

Prostorno-vremenske promjene razine Sredozemnog mora

Siber, Ivona

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:226:678277>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Marine Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ EKOLOGIJA I ZAŠTITA MORA

Ivona Siber

PROSTORNO VREMENSKE PROMJENE RAZINE
SREDOZEMNOG MORA

Diplomski rad

Split, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ EKOLOGIJA I ZAŠTITA MORA

PROSTORNO VREMENSKE PROMJENE RAZINE
SREDOZEMNOG MORA

Diplomski rad

Predmet: Fizička oceanografija

Mentor:

Doc. dr. sc. Frano Matić

Student:

Ivona Siber

Split, rujan 2024.

Sveučilište u Splitu
Sveučilišni odjel za studije mora
Sveučilišni diplomski studij Ekologija i zaštita mora

Diplomski rad

PROSTORNO VREMENSKE PROMJENE RAZINE SREDOZEMNOG MORA

Ivona Siber

Sažetak

U ovom radu analizirane su prostorno-vremenske promjene razine Sredozemnog mora koristeći podatke iz baze Copernicus Marine Service za razdoblje 1988. do 2020. godine. Korišteni su podaci o visini mora, amonijaku, nitratima, fosfatima i klorofilu. BIOS sustav Jonskog mora značajno utječe na dinamiku morskih struja i biogeokemijska svojstva mora. Primjena Neural Gas algoritma omogućila je prepoznavanje obrazaca promjena. Rezultati pokazuju najveće promjene u Levantinskom moru, s najvišim razinama mora ljeti i najnižim zimi. Više razine mora povezane su sa smanjenjem koncentracija amonijaka i nitrata, dok su veće koncentracije fosfata i nitrata zabilježene pri nižim razinama mora u Jadranu.

(39 stranica, 22 slike, 1 tablica, 27 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: Mediteransko more, visina mora, neuronske mreže, prostorno-vremenska analiza, BiOS, Copernicus Marine Service, nutrijenti, klorofil

Mentor: Doc. dr. sc. Frano Matić

Ocjenjivači: 1. Doc. dr. sc. Frano Matić
2. Prof. dr. sc. Svjetlana Krstulović Šifner
3. Doc. dr. sc. Tomislav Džoić

University of Split
Department of Marine Studies
Graduate University study Ecology and marine protection

MSc Thesis

**SPATIAL TEMPORAL CHANGES IN THE SEA LEVEL OF THE MEDITERANEAN
SEA**

Ivona Siber

Abstract

In this study, the spatio-temporal changes in sea level in the Mediterranean Sea are analyzed using data from the Copernicus Marine Service from 1988 to 2020. Data on sea level, ammonia, nitrates, phosphates and chlorophyll were used. The BiOS system in the Ionian Sea significantly influences sea currents and biogeochemical properties. By applying the Neural Gas algorithm, patterns of change were identified. The results show the largest changes in the Levantine Sea, with the highest sea levels in summer and the lowest in winter. Higher sea levels are associated lower ammonia and nitrate concentrations, while higher phosphate and nitrate concentrations were recorded at lower sea levels in the Adriatic Sea.

(39 pages, 22 figures, 1 tables, 27 references, original in: Croatian)

Keywords: Mediterranean sea, sea surface height, neural gas, spatial temporal analysis, BiOS, Copernicus Marine Service, nutrients, chlorophyll.

Supervisor: Frano Matic, PhD/ Assistant Professor

Reviewers:

1. Frano Matic, PhD / Assistant Professor
2. Svjetlana Krstulović Šifner, PhD / Full Professor
3. Tomislav Džoić, PhD / Assisstant Professor

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
1.1. Svrha i ciljevi rada.....	2
2. MATERIJALI I METODE	3
2.1. Podatci	3
2.2. Metode	4
3. REZULTATI.....	6
3.1. Srednja godišnja polja	6
3.2. Srednje mjesečne vrijednosti visine mora	11
3.3. Srednje mjesečne vrijednosti koncentracije amonijaka	13
3.4. Srednje mjesečne vrijednosti koncentracije nitrata	16
3.4. Srednje godišnje vrijednosti koncentracije klorofila.....	18
3.6. Srednje mjesečne vrijednosti koncentracije fosfata	21
3.7. Rezultati strojnog učenja.....	24
3.7.1. Visina mora	24
3.7.2. Otopljeni amonijak	26
3.7.3. Otopljeni nitrati	28
3.7.4. Otopljeni fosfati	29
3.7.5. Koncentracija klorofila	31
3.8. Samoorganizirajuće neuronske mreže.....	32
4. RASPRAVA	34
5. ZAKLJUČCI.....	36
6. LITERATURA	37

1. UVOD

Bimodalni oscilirajući sustav (BiOS) Jonskog mora karakterizira periodično osciliranje s periodom 12-13 godina. BiOS je usko povezan s povratnom vezom s gornjom cirkulacijom Sjevernog Jonskog vrtloga, stvaranjem dubokih vodenih masa te površinskom interakcijom između zraka i mora. BiOS ima značajan utjecaj na biogeokemijska svojstva mora, njegova kompleksnost djelomično se objašnjava kao samoodrživa oscilacija, a ona proizlazi iz međudjelovanja formiranja jadranske guste vode i promjena u relativnim količinama voda levantinskog i atlantskog podrijetla koje ulaze u Jadran (Borzelli i sur., 2023). Inverzija pripovršinske cirkulacije dodatno naglašava dinamičnost i kompleksnost ovog sustava, stvaranjem promjena u trofičkom režimu Jonskog mora zbog različite vertikalne dinamike nutrikлина tijekom ciklonskog ili anticitonskog kretanja Sjevernog Jonskog vrtloga. Intenzitet zimske konvekcije na južnom Jadranu doživljava desetogodišnje modulacije, utječući na volumen i termohalinska svojstva guste vode (Batišić i sur., 2023). Istok Sredozemlja bilježi varijacije u preduvjetima koje utječu na salinitet i fluktuacije Levantskih međuvoda. Bioraznolikost u Jadranu je pod utjecajem ove varijabilnosti zbog uvoza lesepsijskih organizama ili onih iz zapadnog Mediterana i Atlantika. Istraživano je kako BiOS utječe na Jadransko more (Borzelli i sur., 2023). Jadran je osjetljiv na promjene u Sjevernom Jonskom vrtlogu i priljev različitih vodenih masa, što može imati izravan utjecaj na hidrodinamiku, bioraznolikost i biogeokemijske procese u Jadranskom moru. Promjene u priljevu levantinske i atlantske vode, kao i varijacije u formiranju guste jadranske vode, imaju dalekosežne posljedice na ekosustav Jadrana, uključujući fluktuacije hranjivih tvari i bioloških svojstava. Klorofil je ključni pigment u fotosintezi fitoplanktona i pokazatelj primarne produktivnosti mora. Visoke koncentracije klorofila ukazuju na intenzivnu biološku aktivnost, što može povećati bioraznolikost, ali u nekim slučajevima vodi do eutrofikacije. Fosfati, kao važan nutrijent za rast organizama, često dolaze iz antropogenih izvora poput poljoprivrede i industrijskih ispusta. Njihove visoke koncentracije mogu potaknuti cvjetanje algi, što negativno utječe na kvalitetu vode i bioraznolikost. Nitrati, slični fosfatima, također su važni za rast organizama, no prekomjerne količine, osobito u obalnim područjima, mogu uzrokovati eutrofikaciju, smanjujući količinu kisika u vodi i ugrožavajući morski život. Amonijak, koji je produkt razgradnje organske tvari, također utječe na ekosustav; u višim koncentracijama može biti toksičan za mnoge organizme i narušiti ravnotežu morskih staništa. Borzelli i Carniel su 2023. godine u radu "A reconciling vision of the Adriatic-Ionian Bimodal Oscillating System"

ispitivali kako vjetrovi utječu na Jadransko-jonski bazen i kako bi atmosferski mehanizmi mogli objasniti BIOS. Unatoč intenzivnom istraživanju s ciljem reprodukcije ovog oscilirajućeg sustava, temeljno pitanje “koji je izvor energije potrebne za pokretanje BIOS-a?” je do sada ostao bez odgovora.

1.1. Svrha i ciljevi rada

Svrha rada je detekcija prostorno-vremenskih promjena okolišnih parametara pomoću visine mora u dugoročnim vremenskim nizovima istočnog Sredozemlja.

Ciljevi rada uključuju:

- određivanje klimatoloških prosjeka okolišnih parametara,
- primjenu metoda strojnog učenja na prostorno-vremenskim nizovima visine mora,
- identifikaciju ključnih čimbenika koji utječu na promjene u visini mora i drugim biološkim parametrima poput fosfata, nitrata, amonijaka i klorofila,
- istraživanje regionalnih razlika u prostornim i vremenskim obrascima,
- analizu odnosa između visine mora, bioloških parametara i njihovih fluktuacija tijekom vremena.

2. MATERIJALI I METODE

2.1. Podatci

Podatci za izradu diplomskog rada preuzeti su sa Copernicus Marine Service baze podataka. Copernicus, dio europskog svemirskog programa Europske unije (EU), pruža informacijske usluge temeljene na satelitskom i in situ promatranju okoliša, a njime upravlja Europska komisija u partnerstvu s ESA-om (engl. *European space agency*), EUMETSAT-om (engl. *The European operational satellite agency for monitoring weather*), ECMWF-om (engl. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), agencijama EU-a, Mercator Océanom, EEA-om (engl. *European Environment Agency*) i JRC-om (engl. *Joint Research Centre*). Iz baze podataka, unutar Mediterranean Sea Physics reanalysis, preuzeti su potrebni podatci za izradu rada. Učitane su srednje mjesečne vrijednosti razine površine mora (SSH, engl. *sea surface height*) iznad geoida za razdoblje od siječnja 1988. do prosinca 2020. godine. U tom vremenskom periodu od preko trideset godina, ukupno su bila 384 vremenska koraka. U svrhu ovog istraživanja uključeno je područje Sredozemnog mora koje obuhvaća geografsku dužinu od 30.18° sjeverno do 45.9792° južno te geografsku širinu od 6° zapadno do 36.29° istočno (https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTYEAR_PHY_006_004_E3R1I) (Tablica 1).

Tablica 1. Prikaz korištenih varijabli preuzetih sa Copernicus Marine Service baze podataka za razdoblje od siječnja 1988. do prosinca 2020. godine. Prikaz srednjih mjesečnih vrijednosti visine površine mora iznad geoida te zemljopisna širina i dužina preuzeti su iz baze podataka Mediterranean Sea Physics reanalysis.

Varijabla	Zemljopisna širina	Zemljopisna dužina	Period	Dubina
SSH	6°W – 36.29°E	30.18°N – 45.9792°S	siječanj 1988. – prosinac 2020.	0 m
Masena koncentracija klorofila	6°W – 36.29°E	30.18°N – 45.9792°S	siječanj 1999. – prosinac 2020.	72 m

Koncentracija amonijaka	6°W – 36.29°E	30.18°N – 45.9792°S	siječanj 1999. – prosinac 2020.	72 m
Koncentracija nitrata	6°W – 36.29°E	30.18°N – 45.9792°S	siječanj 1999. – prosinac 2020.	72 m
Koncentracija fosfata	6°W – 36.29°E	30.18°N – 45.9792°S	siječanj 1999. – prosinac 2020.	72 m

2.2. Metode

Neural Gas (NG) je algoritam strojnog učenja koji pripada grupi konkurentskih i samoprilagodljivih oblika strojnog učenja. Konkurentsko učenje je oblik učenja bez nadzora gdje se neuroni natječu za što bolju prilagodbu ulaznim podacima, a samo neuron koji najbolje opisuje ulazni podatak postaje pobjednički neuron (BMU, engl. *Best Matching Unit*). Samoprilagodljivo učenje je metoda strojnog učenja gdje sustav samostalno prilagođava svoje parametre tijekom vremena na temelju podataka koje prima.

Metoda NG temelji se na Hebbovom pravilu učenja (Hebb, 1949). Osnovna ideja Hebbovog pravila je da sinaptičke veze između dva neurona jačaju kada su oba neurona istovremeno aktivna. Ovo pravilo često se sažima frazom: "neuroni koji zajedno pucaju, zajedno se povezuju" (Hebb, 1949). NG funkcionira tako da stvara mrežu neurona u prostoru podataka, prilagođavajući njihove položaje kako bi optimalno pokrili cijeli skup podataka, šireći se kroz podatke poput plina. Ova metoda učinkovito raspoređuje neurone u prostoru podataka, uzimajući u obzir udaljenost između neurona i ulaznih podataka (Martinez i sur., 1996).

NG algoritam koristi se za vektorsku kvantizaciju i temelji se na natjecanju među neuronima kako bi se postigla optimalna pokrivenost podataka. NG algoritam sastoji se od sljedećih koraka:

1. Inicijalizacija: mreža neurona se slučajnom metodom postavlja u početne položaje u prostoru podataka.
2. Natjecanje: za svaki ulazni podatak, algoritam određuje neuron čiji je položaj u prostoru podataka najbliži ulaznom podatku. Taj neuron postaje pobjednički neuron, odnosno BMU.
3. Ažuriranje pozicija neurona: BMU prilagođava svoj položaj u prostoru kako bi se još više približio ulaznom podatku. Također, i drugi neuroni ažuriraju svoje položaje, ali u

manjoj mjeri ovisno o udaljenosti od BMU. Što je neuron udaljeniji od BMU, to manje prilagođava svoje težine.

4. Smanjenje prilagodbe: kako algoritam napreduje kroz epohe, veličina prilagodbe i opseg mreže koji se ažurira (ne samo BMU nego i njegovi susjedi) postupno se smanjuje, omogućujući preciznije učenje.
5. Zaustavljanje: algoritam se zaustavlja nakon unaprijed definiranog broja iteracija (epoha) ili kada prilagodbe postanu zanemarivo male. U tom trenutku mreža neurona optimalno pokriva prostor podataka.

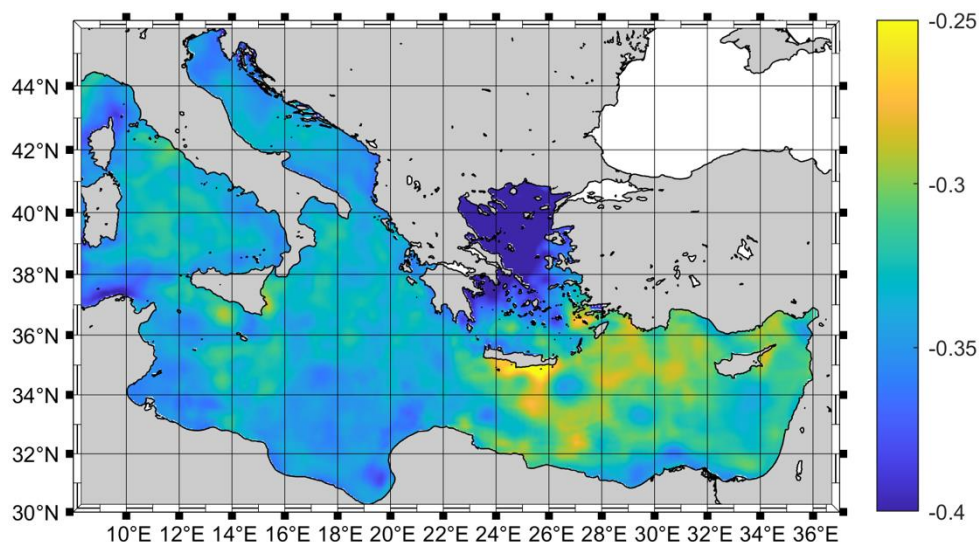
Standardizacija podataka ključna je za strojno učenje. Kako bi podaci bili usporedivi, potrebno ih je skalirati i standardizirati, pri čemu se vrijednosti transformiraju na normalizirane skale, primjerice između -1 i 1 kako bi algoritmi mogli učinkovito obrađivati podatke različitih jedinica i skala. Uz standardizaciju, važno je ukloniti sezonske fluktuacije te prepoznati prostorne i vremenske korelacije, što omogućuje bolju analizu obrasca poput cirkulacije mora. Standardizacijom je omogućeno lakše prepoznavanje odnosa među varijablama te je umanjen rizik da će neki parametri s većim rasponom vrijednosti dominirati nad drugima. Na taj način osiguravamo da model pravilno razumije obrasce unutar podataka i daje točne rezultate pri predviđanju ponašanja kompleksnih sustava poput cirkulacije mora ili unosa hranjivih tvari u određene slojeve mora (Lazzari i sur., 2020).

