

Primjena računalnih programa za simulaciju kretanja uljnog onečišćenja

Caro, Edin

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:925439>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

EDIN CARO

**PRIMJENA RAČUNALNIH PROGRAMA ZA SIMULACIJU
KRETANJA ULJNOG ONEČIŠĆENJA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**PRIMJENA RAČUNALNIH PROGRAMA ZA SIMULACIJU
KRETANJA ULJNOG ONEČIŠĆENJA
USE OF COMPUTER PROGRAMS TO SIMULATE THE
SPREADING OF OIL POLLUTION**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Tehnologija uklanjanja onečišćenja mora

Mentor: Doc. dr. sc. Đani Šabalja

Student/studentica: Edin Caro

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112063508

Rijeka, rujan 2022.

Student: Edin Caro

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG:0112063508

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom Primjena računalnih programa za simulaciju kretanja uljnog onečišćenja izradio samostalno pod mentorstvom Doc. Dr. sc. Đani Šabalja.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Edin Caro

Student: Edin Caro

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112063508

IZJAVA STUDENTA – AUTORA O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG
RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima Creative Commons licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor



SAŽETAK

Izlijevanjem ulja na moru dolazi do promjene u okolišu poput negativnih bioloških utjecaja i negativnih utjecaja na ekonomiju i turizam zbog različitih procesa koji se događaju pri onečišćenju mora s uljem. Iz tog razloga treba spriječiti širenje ulja koje se izlije na površinu, koristeći brane i sakupljače, a kasnije ostatke ulja treba odstraniti s vodene površine i obale. Obzirom da je samo vježbanje uklanjanja uljnog onečišćenja na moru zahtjevno, stvoreni su modeli za predviđanje kretanja uljnog onečišćenja. Jedna od najučinkovitijih računalnih simulacija za kretanje uljnog onečišćenja je PISCES II koja se pokazala kao dosta precizna simulacija ako su joj poznati svi parametri koja se koristi za pripremanje plana intervencija za sprječavanje onečišćenja mora od iznenadnog izlijevanja ulja.

Ključne riječi: model, onečišćenje, predviđanje, simulacija, ulje.

SUMMARY

Oil spill at sea causes significant changes to the environment such as negative biological impacts and negative impacts on the economy and tourism due to various processes that occur when the sea is polluted with oil. For this reason, it is necessary to prevent the spread of oil on the sea surface which can be done using dams and „skimmers“. After stopping the spread, it is necessary to collect the remains of oil both at the water surface and the shore. Considering that practice of oil pollution removal is demanding, models have been created to predict the movement of oil pollution. One of the most effective computer simulations for predicting the movement of oil slicks is PISCES II, which has proven to be a fairly accurate simulation, if all required information is given, that is used to prepare intervention plans to prevent sea pollution from sudden oil spills.

Keywords: model, oil, pollution, prediction, simulation.

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	1
1.4. ZNANSTVENE METODE	1
1.5. STRUKTURA RADA.....	1
2. OSNOVNA SVOJSTVA ULJA I NJIHOV UTJECAJ NA OKOLIŠ	3
2.1. BIOLOŠKI UTJECAJ	4
2.2. UTJECAJ NA EKONOMIJU I TURIZAM	6
2.3. PROCESI KOJI SLIJEDE NAKON IZLJEVANJA ULJA	8
3. SPRJEČAVANJE ŠIRENJA I ODSTRANJIVANJE ULJA S VODENE POVRŠINE	11
3.1. SPRJEČAVANJE ŠIRENJA ULJA NA VODENIM POVRŠINAMA	12
3.1.1. <i>Brane</i>	13
3.1.2. <i>Sakupljači</i>	14
3.2. ODSTRANJIVANJE ULJA S VODENE POVRŠINE I OBALE	16
3.2.1. <i>Odstranjivanje s vodene površine</i>	17
3.2.2. <i>Odstranjivanje s obale</i>	21
4. MODELIRANJE IZLJEVANJA NAFTE	25
4.1. MODELI ZA PREDVIĐANJE KRETANJE ULJNOG ONEČIŠĆENJA I NJIHOVA SVOJSTVA	26
4.1.1. <i>GNOME</i>	28
4.1.2. <i>OILMAP</i>	29
4.1.3. <i>CDOG</i>	30
4.1.4. <i>MOTHY</i>	30
4.1.5. <i>OpenOil</i>	31
4.1.6. <i>MEDSLIK-II</i>	31

