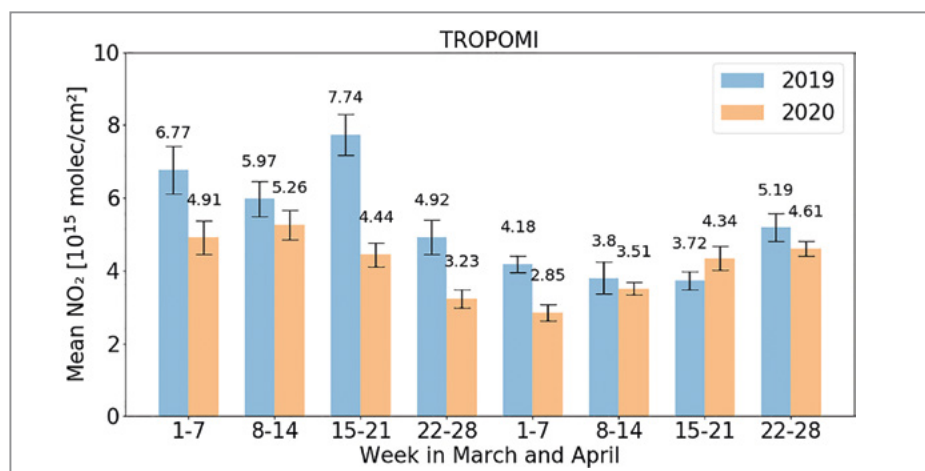
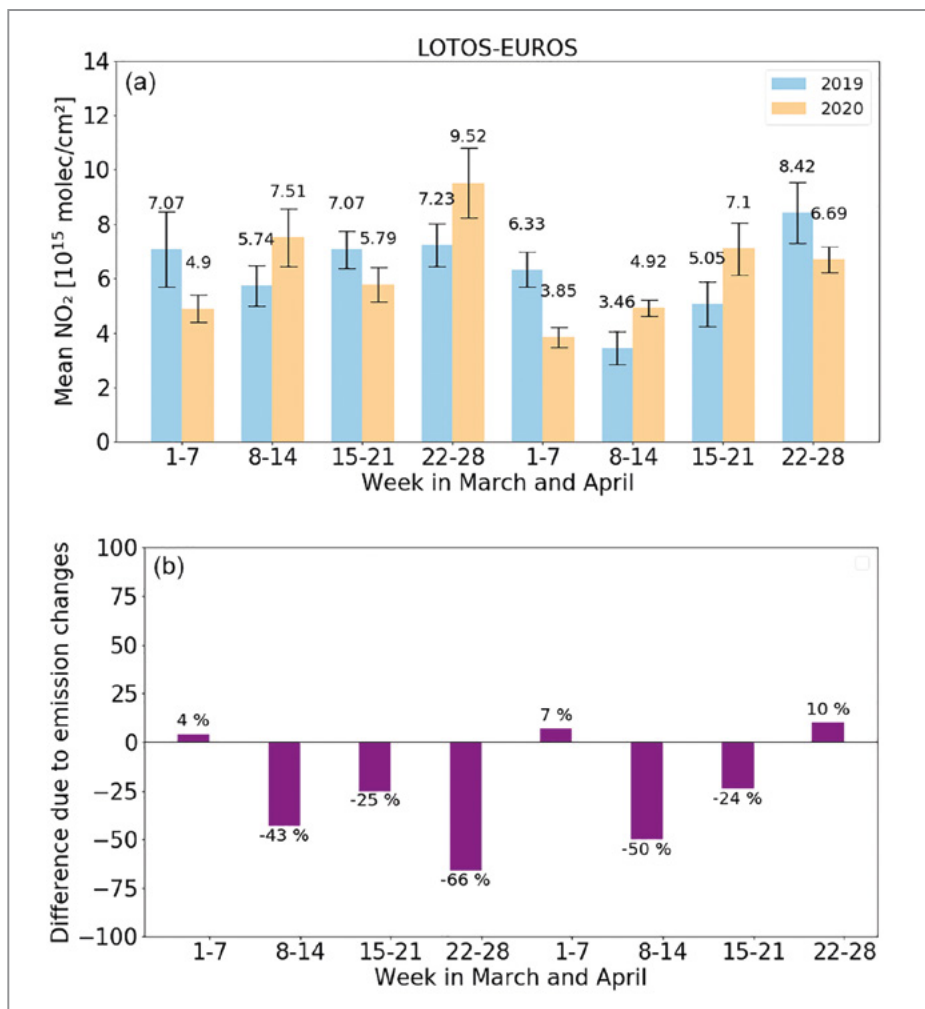
Εικ. 6.