Rezultat NG modela su BMU vektori. Za svaki BMU vektor poznat je trenutak kada je taj neuron bio pobjednički. To svojstvo NG algoritma omogućuje kreiranje vremenskog niza brojeva, pri čemu svaki broj predstavlja broj pobjedničkog neurona (BMU broj). Jednom kreiran, vremenski niz BMU-ova može se analizirati kao i svaki drugi vremenski niz. U ovom radu BMU niz korišten je za izradu srednjih polja bioloških parametara, na način da su se za svaki pojedini BMU izdvojili datumi kada je on bio pobjednički neuron. Potom su se za izdvojene datume izračunale srednje vrijednosti za svaku prostornu točku zasebno (Martinez i sur., 1996).

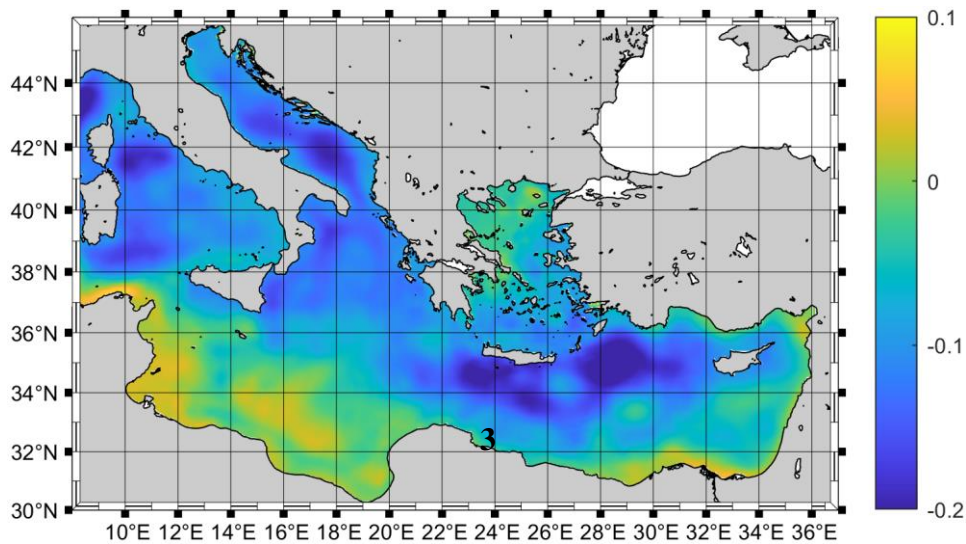
3. REZULTATI

3.1. Srednja godišnja polja

Slike 1 i 2 prikazuju ključne aspekte dinamičke topografije mora u istočnom Mediteranu te Jadranu. Dinamička topografija predstavlja razliku u visini površine mora u odnosu na hipotetičku mirnu površinu, koja je određena gustoćom mora i njegovim strujanjima. Slika 1 prikazuje razliku između visine mora i dinamičke topografije, izračunatu kao višegodišnji prosjek na temelju srednjih godišnjih vrijednosti. Te razlike mogu biti uzrokovane dinamičkim procesima poput morskih struja, termohaline cirkulacije te atmosferskim tlakom. Na slici se vidi da su negativne vrijednosti, prikazane plavim nijansama, dominantne u većem dijelu Jadranskog i Egejskog mora, dok su pozitivne vrijednosti, označene žutom bojom, prisutne u južnim dijelovima Mediterana. Slika 2 predstavlja višegodišnji prosjek dinamičke topografije, bez usporedbe s visinom mora, također na temelju srednjih godišnjih vrijednosti. Na njoj se vidi da je dinamička topografija najniža u Egejskom moru i kreće se između -0,4 i -0,25 metara, dok su nešto više vrijednosti prisutne južno, prema libijskoj obali i Cipru. Ove slike su važne jer pokazuju kako se površine mora i strujanja mijenjaju kroz dulje vremensko razdoblje, a razlike u visini i dinamičkoj topografiji mogu ukazivati na promjene u morskim strujama, klimatskim uvjetima i regionalnim procesima u morskom ekosustavu.

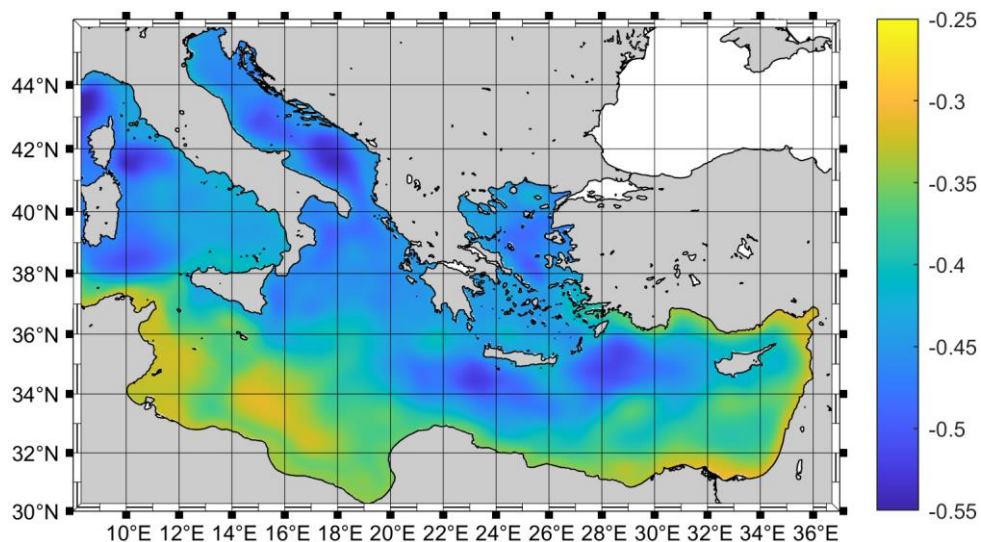


Slika 1. Višegodišnji srednjak dinamičke topografije izračunat pomoću srednjih godišnjih vrijednosti.



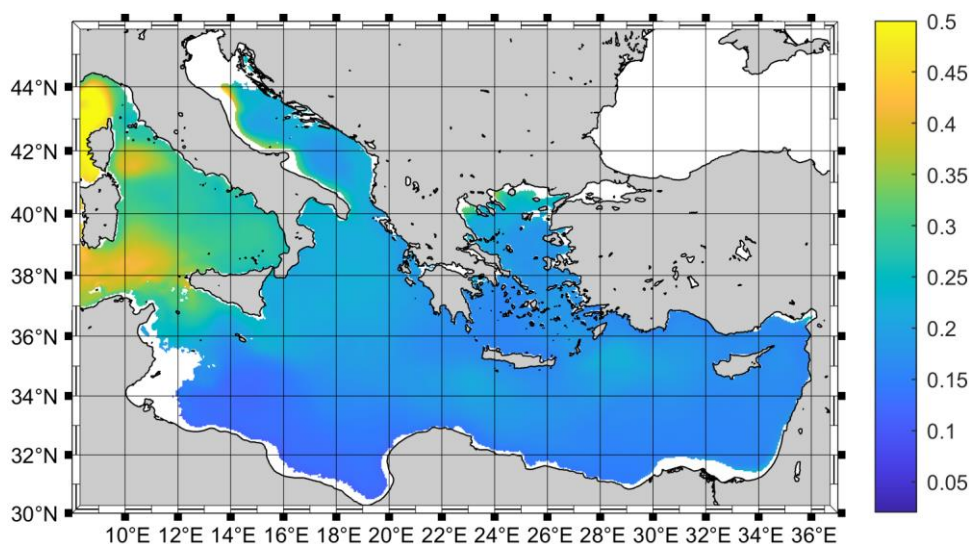
Slika 2. Razlika visine mora i dinamičke topografije izračunato višegodišnji srednjak pomoću srednjih godišnjih vrijednosti.

Slika 3 prikazuje srednje godišnje visine morske površine (SSH) od 1988. do 2020. godine na Mediteranu. Visoke vrijednosti, označene žutim i zelenim nijansama, najizraženije su u istočnom Mediteranu, posebice u Levantskom moru i dijelovima Egejskog mora. Ovo povećanje može biti posljedica termalnog širenja vode zbog zagrijavanja, ali i lokalnih struja koje prenose topliju vodu u ove regije.



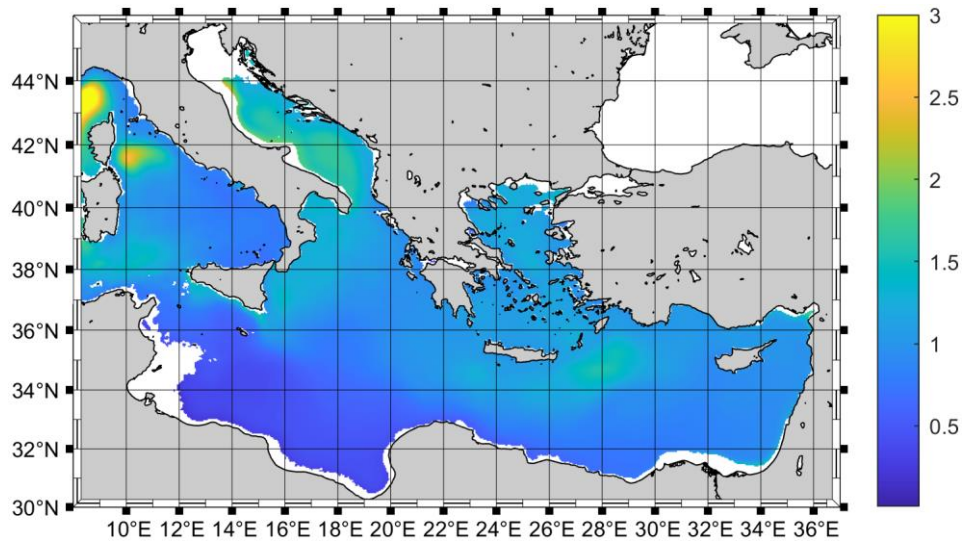
Slika 3. Višegodišnji srednjak visine mora [m] izračunat pomoću srednjih godišnjih vrijednosti.

S druge strane, zapadni Mediteran, uključujući područja oko Ligurskog mora, pokazuje relativno niže vrijednosti SSH, što može ukazivati na stabilniji nivo mora ili manje izražene promjene u temperaturi vode. Srednja godišnja koncentracija amonijaka prikazana je na slici 4. Najviše vrijednosti amonijaka, označene žutim i zelenim bojama, nalaze se u obalnim područjima, posebice u sjevernom Jadranskom moru, blizu Venecije i delte rijeke Po. Ova područja su podložna eutrofikaciji zbog unosa nutrijenata iz poljoprivrednih površina i urbanih otpadnih voda. Nasuprot tome, središnji i istočni dijelovi Mediterana imaju niže koncentracije, što ukazuje na oligotrofni karakter ovih voda, gdje je produktivnost niža zbog ograničenih nutrijenata.



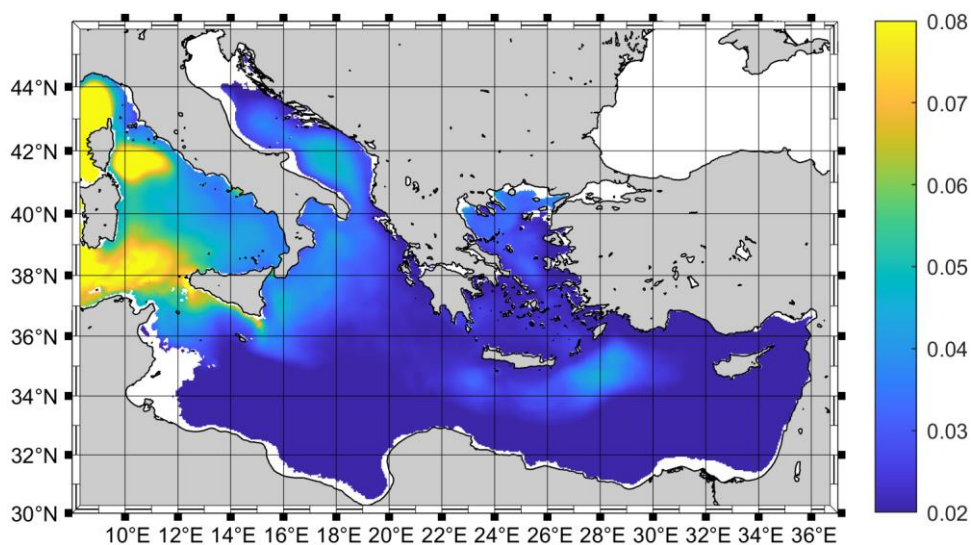
Slika 4. Višegodišnji srednjak molarne koncentracije amonijaka izračunat [mol/L] pomoću srednjih godišnjih vrijednosti.

Koncentracije nitrata, prikazane za razdoblje od 1998. do 2020. godine (Slika 5), također pokazuju značajne regionalne razlike. Visoke koncentracije nitrata primjećuju se u sjeverozapadnom Mediteranu u ušću Rhone, te u Jadranskom moru u područjima koji su pod utjecajem Poa. Snažan doprinos nutrijenata rijekama dovodi do toga da su te regije sklone eutrofikaciji, što može dovesti do cvjetanja algi i hipoksije. Istočni Mediteran, uključujući Levantsko more, ima niske koncentracije nitrata, što odražava oligotrofne uvjete i manji utjecaj kontinentalnog unosa nutrijenata. Ovi su dijelovi manje podložni eutrofikaciji, ali imaju i nižu produktivnost.



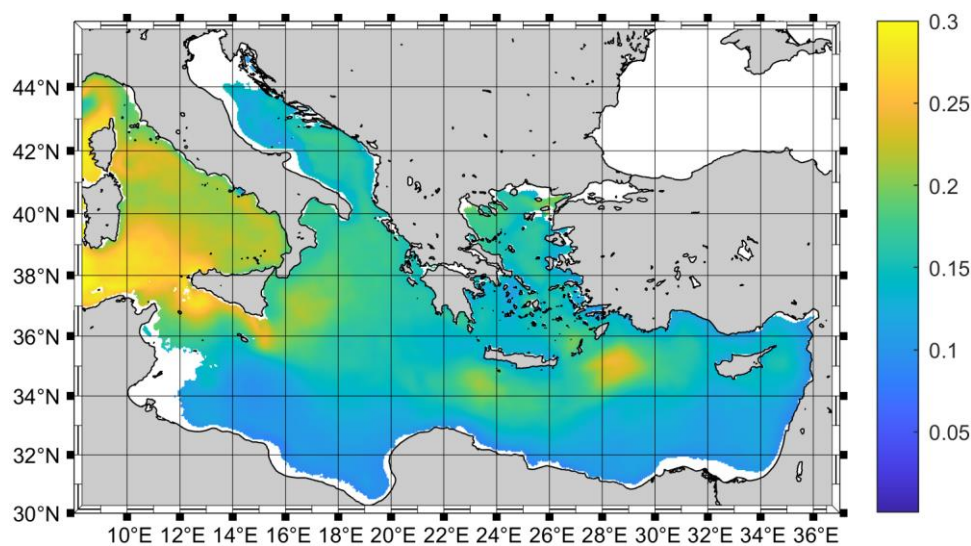
Slika 5. Višegodišnji srednjak molarne koncentracije nitrata [mol/L] izračunat pomoću srednjih godišnjih vrijednosti.

Srednje godišnje molarne koncentracije fosfata za isto razdoblje pružaju uvid u dostupnost ovog ključnog nutrijenta u Mediteranu (Slika 6). Fosfat je često ograničavajući faktor za primarnu proizvodnju, a njegovi visoki nivoi u obalnim područjima zapadnog Mediterana i sjevernog Jadrana, označeni žutim i zelenim bojama, ukazuju na povećani unos iz antropogenih izvora.



Slika 6. Višegodišnji srednjak koncentracije fosfata [mol/L] izračunat pomoću srednjih godišnjih vrijednosti

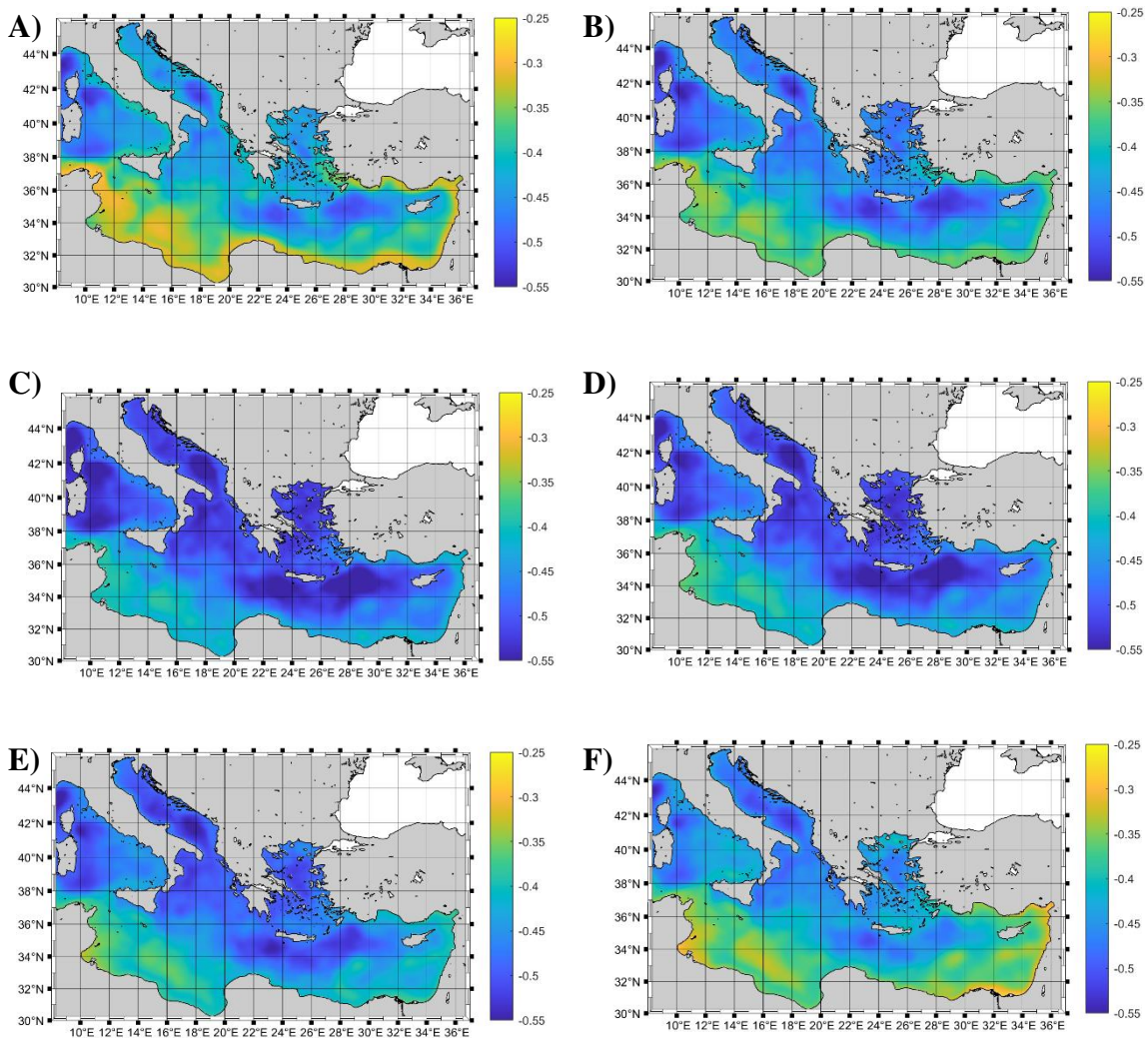
Ovo je posebno izraženo u područjima blizu velikih rijeka i industrijskih centara. U središnjem i istočnom Mediteranu koncentracije fosfata su niže, što ukazuje na manji unos nutrijenata i ograničenu produktivnost, karakterističnu za oligotrofna mora. Slika srednje godišnje vrijednosti masene koncentracije klorofila u Mediteranu pruža uvid u distribucijske obrasce i ekološke uvjete u tom području (Slika 7). Koncentracije klorofila variraju od 0,05 do 0,3 mg/m³, pri čemu se značajan ulaz visokih koncentracija klorofila u Mediteran uočava na zapadnom dijelu Sredozemlja gdje voda bogata fosfatima ulazi iz Atlantskog oceana. Ovaj uski prolaz igra ključnu ulogu u distribuciji hranjivih tvari i biološkoj produktivnosti u ostatku Mediterana. U Jadranskom moru, prosječna koncentracija klorofila od oko 0,15 ukazuje na relativno stabilnu, ali nisku razinu produktivnosti u odnosu na druge dijelove Mediterana. Zanimljivo je da se ista koncentracija klorofila, koja se opaža istočno od Gibraltara, također nalazi u grčkim vodama. Ovo može sugerirati da su uvjeti u tom području slični, s mogućim utjecajem specifičnih karakteristika kao što su dostupnost hranjivih tvari, temperatura vode ili morske struje koje podržavaju biološku produktivnost.



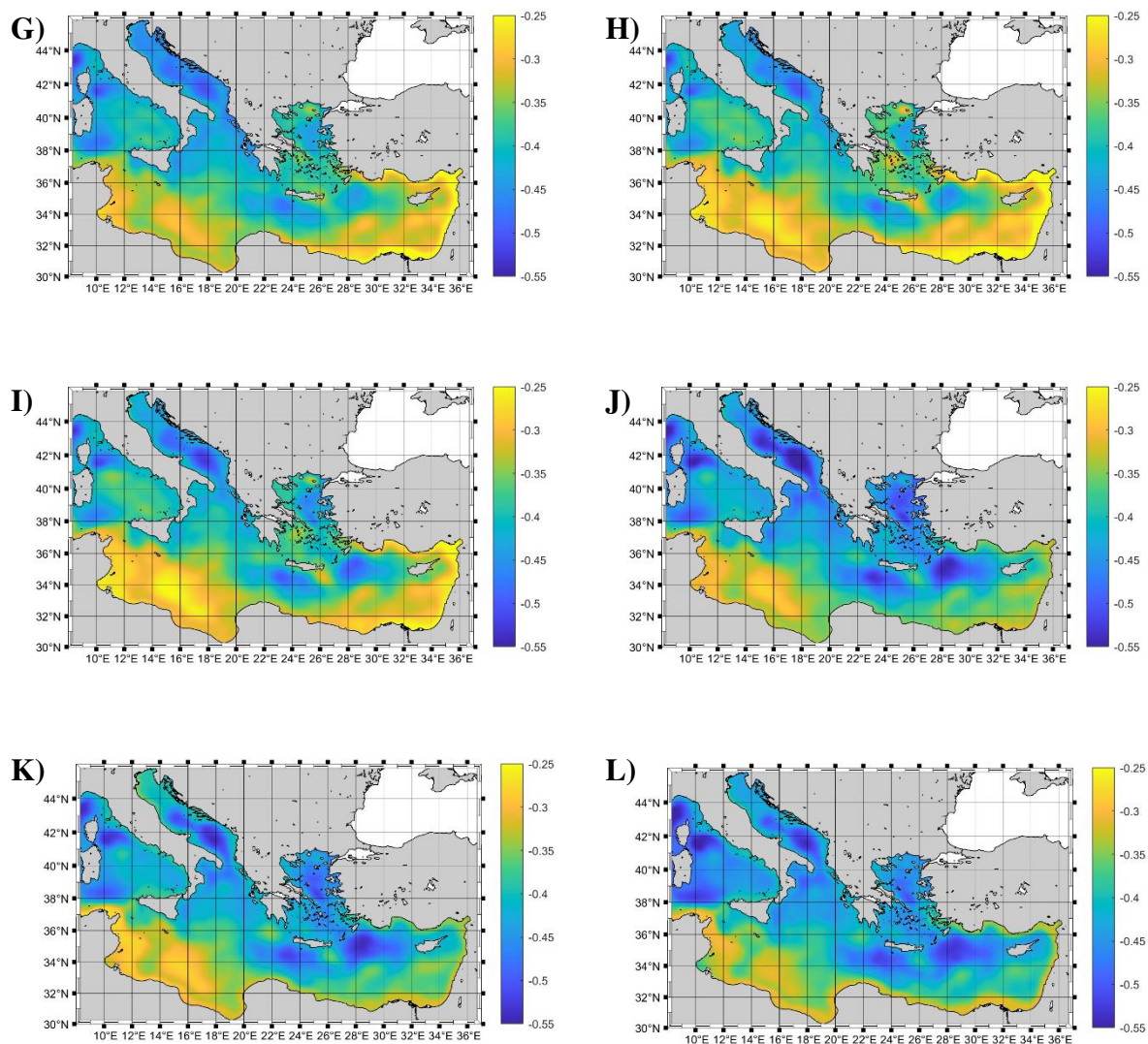
Slika 7. Višegodišnji srednjak masene koncentracije klorofila [mg/m³] izračunat pomoću srednjih godišnjih vrijednosti.

3.2. Srednje mjesečne vrijednosti visine mora

Srednja godišnja vrijednost visine mora izmjerena u Mediteranu tijekom 12 mjeseci prikazana je na slikama 8 i 9 te varira u rasponu od minimalnih -0,55 m do maksimalnih -0,25 m. Niže vrijednosti SSH su karakteristične za hladniji dio godine, dok su više vrijednosti tipične za toplije razdoblje. Zimski mjeseci prosinac (L), siječanj (A) i veljača (B) bilježe sniženje razine morske površine u različitim dijelovima Mediterana, između 0,30 i 0,55 m.



Slika 8. Srednje mjesečne vrijednosti visine mora [m] u mjesecima siječanj (A), veljača (B), ožujak (C), travanj (D), svibanj (E) te lipanj (F).



Slika 9. Srednje mjesečne vrijednosti visine mora [m] u mjesecima srpanj (G), kolovoz (H), rujan (I), listopad (J), studeni (K), prosinac (L).

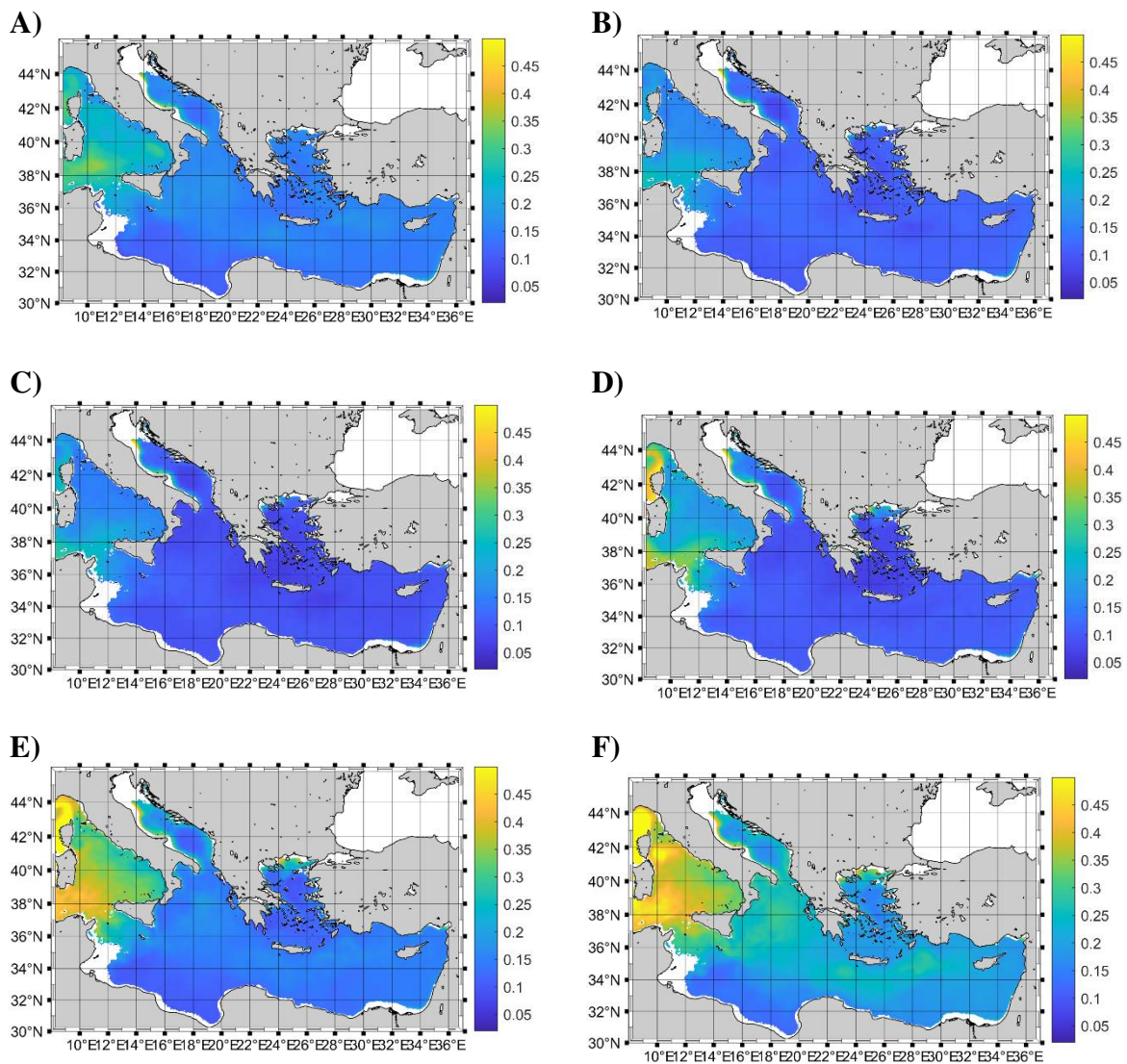
Promjene su izraženije uz obale Afrike, dok Jadransko i Jonsko more pokazuju manju varijabilnost. Jedina veća promjena zabilježena je kod Jabučke kotline, 0,55 m i u nešto manjoj mjeri Južnojadranske kotline, 0,53 m. Značajnije niže razine mora su primijećene istočno od Cipra, južno od Grčke te zapadno od Korzike. U mjesecu ožujku (C), razina mora u cijelom promatranom području doseže svoju minimalnu razinu, u rasponu od -0,55 m u Jonskom moru i Jabučkoj kotlini do -0,40 metara uz obale Tunisa i Libije. Proljetnim zagrijavanjem temperatura i utjecajem klimatskih čimbenika, visina mora počinje rasti te u kolovozu doseže svoj maksimum. Kroz travanj (D), svibanj (E), lipanj (F) i srpanj (G) ravnomjerno raste razina mora Mediterana. Jedina anomalija u ovom periodu jest da je područje oko rijeke Nil u mjesecima lipnju, srpnju, kolovozu i rujnu doseglo maksimalnu visinu mora od -0,25 m. Kako je ranije spomenuto, u mjesecu kolovozu (H) razina mora doseže vrhunac. U Jadranu je

izmjereno maksimalnih -0,42 m, a minimalnih -0,49 m, dok je Jonsko more variralo od -0,35 m do -0,40 m. Još jedna anomalija zabilježena u kolovozu je na području Tračkog mora te kod Atene, gdje je razina mora naglo porasla na -0,35 metara. U rujnu (I) se razina mora zadržava te je slična kao u kolovozu s maksimalnim očitanjima u području pored rijeke Nil, južno od Malte te pored Turske i Tunisa sa razinom od -0,25 m. Listopad (J) i studeni (K) utječu na razinu mora negativno te je vidljivo ponovno sniženje razine mora. U listopadu je kod Tračkog mora zabilježena minimalna visina od -0,42 m, najniža visina mora (-0,54 m) u promatranom području je zabilježena ispod Rodosa u Jonskom moru te u Jabučkoj kotlini. Maksimalna visina je zabilježena opet u moru iznad Tripolija te zapadno od Tunisa.