Εβδομαδιαίες μέσες τροποσφαιρικές στήλες TROPOMI NO_2 , σε 10^{15} molecules/cm², πάνω από την Αθήνα για το 2019 (αριστερά) και το 2020 (δεξιά) δίνονται για τις εβδομάδες 15-21 Μαρτίου (πρώτη σειρά), 8-14 Απριλίου (δεύτερη σειρά), 15-21 Απριλίου (τρίτη σειρά) και 22-28 Απριλίου (τέταρτη σειρά)



Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας μελετήθηκαν οι δορυφορικές παρατηρήσεις της τροποσφαιρικής στήλης διοξειδίου του αζώτου (NO_2) μετρημένης από το όργανο Sentinel-5P/TROPOMI, προκειμένου να εξεταστεί η πιθανή θετική επίδραση στην ποιότητα του αέρα στον ελλαδικό χώρο των έκτακτων μέτρων που επιβλήθηκαν για την αντιμετώπιση της πανδημίας COVID-19. Η χώρα επέβαλε αυστηρούς περιορι-



Εικ. 7. Πρώτο γράφημα: Εβδομαδιαίες μέσες τιμές τροποσφαιρικής στήλης NO₂ από τον TROPOMI, σε 1015 molecules/cm², πάνω από την Αθήνα για το 2019 (γαλάζιο) και το 2020 (πορτοκαλί). Δεύτερο γράφημα: οι αντίστοιχες τιμές των προσομοιώσεων LOTOS-EUROS. Τρίτο γράφημα: Οι ποσοστιαίες διαφορές που αποδίδονται στις αλλαγές εκπομπών αποκαλύπτουν το πραγματικό μέγεθος της μείωσης των εκπομπών NO_x

σμούς κυκλοφορίας και ολόκληροι οικονομικοί τομείς σταδιακά έκλεισαν, ξεκινώντας από το τελευταίο Σαββατοκύριακο του Φεβρουαρίου και σταδιακά ανά δραστηριότητα από τις 23 Μαρτίου έως τις 4 Μαΐου 2020. Η χρονική περίοδος μεταξύ Μαρτίου και Απριλίου 2020 και των αντίστοιχων εβδομάδων του 2019, αναλύθηκε και συγκρίθηκε για έξι, τις μεγαλύτερες σε πληθυσμό, πόλεις στην Ελλάδα, καθώς και τις ναυτιλιακές λωρίδες του Αιγαίου. Οι μέσες μηνιαίες τιμές τροποσφαιρικού NO₂, από το όργανο TROPOMI, έδειξαν μείωση μεταξύ -3% και -26% (-1% σε -27%) με μέσο όρο -22% (-11%) για τον Μάρτιο και τον Απρίλιο 2020 αντίστοιχα, σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, για τις αστικές περιοχές, και περίπου -12% (-5%) για τον ναυτιλιακό τομέα. Για την πρωτεύουσα της Αθήνας βρέθηκαν εβδομαδιαίες μειώσεις, μεταξύ -8% και -43%, για τις επτά από τις οκτώ εβδομάδες που μελετήθηκαν. Παρόμοιες μειώσεις αναφέρθηκαν από έξι επιτόπιους σταθμούς ποιότητας αέρα στην Αθήνα με μηνιαίες μειώσεις που κυμαίνονται μεταξύ 0% και -47% και κατά μέσο όρο -23%. Προκειμένου να εξαλειφθούν οι αναμενόμενες μετεωρολογικές επιπτώσεις στα παρατηρούμενα επίπεδα NO₂, οι προσομοιώσεις ενός χημικού μοντέλου μεταφοράς, του LOTOS-EUROS, δείχνουν ότι το μέγεθος αυτών των δορυφορικών μειώσεων δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στη διαφορά των μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζουν σημαντικά τα επίπεδα του NO₂ κατά τη διάρκεια του Μαρτίου και του Απριλίου 2020 και των αντίστοιχων χρονικών περιόδων του προηγούμενου έτους. Λαμβάνοντας υπόψη αυτόν τον παράγοντα, η προκύπτουσα μείωση των εκπομπών λόγω των μέτρων που σχετίζονται με τον COVID-19 εκτιμήθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 0% και -37% για τις πέντε μεγαλύτερες ελληνικές πόλεις, με μέσο όρο ~ -10%.