3.3. Srednje mjesečne vrijednosti koncentracije amonijaka

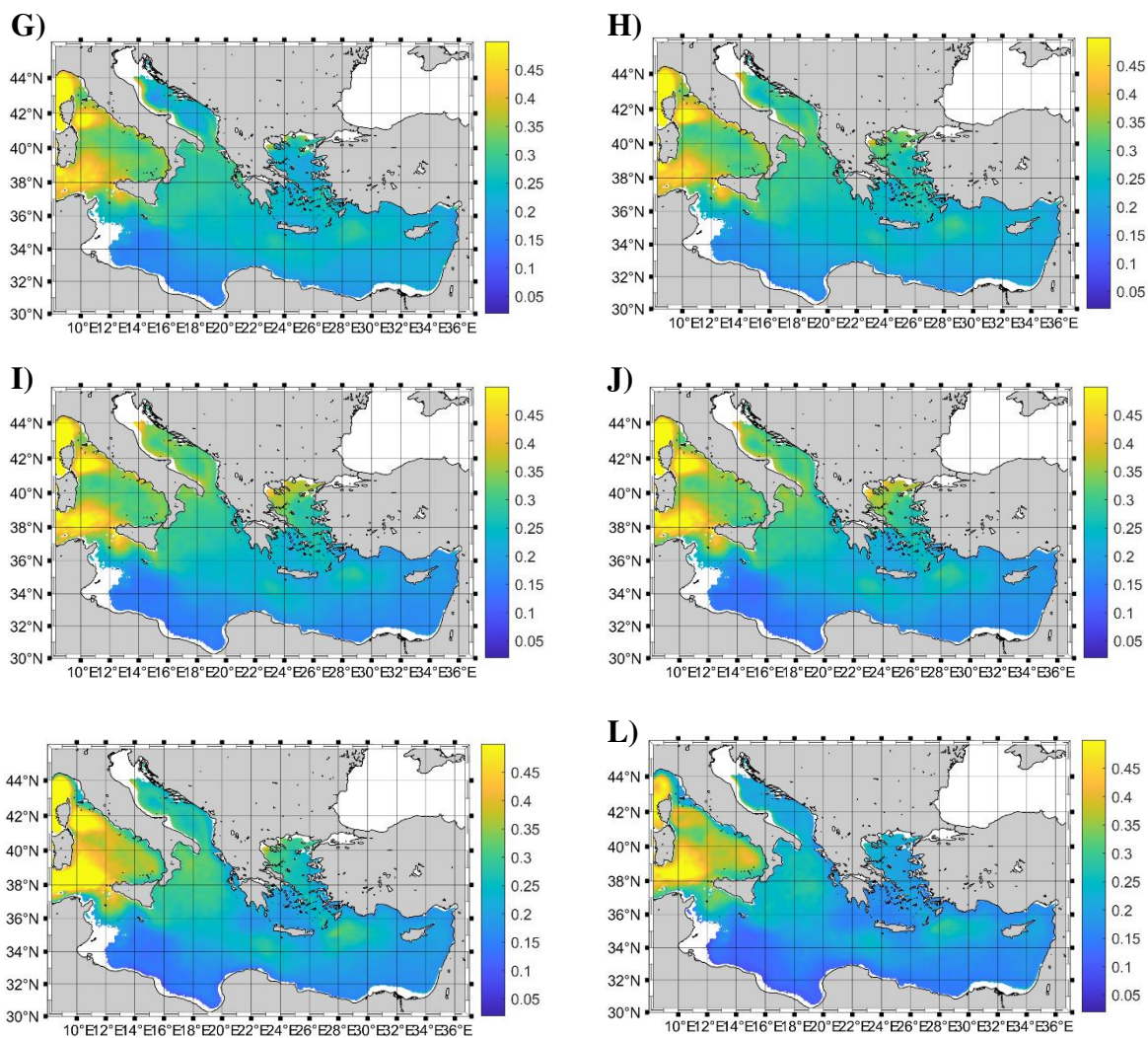
Analiza slika koncentracije amonijaka u Mediteranu, koja varira u rasponu od 0,05 mol/L do 0,5 mol/L, prikazana je na slikama 10 i 11 te ona prikazuje značajne sezonske i prostorne varijacije. Početni ulaz amonijaka u Mediteran je kroz Gibraltarski tjesnac, odakle se širi prema istoku, sve do krajnjeg istoka Mediterana. Tijekom godine, koncentracija amonijaka postupno raste, dosežući vrhunac krajem godine, u listopadu (J) studenom (K) te prosincu (L), dok u siječnju dolazi do naglog opadanja vrijednosti. Posebno se ističe maksimalna koncentracija od 0,5 mol/L zapadno od Italije, između otoka Sardinije i Korzike, što ukazuje na lokalizirane izvore ili procese koji doprinose visokoj razini amonijaka u tom području. Zanimljivo je da se maksimalna koncentracija na tom području održava kroz veći dio godine osim u prvom tromjesečju (slike A, B i C). Dok se visoka koncentracija zadržava do obale Italije, ostatak Mediterana pokazuje maksimalne vrijednosti do 0,35 mol/L. Detaljnija analiza u Jadranu otkriva smjer kretanja vode iz Jonskog mora prema Jadranu. U Jadranskom moru, uz obalu Hrvatske, koncentracija amonijaka je niža, dok je uz obalu Italije viša, što može biti posljedica utjecaja rijeke Po koja unosi nutrijente i zagađivače.

Više koncentracije amonijaka na zapadnom ulazu prema Mediteranu u usporedbi s istočnim dijelom mogu se objasniti kroz nekoliko faktora. Gibraltarski tjesnac je glavni ulaz za vode iz Atlantskog oceana, koje donose veće količine amonijaka iz globalnih atmosferskih taloženja i kontaminiranih atlantskih voda. Zapadni Mediteran, posebno obale Španjolske, Francuske i Italije, ima visoku koncentraciju industrijskih postrojenja, urbanih područja i intenzivne poljoprivrede koja koristi gnojiva bogata amonijakom. Emisije iz ovih izvora doprinose višim koncentracijama amonijaka.



Slika 10. Srednje mjesečne vrijednosti molarne koncentracije amonijaka [mol/L] u mjesecima siječanj (A), veljača (B), ožujak (C), travanj (D), svibanj (E) te lipanj (F).

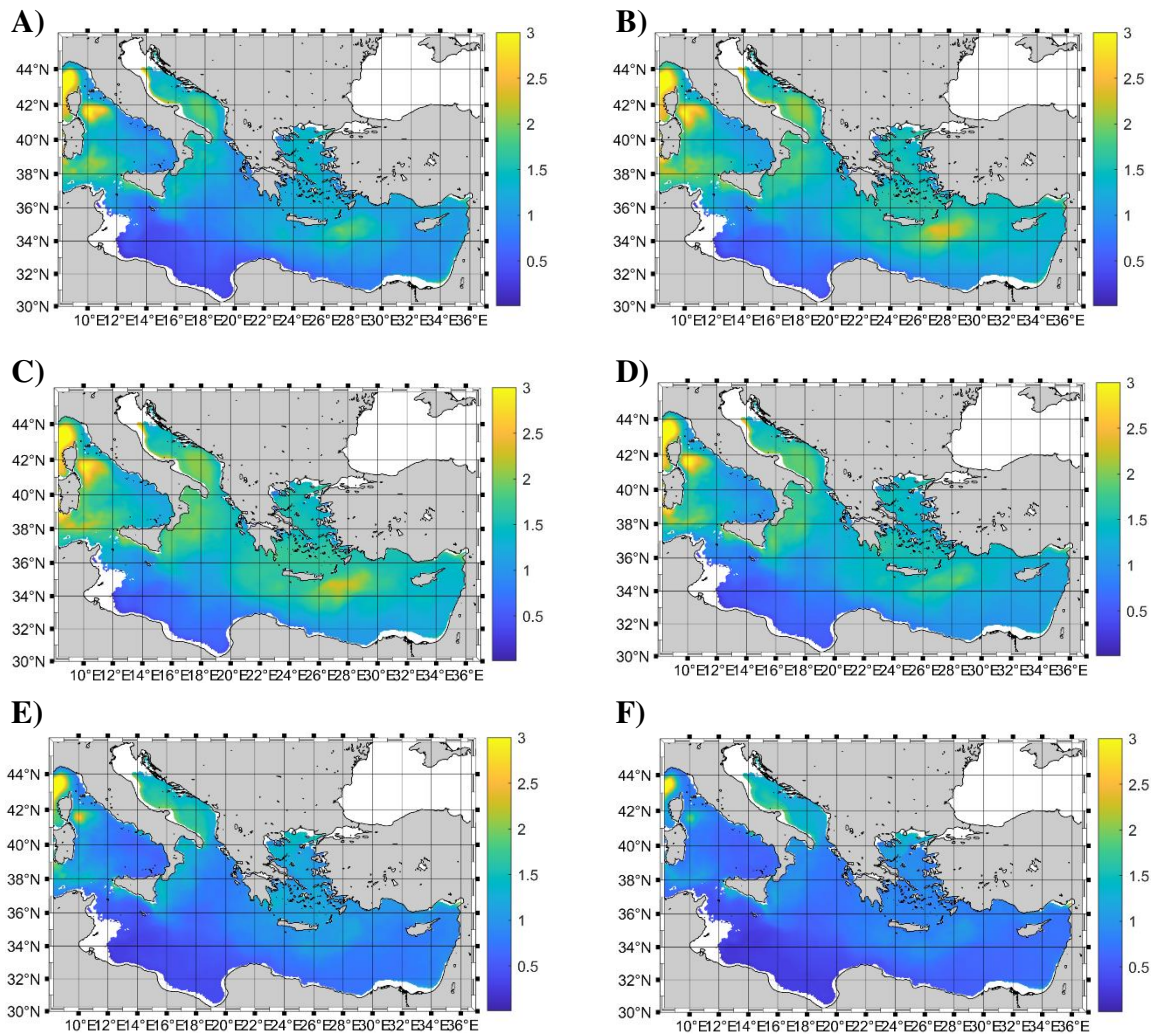
Također, Gibraltarski tjesnac je jedna od najprometnijih pomorskih ruta na svijetu, a emisije iz brodova, uključujući ispušne plinove i otpadne vode, dodatno povećavaju razinu amonijaka u ovom području.



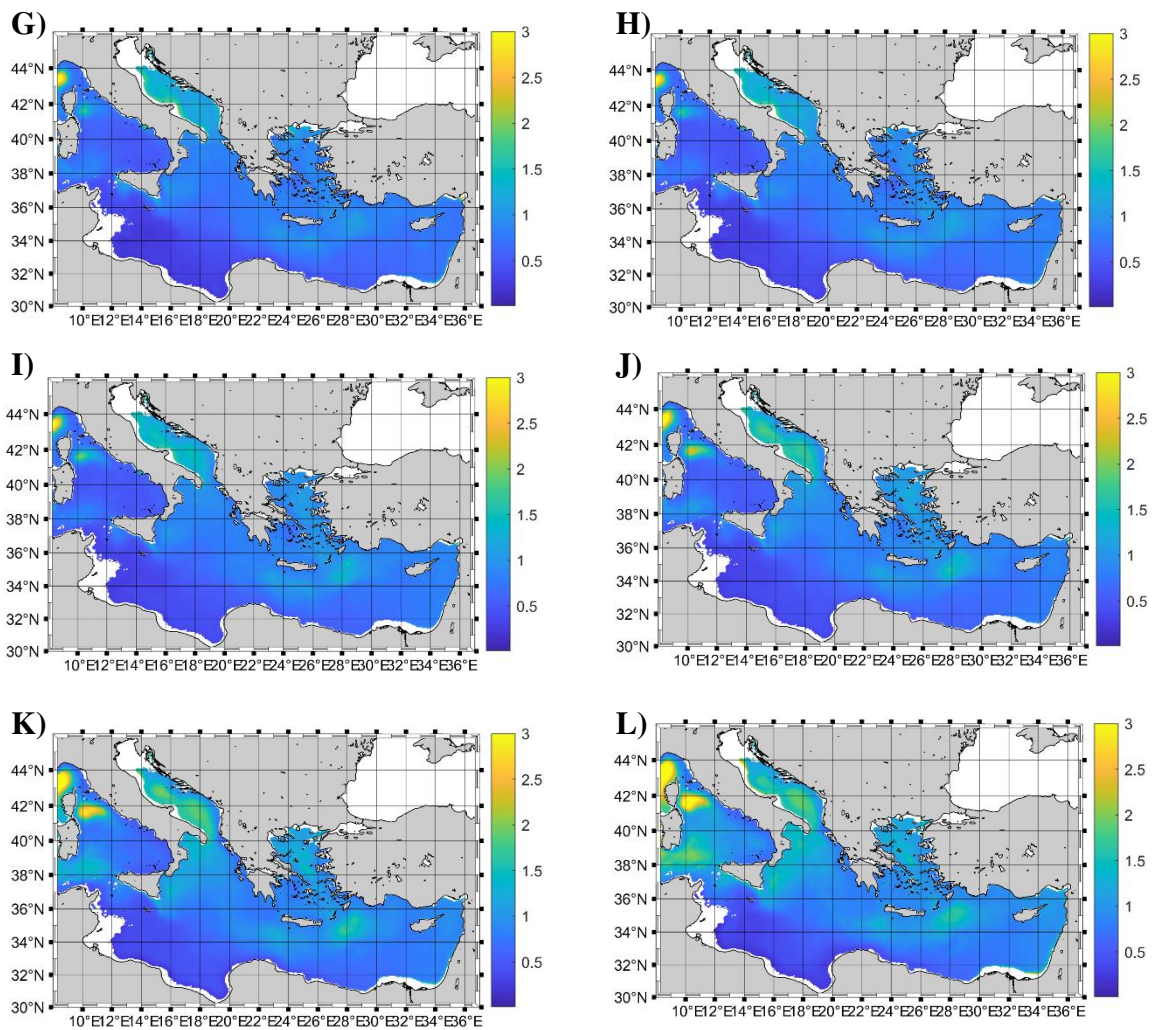
Slika 11. Srednje mjesečne vrijednosti molarne koncentracije amonijaka [mol/L] u mjesecima srpanj (G), kolovoz (H), rujan (I), listopad (J), studeni (K), prosinac (L).

3.4. Srednje mjesečne vrijednosti koncentracije nitrata

11. i 12. slika prikazuju kako nitrati ulaze u Mediteran kroz nekoliko glavnih putova. Prvo, atmosfersko taloženje donosi nitrata iz industrijskih emisija i spaljivanja fosilnih goriva u atmosferu, koje se zatim prenose zračnim strujama i talože na površinu mora. Urbanizacija i otjecaji iz kanalizacijskih sustava dodatno doprinose unosu nitrata u more. Kroz ove procese, nitrati igraju ključnu ulogu u ciklusu nutrijenata, podržavajući rast fitoplanktona, ali prekomjerne koncentracije mogu dovesti do eutrofikacije, što rezultira štetnim algama cvjetanjem i smanjenjem razine kisika u vodi.



Slika 11. Srednje mjesečne vrijednosti molarne koncentracije nitrata [mol/L] u mjesecima siječanj (A), veljača (B), ožujak (C), travanj (D), svibanj (E) te lipanj (F).

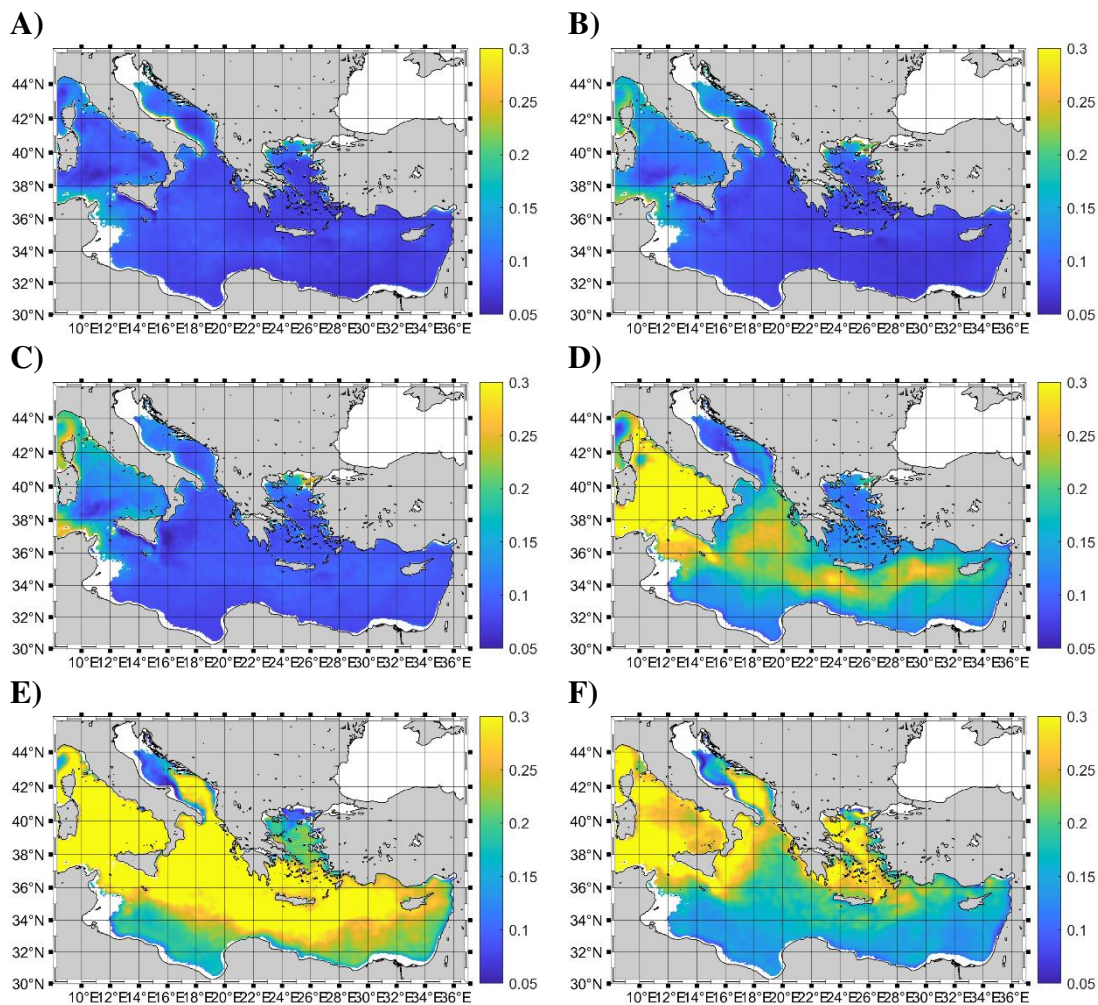


Slika 12. Srednje mjesečne vrijednosti molarne koncentracije nitrata [mol/L] u mjesecima srpanj (G), kolovoz (H), rujan (I), listopad (J), studeni (K), prosinac (L).

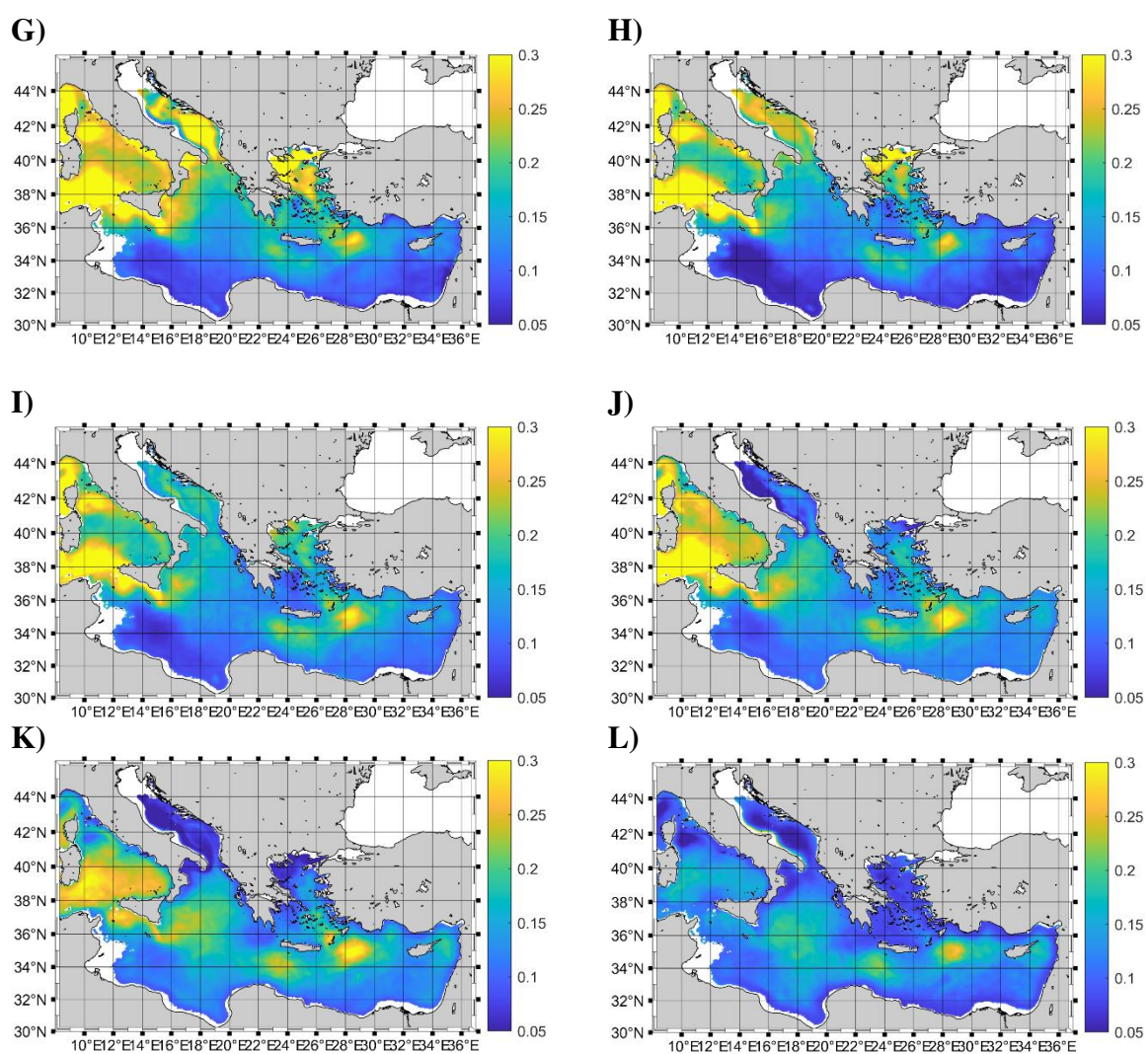
Analiza godišnjih slika koncentracije nitrata u Mediteranu, koja varira u rasponu od 0,5 mol/L do 3 mol/L, pokazuje značajne sezonske i prostorne varijacije. Najviše koncentracije nitrata, slično kao i s amonijakom, nalaze se zapadno od Italije, posebno između otoka Sardinije i Korzike, gdje dosežu do 3 mol/L. U Jadranskom moru, zimski mjeseci donose visoke koncentracije nitrata do 2 mol/L u području Jabučke kotline, dok tijekom ljeta razina pada na oko 1 mol/L. Značajno je i stalno povećana koncentracija nitrata od 1,5 mol/L u Jonskom moru kod Grčke tijekom cijele godine. S druge strane, koncentracije uz obale Afrike su konstantno niže, što može biti rezultat manjeg broja izvora zagađenja i drugačijih hidrografskih uvjeta.

3.4. Srednje godišnje vrijednosti koncentracije klorofila

Srednje godišnje vrijednosti klorofila prikazane na slikama 13 i 14 pokrivaju raspon od 0,05 do 0,3 mg/m³. U mjesecima siječnju (A), veljači (B) i ožujku (C), koncentracije klorofila su gotovo identične, s minimalnim prosječnim vrijednostima od 0,05 mg/m³. Ovako niske razine koncentracije u zimskim mjesecima mogu se pripisati smanjenoj biološkoj aktivnostima i nižim temperaturama koje usporavaju rast fitoplanktona te smanjenom unosu hranjivih tvari zbog slabijih morskih struja i manje svjetlosti za fotosintezu.



Slika 13. Srednje mjesečne vrijednosti masene koncentracije klorofila [mg/m³] u mjesecima siječanj (A), veljača (B), ožujak (C), travanj (D), svibanj (E) te lipanj (F).



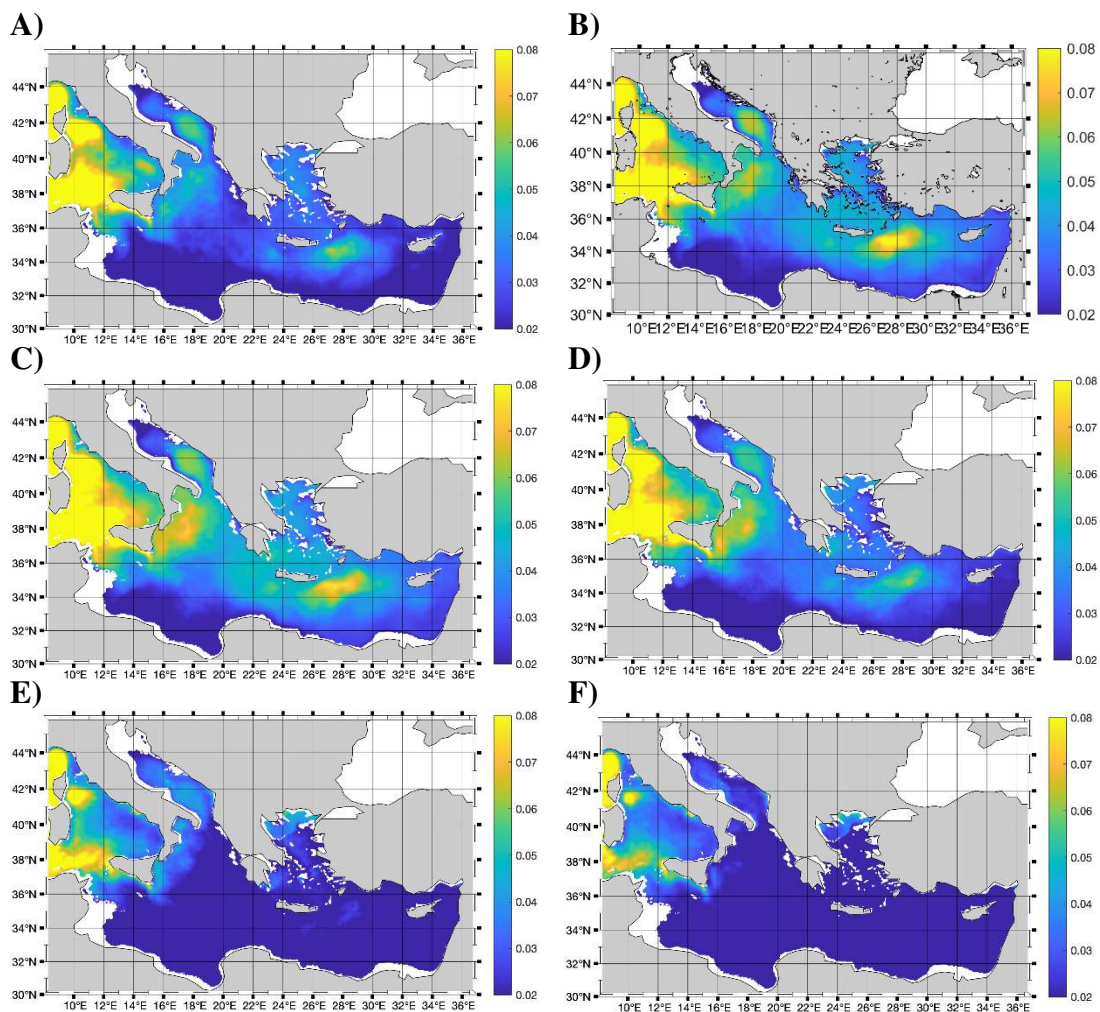
Slika 14. Srednje mjesečne vrijednosti masene koncentracije klorofila [mg/m^3] u mjesecima srpanj (G), kolovoz (H), rujan (I), listopad (J), studeni (K), prosinac (L).