Ευχαριστίες

Αναγνωρίζουμε τη χρήση modified Copernicus Sentinel data 2019-2020. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν παραχθεί αξιοποιώντας την Υπολογιστική Συστοιχία και τις παρεχόμενες υπηρεσίες υποστήριξης του Κέντρου Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης του Α.Π.Θ. Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το Κέντρο Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης του Α.Π.Θ. για την υποστήριξη κατά τη διάρκεια αυτής της ερευνητικής εργασίας.

Βιβλιογραφία

1. Bauwens, M., Compernelle, S., Stavrakou, et al. (2020) Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087978. <https://doi.org/10.1029/2020GL087978>
2. Castellanos, P., Boersma, K. Reductions in nitrogen oxides over Europe driven by environmental policy and economic recession. *Sci Rep* 2, 265 (2012). <https://doi.org/10.1038/srep00265>
3. Koukouli, M.-E., Skoulidou, I., Karavias, A., Parcharidis, I., Balis, D., Manders, A., Segers, A., Eskes, H., and van Geffen, J.: Sudden changes in nitrogen dioxide emissions over Greece due to lockdown after the outbreak of COVID-19, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-600>, in review, 2020.
4. Liu, Fei, A. Page, Sarah A. Strode, et al., Abrupt declines in tropospheric nitrogen dioxide over China after the outbreak of COVID-19, *Science Advances*, doi:10.1126/sciadv.abc2992, <https://advances.sciencemag.org/content/6/28/eabc2992>, 2020.
5. Manders, A. M. M., Builtjes, P. J. H., Curier, L., et al., Curriculum vitae of the LOTOS-EUROS (v2.0) chemistry transport model, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4145–4173, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4145-2017>, 2017.
6. Skoulidou, I., M. E. Koukouli, A. Manders, A. et al., Evaluation on LOTOS-EUROS NO₂ simulations using ground-based measurements and S5P/TROPOMI observations over Greece, in submission to *ACPD*, 2020.
7. van Geffen, J. H. G. M., Eskes, H. J., Boersma, K. F., et al. TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO₂ data products, Report S5P-KNMI-L2-0005-RP, version 1.4.0, released 6 Feb. 2019, KNMI, De Bilt, The Netherlands, available at <http://www.tropomi.eu/documents/atbd/>, last access: 08 May 2020.
8. Veefkind, J. P. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Rem. Sens. Env.* 120, 70–83 (2012), <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.
9. Vlemmix, T., Eskes, H. J., Pipers, A. J. M., et al., MAX-DOAS tropospheric nitrogen dioxide column measurements compared with the Lotos-Euros air quality model, *Atmos. Chem. Phys.*, <https://doi.org/10.5194/acp-15-1313-2015>, 2015.

10. Vrekoussis, M., Richter, A., Hilboll, A., et al., Economic Crisis Detected from Space: Air Quality observations over Athens/Greece, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 458–463, <https://doi.org/10.1002/grl.50118>, 2013.
11. Zyrichidou, I., D. Balis, M.E. Koukouli, et al., Adverse results of the economic crisis: A study on the emergence of enhanced formaldehyde (HCHO) levels seen from satellites over Greek urban sites, *Atmospheric Research*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.017>, 2019. © 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).