Blago povećane vrijednosti od $0,015 \text{ mg}/\text{m}^3$ uočene su kod ulaza u Mediteran uz obalu Gibraltara i u Egejskom moru, što sugerira prisutnost prvih naznaka proljetne fitoplanktonske aktivnosti. Ovo može biti posljedica proljetnog usklađivanja uvjeta, kao što su povećana dostupnost hranjivih tvari i svjetlosti, što stimulira rast fitoplanktona. U travnju (D) dolazi do naglog porasta koncentracije klorofila, s maksimalnom vrijednošću od $0,3 \text{ mg}/\text{m}^3$, koja se javlja zbog intenzivnog ulaska vode bogate hranjivim tvarima kroz Gibraltar. Istovremeno, cirkulacija vode bogate klorofilom postaje vidljiva kroz cijeli Mediteran. U svibnju (E), voda bogata klorofilom se širi gotovo cijelim područjem Mediterana, što je rezultat akumulacije hranjivih

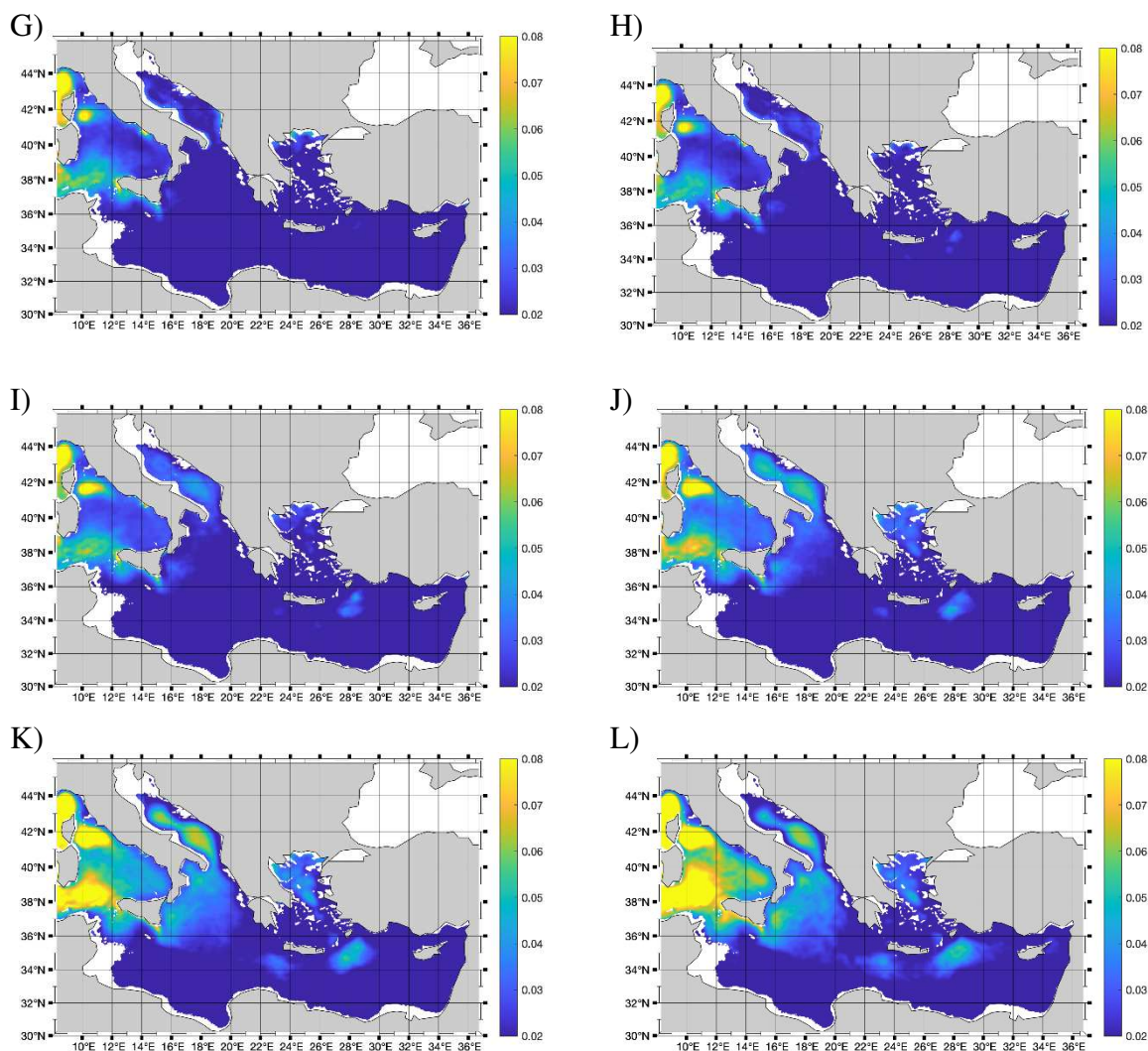
tvori i optimalnih uvjeta za fotosintezu. Ova ekspanzija može se pripisati porastu temperature i dužem trajanju sunčeve svjetlosti, koji pogoduju rastu fitoplanktona. Nakon svibnja, koncentracija klorofila počinje opadati, što je uobičajeno za ljetne mjesece. Tijekom lipnja (F), srpnja (G), kolovoza (H) i rujna (I), koncentracije klorofila se smanjuju zbog smanjenja hranjivih tvari u površinskim vodama i povećane stratifikacije, koja otežava miješanje voda i doprinosi smanjenju nutrijenata dostupnih fitoplanktonu. U Jadranskom moru, koncentracija klorofila u studenom (K) dostiže minimalnu vrijednost od $0,015 \text{ mg/m}^3$. Ovo smanjenje može biti posljedica smanjenja temperature, smanjene dostupnosti hranjivih tvari i manje sunčeve svjetlosti, što zajedno dovodi do smanjenja biološke aktivnosti i opadanja koncentracije klorofila u cijelom Jadranskom moru. Ovi obrasci ukazuju na sezonske promjene u biološkoj produktivnosti i utjecaj fizičkih i kemijskih uvjeta na ekosustav Mediterana i Jadranskog mora.

3.6. Srednje mjesečne vrijednosti koncentracije fosfata

Na slikama 15 i 16 prikazana je prosječna molarna koncentracija fosfata u Mediteranskom moru. U siječnju (A), visoka koncentracija fosfata primjećuje se u sjeverozapadnom dijelu mora, označena žutim tonovima (oko 0,08 mol/L), dok se prema istoku i jugu koncentracija postupno smanjuje, s nižim vrijednostima označenim plavim tonovima (oko 0,02 mol/L).



Slika 15. Srednje mjesečne vrijednosti molarne koncentracije fosfata [mol/L] u mjesecima siječanj (A), veljača (B), ožujak (C), travanj (D), svibanj (E) te lipanj (F).



Slika 16. Srednje mjesečne vrijednosti molarne koncentracije fosfata [mol/L] u mjesecima srpanj (G), kolovoz (H), rujan (I), listopad (J), studeni (K), prosinac (L)..

Istočni dio Jonskog mora, posebno blizu Grčke, pokazuje niže koncentracije. U veljači (B), visoke koncentracije fosfata zadržavaju se u sjeverozapadnom dijelu, s laganim širenjem žutih tonova prema središtu. Središnji dio mora ima srednje vrijednosti (oko 0,04 mol/L), dok istočni dio i dalje pokazuje niske koncentracije, a razlika između sjeverozapadnog i istočnog dijela je izraženija nego u siječnju. U ožujku i travnju (C i D), sjeverozapadni dio i dalje ima visoke koncentracije, ali se vidljivo smanjuju prema jugoistoku. U svibnju (E), visoke koncentracije fosfata zadržavaju se na sjeverozapadu, ali se žuti tonovi protežu dublje prema središnjem dijelu mora. Istočni dio i dalje pokazuje niske koncentracije. U lipnju (F), visoke

koncentracije fosfata na sjeverozapadu se blago smanjuju, dok središnji i istočni dijelovi mora pokazuju ujednačene niske koncentracije.

U kolovozu (H) i rujnu (I), koncentracije fosfata su općenito niske, uglavnom između 0,02 i 0,04 mol/L. Međutim, u studenom i prosincu dolazi do primjetnog porasta koncentracija fosfata. Najviše koncentracije zabilježene su u sjevernom Jadranu, u zaljevu Lion, te dijelovima Egejskog mora i uz obale Korzike i Sardinije . Također, primjetno su povišene koncentracije oko Sicilije i u Jonskom moru tijekom zime. Ove sezonske promjene u koncentracijama fosfata mogu utjecati na ekosustave Sredozemnog mora, s višim razinama hranjivih tvari koje podržavaju rast fitoplanktona tijekom hladnijih mjeseci.

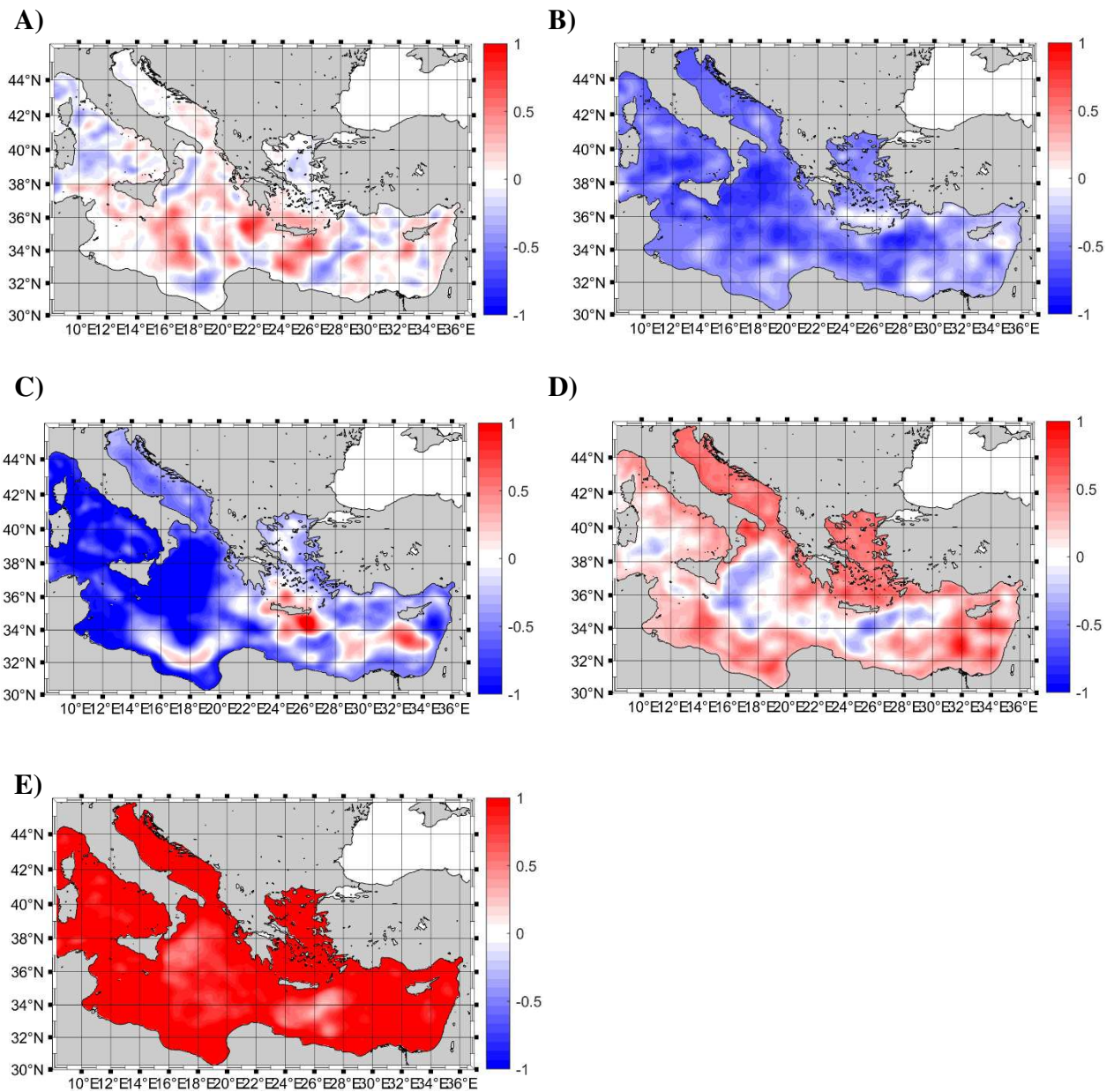
Fosfati ulaze u Sredozemno more putem rijeka koje donose hranjive tvari iz poljoprivrednih i urbanih područja, atmosferskim taloženjem prašine iz pustinjskih područja poput Sahare, podmorskim izvorima i vulkanskom aktivnošću te otpadnim vodama iz urbanih i poljoprivrednih područja bogatim gnojivima i sredstvima za pranje. Industrijski ispusti također doprinose prisutnosti fosfata u moru. Fosfati su ključni za ekosustav Sredozemnog mora jer podržavaju primarnu proizvodnju, služeći kao esencijalni nutrijenti za fitoplanktone, osnovne organizme u morskom hranidbenom lancu. Povećane razine fosfata mogu potaknuti rast fitoplanktona, što utječe na cijeli ekosustav, uključujući ribarstvo i biodiverzitet. Međutim, prekomjerne količine fosfata mogu dovesti do eutrofikacije, što rezultira smanjenjem razine kisika i negativnim utjecajem na morski život.

3.7. Rezultati strojnog učenja

3.7.1. Visina mora

Rezultati NG analize na podacima visine mora prikazani su pomoću pet pobjedničkih neurona (BMU) (Slika 17), pri čemu su samo oni koji se posebice ističu odabrani za daljnju analizu. Vrijednosti slojeva koje analiziramo kreću se od -1 do 1, pri čemu -1 označava ekstremno negativne anomalije, a 1 označava ekstremno pozitivne anomalije. Nakon NG analize na podacima visine mora koja rezultirala u 5 BMU-ova, napravljena je nova analiza tako da su pronađena 4 odgovarajuća sloja za svaki od tih 5 BMU-ova. Svaki od ta 4 sloja je činila jedna od varijabli koje smo prethodno promatrali: amonijak, nitrat, fosfat i klorofil. Povezivanje je napravljeno tako da su svi trenutci kad se ostvario BMU 1 zabilježeni vremenskim indeksom. Zatim su za taj vremenski indeks pronađene vrijednosti svakog od 4 prethodno spomenuta sloja zasebno, da bi se na kraju za svaki od tih slojeva izračunala srednja vrijednost po svim tim indeksima. Isto je napravljeno i za preostala 4 BMU-a.

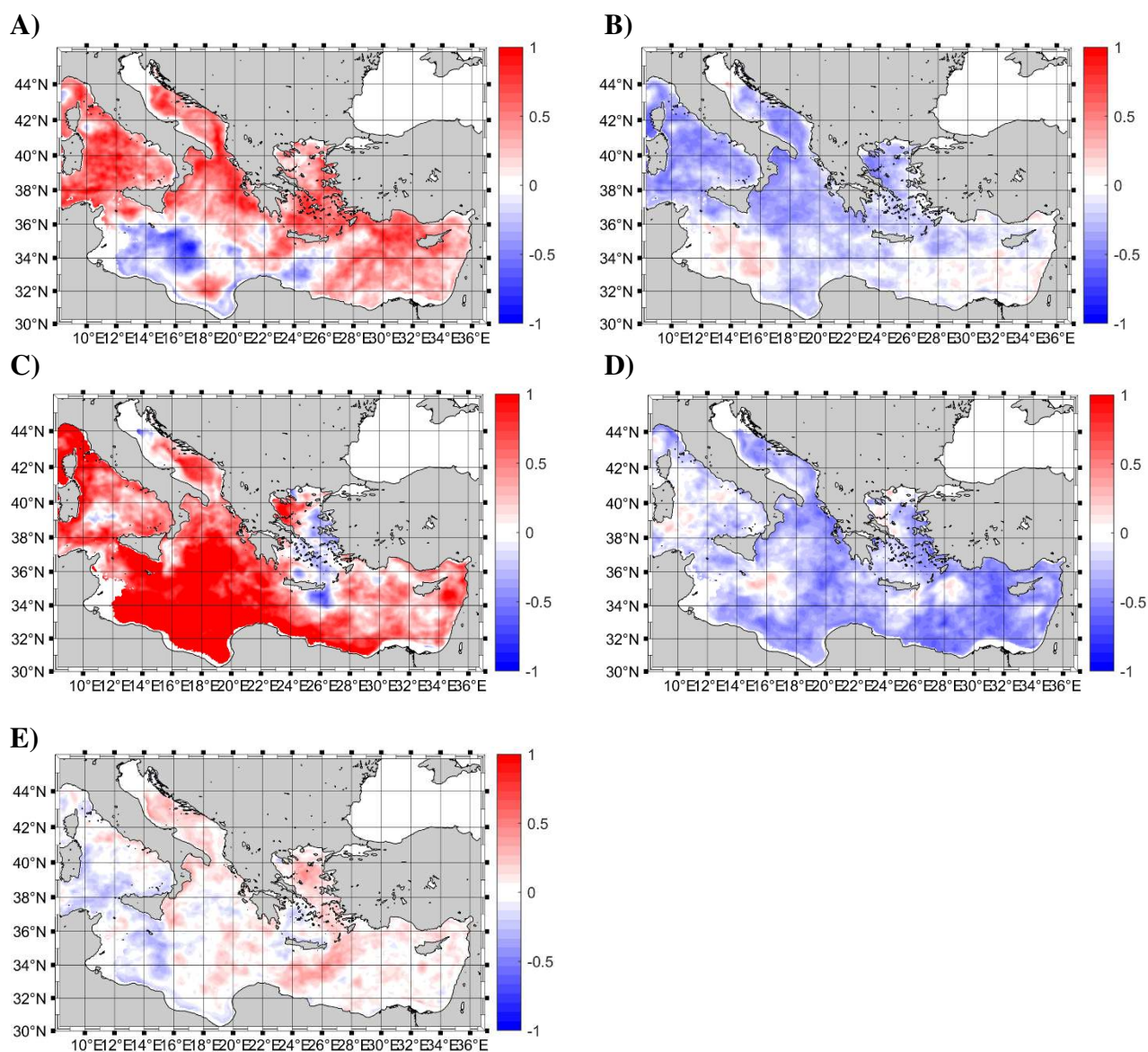
BMU 1 se ističe raštrkanim pozitivnim i negativnim anomalijama duž cijelog promatranog područja Mediterana. Najizraženija pozitivna anomalija pojavljuje se južno od Peloponeza, što ukazuje na prisutnost vrtloga. BMU 2 prikazuje cijelo Sredozemlje kao negativnu anomaliju, što je u potpunoj suprotnosti s BMU 5, koji prikazuje Mediteran kao pozitivnu anomaliju u cjelini. BMU 3 većinom pokazuje negativne anomalije u Jadranu, osim u blizini obale Tunisa, gdje se uočava blago pozitivna anomalija od 0,25, što također može biti povezano s BIOS oscilacijom. Na BMU 3 su pozitivne anomalije jasno prisutne južno od Grčke i u istočnom Mediteranu. BMU 4 odražava značajnu negativnu anomaliju u visini mora na području Jonskog mora, što je tipično za ciklonalni vrtlog karakterističan za BIOS oscilaciju. Jadran je u BMU 2 i BMU 3 dominantno negativan, dok je u BMU 4 i BMU 5 izraženo pozitivan.



Slika 17. Prostorni prikaz pet BMU-ova za visinu mora dobivenih Neural Gas modelom: BMU 1(A), BMU 2(B), BMU 3(C), BMU 4(D), BMU 5(E).

3.7.2. Otopljeni amonijak

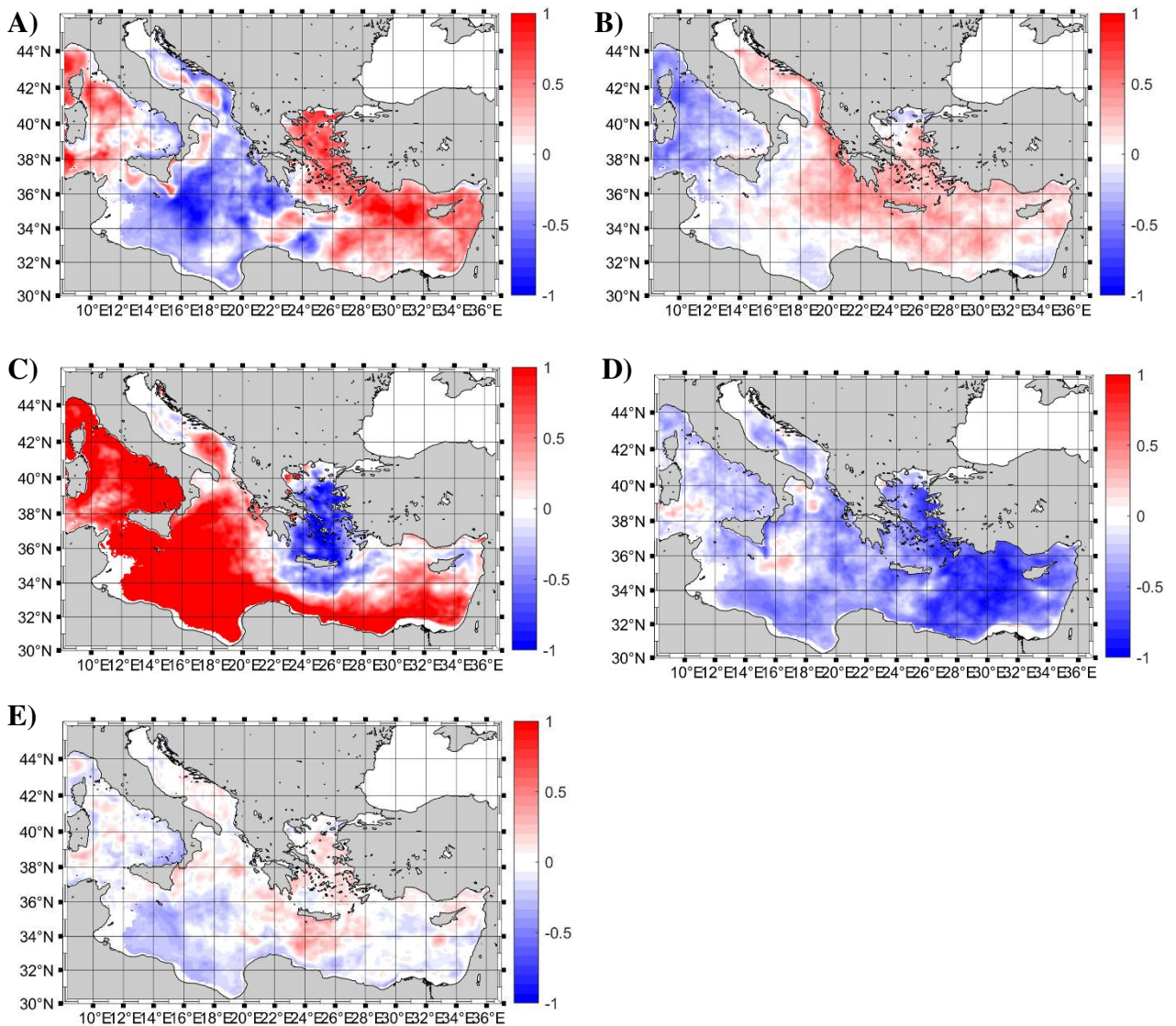
U ovoj analizi, prikazanoj na slici 18, promatrani su BMU-ovi za amonijak. BMU 1 i 3 pokazuju visoke koncentracije tj. pozitivne anomalije, BMU 2 i 4 niske koncentracije tj. negativne anomalije, a BMU pet neutralno stanje.



Slika 18. Srednja polja amonijaka u razdoblju od siječnja 1999. do prosinca 2020. godine na dubini od 72 m izračunata za svaki od pet BMU-ova dobivenih Neural Gas modelom: BMU 1(A), BMU 2(B), BMU 3(C), BMU 4(D), BMU 5(E).

S tim da su uočene veća odstupanja u Egejskom moru te južno Sredozemlje. Na BMU 1 su anomalije pozitivne na sjevernom dijelu, a negativne na južnom dijelu Mediterana, s tim da je opažen pozitivan kružni oblik uz sjever Libije. BMU 3 pokazuje prostorne neujednačene anomalije, pozitivne u velikom dijelu Sredozemlja, osim u dijelu Egejskog mora te postoji kružna struktura tj. vrtlog oko otoka Krete. Zanimljivost koju je uočena jest ta da je jako pozitivna anomalija uočena u sjevernom Jadranu te između otoka Sardinije i Sicilije. BMU 5 ima jako male anomalije, ali dominiraju pozitivne anomalije koje su opet prostorno neujednačene. Jadran je blago pozitivan, Egejsko more također, dok je zapadno Sredozemlje te južno od Sicilije negativno. Postoji samo mala razlika uz obale Afrike. Opet je uočena pozitivna anomalija Sjevernog jadrana. Na BMU 2 i BMU 4 je situacija obrnuta od neurona jedan, sjeverni dio je blago negativan, a južni dio Mediterana je blago pozitivan.

3.7.3. Otopljeni nitrati

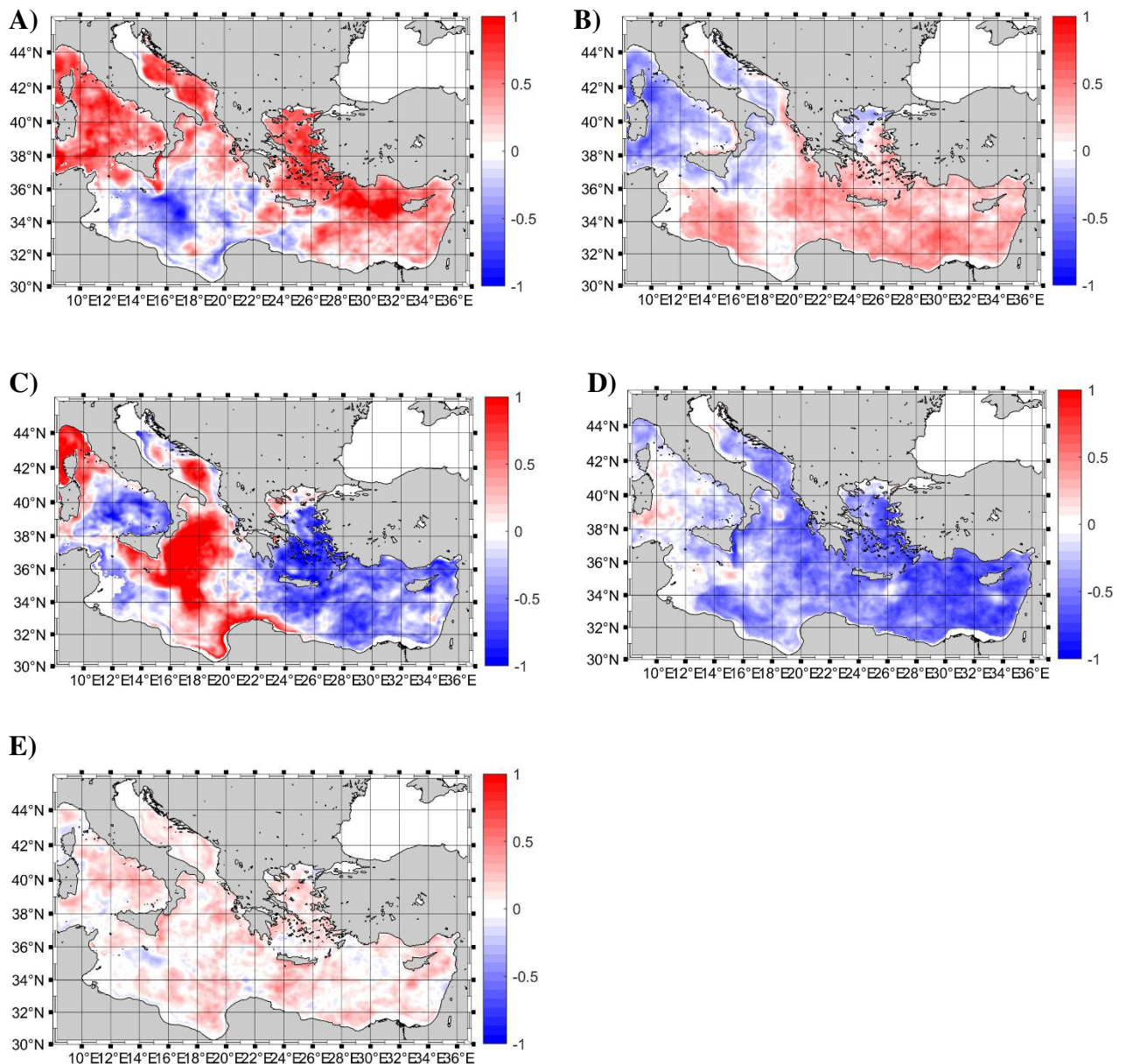


Slika 19. Srednja polja nitrata u razdoblju od siječnja 1999. do prosinca 2020. godine na dubini od 72 m izračunata za svaki od pet BMU-ova dobivenih Neural Gas modelom: BMU 1(A), BMU 2(B), BMU 3(C), BMU 4(D), BMU 5(E).

Neuroni za amonijak (slika 18) i nitrate (slika 19) se ponašaju slično, tj. podudaraju se i slijede jedan drugoga, ali i postoje situacije kad nisu. Npr. za Jonsko more je analizom za amonijak dobiveno da su u BMU 1 i BMU 3 u korelaciji, dok su BMU 2 i BMU 4 suprotni. Korelacija nije ista u svim slučajevima jer strojno učenje nije linearno. BMU-ovi za nitrate pokazuju slične korelacije između BMU 1 i BMU 3 te BMU 2 i BMU 4, dok je BMU 5 održao neutralno stanje. U BMU 1 se jako izraženo vidi južnojadranski vrtlog, također se odvaja

sjeverni od južnog Jadrana kao anomalna zona. Kako je uočeno u skoro svim neuronima, Jadran se ne ponaša kao monolitno tijelo već kao neujednačena masa. U Jonskom moru je opažena cirkulacija koja bi mogla upućivati na BiOS, dok je ostatak sredozemlja pozitivan. BMU 3 prikazuje izrazitu razliku za Egejsko more, s jakom negativnom anomalijom, dok je ostatak Mediterana izrazito pozitivan. BMU 2 prikazuje ingresiju u Jadranskom moru.

3.7.4. Otopljeni fosfati



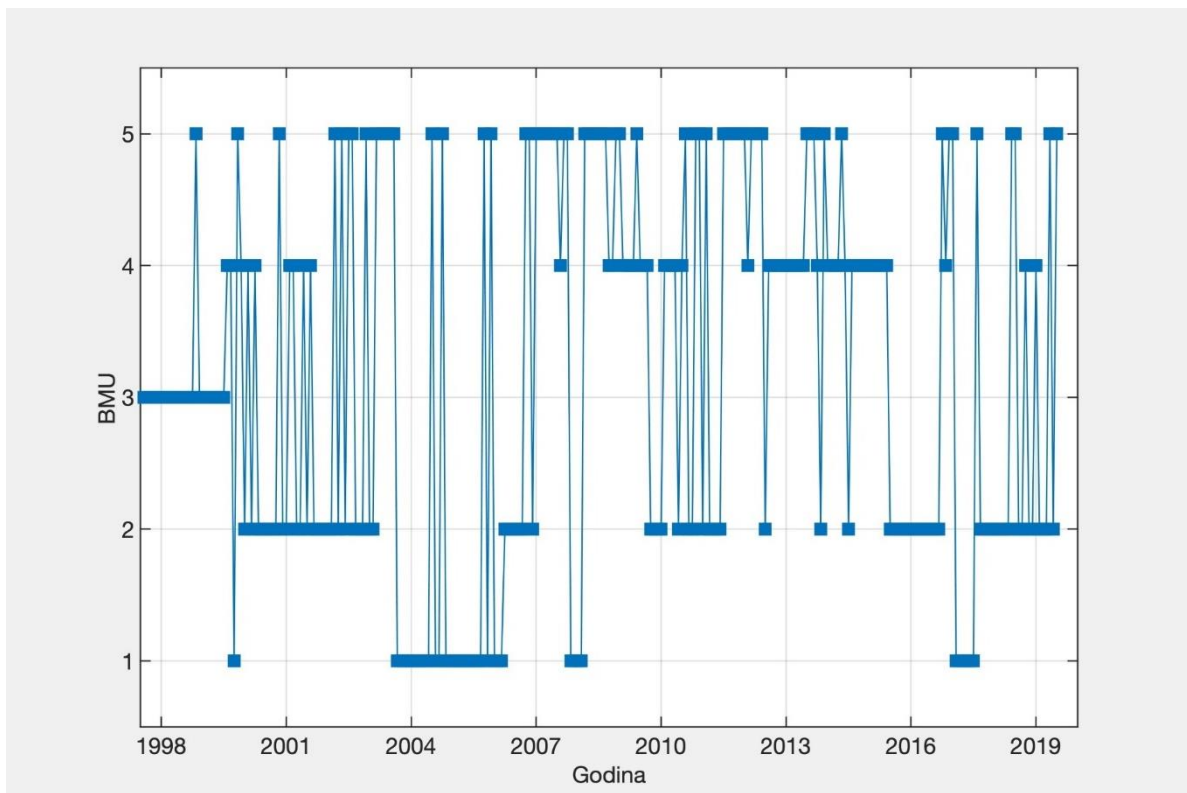
Slika 20. Srednja polja fosfata u razdoblju od siječnja 1999. do prosinca 2020. godine na dubini od 72 m izračunata za svaki od pet BMU-ova dobivenih Neural Gas modelom: BMU 1(A), BMU 2(B), BMU 3(C), BMU 4(D), BMU 5(E).

Izražena je jaka ulazna struja iz Jonskog mora u Jadran, a vrtlog je ostao izražen. Uz obale Grčke ulazi pozitivna anomalija, dok dio mora uz obalu Italije ostaje negativan. Neuron četiri je uglavnom cijeli negativan, a neuron pet neutralan.. Slika 20 prikazuje srednja polja fosfata prikazana kroz 5 BMU-a. Za Jadran, BMU za fosfate se u BMU 1, BMU 2 i BMU 3 se opet uočava pozitivna anomalija koja ulazi u Jadran preko obale Grčke. Na BMU 3 se u Južnojadranskoj i Jabučkoj kotlini vidi pozitivna anomalija, ali uz obalu Hrvatske te sjevernije od Jabučke kotline i dalje od obale Italije je negativan. Cijelo Jonsko more je negativno. BMU 2 i BMU 3 su suprotne kombinacije bimodalne oscilacije. Na BMU 2, uz Grčku i Albaniju, pozitivna anomalija obilježava Jadran te se u vrtlogu sve izmiješa s negativnim anomalijama koje ulaze sa zapadne strane Jadrana preko Sicilije. BMU 4 je uglavnom negativan za cijeli Mediteran, a BMU 5 je blago pozitivan.

Jadransko more iz Jonskog mora uz obale Grčke te izlaz nižih koncentracija klorofila uz obale Italije. Jadran je izrazito raštrkan, ali su jako male prosječne vrijednosti. Anomalije klorofila nisu nigdje posebno izražene. BMU 1 i BMU 3 su opet slični, ali suprotnih vrijednosti. Oko Dugog otoka je uočena izrazito dinamična situacija, pogotovo na BMU 4, koji je blago negativan za ostatak Mediterana.

3.8. Samoorganizirajuće neuronske mreže

Slika 22 prikazuje rezultate samoorganizirajuće neuronske mreže (engl. *Self-Organizing Map* - SOM), gdje su analizirani podaci o visini mora te koncentracijama amonijaka, nitrata, fosfata i klorofila u određenom razdoblju. Na slici, x-os predstavlja godine, od 1998. do 2020., dok y-os prikazuje BMU vrijednosti, koje su raspoređene od 1 do 5.



Slika 22. Vremenski hod pobjedničkih neurona (BMU) dobivenih Neural Gas modelom korištenjem polja visine mora nad Jadransko-jonskim bazenom.

BMU označava jedinice u neuronskoj mreži koje najbolje odgovaraju ulaznim podacima pa svaka BMU vrijednost ukazuje na grupiranje sličnih podataka iz tih godina. Vertikalne linije

povezuju različite BMU kroz godine, pokazujući promjene u podacima, dok horizontalne linije ukazuju na stabilnost podataka, gdje je isti BMU prisutan kroz više godina.

Uočljive su faze stabilnosti (npr. 2000., 2004., 2016.), kada su okolišni uvjeti ili kemijski sastav mora bili slični. S druge strane, godine poput 2010. pokazuju veću varijaciju BMU vrijednosti, što sugerira značajne promjene u podacima. Na početku je BMU 3 dominantan, što označava stabilnost u podacima tijekom tog razdoblja. Nakon toga, započinje faza oscilacije između BMU 2 i BMU 4, koja traje određeno vrijeme, da bi nakon godinu dana prešla na oscilaciju između BMU 2 i BMU 5. Ova oscilacija između BMU 2 i BMU 5 nastavlja se sljedećih 5-6 godina. Zatim započinje novo razdoblje u kojem podaci osciliraju između BMU 1 i BMU 5, s povremenim vraćanjem iz BMU 5 u BMU 4. U kratkom periodu pojavljuje se još jedna oscilacija, ovaj put između BMU 2 i BMU 4, pa BMU 2 i BMU 5, što stvara složeni obrazac. Ovakav način oscilacije može se opisati kao bimodalna oscilacija, s dva prepoznatljiva obrasca: jedan oscilira između BMU 2 i BMU 4, a drugi između BMU 1 i BMU 5, uz prijelaze iz BMU 4 u BMU 5. Ova slika je ključna jer naglašava važne prijelaze u podacima i složenost promjena koje su se dogodile u analiziranom razdoblju. BMU 4, koji odgovara BIOS-u, predstavlja dio sustava koji, u teoriji, "pumpa" Jadran, odnosno donosi promjene u morskim uvjetima poput cirkulacije i sastava mora.

4. RASPRAVA

Rezultati ovog istraživanja jasno ukazuju na značajne prostorno-vremenske promjene u okolišnim parametrima Sredozemnog mora tijekom promatranog tridesetogodišnjeg razdoblja. Primjenom neuronskih mreža (Neural Gas algoritma) utvrđene su promjene u visini mora, koncentracijama hranjivih tvari (fosfati, nitrati, amonijak) te klorofila, čime je omogućeno prepoznavanje ključnih obrazaca i anomalija unutar različitih regija mora. Posebna pažnja posvećena je istočnom dijelu Sredozemnog mora, gdje su promjene visine mora bile najizraženije, što se može pripisati toplinskom širenju vode uslijed globalnog zagrijavanja te djelovanju lokalnih morskih struja. Podaci o visini mora jasno su ukazali na sezonske fluktuacije, pri čemu je zabilježeno smanjenje razine mora tijekom zimskih mjeseci, dok se najveće vrijednosti javljaju ljeti. Povećanje visine mora u istočnom Mediteranu, posebice u Levantskom i Egejskom moru, ukazuje na potencijalni utjecaj termalnog širenja vode i jačanje lokalnih morskih struja koje prenose topliju vodu iz Atlantskog oceana, dok su zapadni dijelovi Mediterana pokazali manju varijabilnost. Analiza koncentracija hranjivih tvari otkrila je značajne razlike između obalnih i otvorenih morskih područja. Visoke koncentracije fosfata i nitrata zabilježene su u obalnim područjima, posebice u Jadranskom moru, što ukazuje na snažan utjecaj antropogenih čimbenika, uključujući poljoprivredne aktivnosti i industrijske ispuste. Eutrofikacija u sjevernom Jadranu, uzrokovana unosom nutrijenata iz rijeka poput rijeke Po, dodatno je naglasila važnost praćenja kvalitete vode u ovoj regiji.

Posebno zanimljiv segment istraživanja bila je analiza neuronskih mreža za otkrivanje prostornih anomalija. Na primjer, promjene u Jonskom moru su istaknule utjecaj Bimodalnog oscilirajućeg sustava (BiOS), koji je imao značajnu ulogu u određivanju dinamike morskih struja i njihovog utjecaja na okolišne parametre. Promatrane su korelacije između visine mora i koncentracija hranjivih tvari, što je omogućilo identifikaciju područja s visokim biološkim aktivnostima, poput sjevernog Jadrana, gdje su visoke koncentracije amonijaka bile povezane s unosom nutrijenata iz rijeka. Korištenje Neural Gas algoritma pokazalo se vrlo korisnim za prepoznavanje sezonskih i dugoročnih obrazaca u koncentraciji hranjivih tvari i biološkoj produktivnosti. Sezonske fluktuacije u koncentracijama klorofila jasno su povezane s promjenama temperature i količine sunčeve svjetlosti, što je utjecalo na produktivnost fitoplanktona. Zimski mjeseci su pokazali niže koncentracije klorofila, dok je tijekom proljeća i ljeta došlo do povećanja, osobito u području Gibraltara i Egejskog mora. Dodatno, studija je ukazala na značajnu povezanost između koncentracija nitrata i eutrofikacijskih procesa u

sjevernom Mediteranu, posebice u blizini industrijskih i poljoprivrednih područja. Istovremeno, oligotrofna područja istočnog Mediterana, kao što je Levantsko more, pokazala su niže koncentracije nutrijenata, što ukazuje na manji utjecaj kontinentalnih unosa nutrijenata i ograničenu produktivnost.

Međutim, rezultati pokazuju da, iako BIOS oscilira i teoretski utječe na Jadran, u tom trenutku zabilježena je niska koncentracija nutrijenata, što sugerira da se unatoč prisutnosti BIOS-a u Jadranu ne događaju značajne promjene. Drugim riječima, iako je BIOS aktivan, njegovi učinci na Jadransko more su minimalni ili nepostojeći u tom periodu, što ukazuje na moguću slabost ili neefikasnost ovog mehanizma u pokretanju promjena unutar Jadranskog mora. Ovaj rezultat dodatno podupire tezu da unutarnje oscilacije unutar istočnog Sredozemnog mora, a ne vanjski faktori, igraju dominantnu ulogu u dinamici morskih uvjeta.

Svi ovi podaci ukazuju na potrebu kontinuiranog praćenja okolišnih promjena u Sredozemnom moru, posebno s obzirom na sve izraženije utjecaje klimatskih promjena i ljudskih aktivnosti. Ova studija nudi značajan doprinos razumijevanju dinamičkog ekosustava Sredozemnog mora te pruža temelje za buduća istraživanja koja će se fokusirati na dugoročne promjene u okolišnim parametrima i njihove učinke na morsku bioraznolikost.

5. ZAKLJUČCI

Analizom prostorno-vremenskih promjena okolišnih parametara u Sredozemnom moru utvrđene su značajne sezonske i dugoročne fluktuacije, osobito u istočnom dijelu Mediterana. Primjenom neuronskih mreža (Neural Gas algoritma) prepoznate su ključne anomalije u koncentracijama fosfata, nitrata, amonijaka i klorofila. Najveće promjene visine mora zabilježene su u Levantskom i Egejskom moru, što ukazuje na toplinsko širenje vode i utjecaj morskih struja. Visoke koncentracije hranjivih tvari, poput fosfata i nitrata, u Jadranskom moru ukazuju na snažan antropogeni utjecaj, osobito u obalnim područjima. Uočene su sezonske fluktuacije koncentracija klorofila, s najnižim vrijednostima tijekom zime i najvišim tijekom proljeća i ljeta. Podaci ukazuju na značajnu ulogu Bimodalnog oscilirajućeg sustava (BiOS) u Jonskom moru u dinamici morskih struja i utjecaju na okolišne parametre. Analiza neuronskih mreža omogućila je identifikaciju područja visoke biološke aktivnosti, osobito u sjevernom Jadranu, gdje je eutrofikacija najizraženija. Oligotrofna područja istočnog Mediterana, poput Levantskog mora, pokazuju manju produktivnost zbog nižih koncentracija nutrijenata. Studija naglašava potrebu za kontinuiranim praćenjem okolišnih parametara i njihovih promjena pod utjecajem klimatskih faktora i ljudskih aktivnosti. Ova istraživanja pružaju temelje za daljnje razumijevanje dinamike ekosustava Sredozemnog mora i doprinose razvoju strategija za očuvanje morskog okoliša.

6. LITERATURA

- Ahmadi-Givi F, Karbasi S, Mohebalhojeh AR. 2021. Investigating changes of the Siberian High during 1970-2020 period and its effects on the Mediterranean cyclones, SSRN Electronic Journal, <https://doi.org/10.2139/ssrn.3995159>.
- Batistić M, Bensi M, Cardin V, Civitarese G, Dulčić J, Gačić M, Garić R, Menna M. 2023. The BiOS mechanism: History, theory, implications, *Progress in Oceanography*, 216, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103056>.
- Bensi M, Cardin V, Civitarese G, Gačić M. 2013. Interannual to decadal variability of the Adriatic-Ionian Bimodal Oscillating System (BiOS). *Ocean Science*, 9(1), 83-91. <https://doi.org/10.5194/os-9-83-2013>.
- Borzelli GLE, Carniel S. 2023. A reconciling vision of the Adriatic-Ionian Bimodal Oscillating System, *Scientific Reports* 13, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29162-2>.
- Cardin V, Civitarese G, Eusebi Borzelli GL, Gačić M, Yari S. 2010. Can internal processes sustain reversals of the ocean upper circulation? The Ionian Sea example, *geophysical research letters*, 37(9) , <https://doi.org/10.1029/2010GL043216>.
- Civitarese G, Gačić M, Lipizer M, Eusebi Borzelli GL. 2010. On the impact of the Bimodal Oscillating System (BiOS) on the biogeochemistry and biology of the Adriatic and Ionian Seas (Eastern Mediterranean). *Biogeosciences*, 7(12): 3987-3997, <https://doi.org/10.5194/bg-7-3987-2010>.
- Filagrasso A, Mariotti A, Struglia MV. 2004. River Discharge into the Mediterranean Sea: Climatology and aspects of the Observed Variability. *Journal of Climate* 17(24):4740-4751, <https://doi.org/10.1175/JCLI-3225.1>.
- Giorgi F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Lazzari P, Vichi M, Matteucci G, Di Biagio V, Farneti R. 2020. Mediterranean Sea biogeochemistry dynamics: An overview of numerical modelling developments. *Progress in Oceanography*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102381>
- Lascaratos A, Roether W, Nittis K, Klein B. 1999. Recent changes in deep water formation and spreading in the Eastern Mediterranean Sea: A review. *Progress in Oceanography*, 44(1-3), 5-36. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(99\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00019-0)

- Malanotte-Rizzoli P, Manca BB, Ribera d'Alcalà M, Theocharis A, Brenner S. 1999. The Eastern Mediterranean in the 80s and 90s: The big transition in the intermediate and deep circulations. *Oceanologica Acta*, 22(1), 56-73. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(99\)80033-0](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(99)80033-0)
- Martinez TM, Berkovich SG, Schulten KJ. 1996. Neural-Gas Network for Vector Quantization and Its Application to Ime-Series Prediction. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 4, No. 4, pp: 558-569. doi:10.1109/72.238311
- Ozer T, Gertman I, Kress N. 2017. Temperature trends in the Mediterranean Sea: A multidecadal analysis of an intermediate water mass. *Ocean Science*, 13(3), 527-539. <https://doi.org/10.5194/os-13-527-2017>
- Pinardi N, Masina S. 2000. The physical oceanography of the Mediterranean Sea: A review of current knowledge and perspectives. *Progress in Oceanography*, 44(1-3), 221-231. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(99\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00022-0)
- Raimbault P, Diaz F, Pouvesle W, Garcia N. 2000. Nitrogen uptake by phytoplankton in a coastal front area of the northwestern Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, 25(3-4), 227-239. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(00\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(00)00014-3)
- Ribera d'Alcalà, M, Civitarese G, Conversano F, Lazzari P. 2003. Nutrient ratios and fluxes hint at overlooked processes in the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 108(C9). <https://doi.org/10.1029/2002JC001650>
- Roether W, Well R. 2001. The eastern Mediterranean transient: Evidence for recent changes in Aegean Sea deep water formation. *Ocean Science*, 17(2), 145-153. <https://doi.org/10.1029/1999JC000002>
- Skliris N, Zika JD, Herold L, Josey SA, Struglia MV. 2018. Mediterranean Sea water budget long-term variability in observations and CMIP5 simulations. *Climate Dynamics*, 51(3), 1049-1066. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3239-2>
- Sparnocchia S, Picco P, Bozzano R. 1999. Seasonal variability of water mass properties in the Ligurian Sea inferred from long time series observations. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(12), 1979-2001. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00036-6).
- Tsimplis MN, Shaw AGP, Flather RA, Woolf DK. 2006. The influence of the North Atlantic Oscillation on sea level in the Mediterranean and the relation with the Mediterranean Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 33(21). <https://doi.org/10.1029/2006GL027915>

Zervakis V, Drakopoulos PG, Georgopoulos D. 2000. The role of the North Aegean in triggering the Eastern Mediterranean Transient. *Journal of Geophysical Research*, 105(C11), 26103-26116. <https://doi.org/10.1029/2000JC900131>