4.2. RAČUNALNI PROGRAM PISCES II – PRIMJER SIMULACIJE	32
5. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA	44
POPIS SLIKA.....	46

1. UVOD

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Problem istraživanja je mogu li računalni programi za simulaciju kretanja uljnog onečišćenja morem pridonijeti u vježbanju i reagiranju na stvarne probleme prilikom istjecanja ulja. Predmet istraživanja su računalne simulacije, njihov napredak u modernom svijetu, te njihovo korištenje. Objekt istraživanja je ulje, njegova štetnost, njegovo uklanjanje te predviđanje njegovog kretanja, kao i računalne simulacije koje to omogućuju.

1.2. RADNA HIPOTEZA

Obzirom na predmet istraživanja omogućena je radna hipoteza o tome koliko pomažu računalni programi u problemu istjecanja ulja obzirom na napredak tehnologije, te može li se s određenom točnošću predvidjeti kretanje uljnog onečišćenja korištenjem spomenutih programa.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha i cilj istraživanja je definirati koliko je istjecanje ulja štetno i kome šteti, kako se uklanjaju naftne mrlje, te može li se njihovo kretanje predvidjeti pomoću određenih, trenutno dostupnih, programa ili simulacija kako bi se poboljšalo vrijeme i efikasnost reagiranja u slučaju iznenadnih onečišćenja mora uljima.

1.4. ZNANSTVENE METODE

U ovom radu koristiti će se induktivna i deduktivna metoda, metoda analize i sinteze, metoda deskripcije, metoda studija slučaja, te metoda kompilacije

1.5. STRUKTURA RADA

Uvodni dio sadrži problematiku, predmet i objekte istraživanja, radnu hipotezu, svrhu i ciljeve istraživanja, te znanstvene metode koje su se koristile prilikom istraživanja. Drugi dio rada odnosi se na svojstva ulja i njihov utjecaj na morski okoliš kao i djelatnosti na moru. Treći dio sadrži načine sprječavanja uljnog onečišćenja i njegovo otklanjanje kada se dogodi. Četvrti dio objašnjava razne računalne simulacije za kretanje uljnog onečišćenja, te se posebno opisuje jedna od njih, njena svojstva, karakteristike, način rada i primjere na kojima

se koristila. Posljednji dio je zaključak u kojem se daje osvrt na cjelokupni rad, te se donose odgovori na pitanja navedena u radnoj hipotezi.

2. OSNOVNA SVOJSTVA ULJA I NJIHOV UTJECAJ NA OKOLIŠ

Ulje ima puno različitih definicija. U svijetu je ulje „opći izraz koji se upotrebljava za označavanje velikog broja prirodnih supstancija biljnog, životinjskog ili mineralnog porijekla, kao i čitav niz sintetskih spojeva.“¹ U pomorstvu je ulje ustvari nafta u bilo kojem obliku uključujući sirovu naftu, tekuće gorivo, talog, otpatke ulja i rafinirane proizvode. Plan intervencije kod iznenadnih onečišćenja mora uljima definira ulja kao „sva postojana mineralna ulja, kao što su sirova nafta i njeni derivati, te talozi i otpadna ulja definirana Međunarodnom konvencijom o sprječavanju zagađivanja mora s brodova, bez obzira na to prevoze li se kao teret ili kao zalihe goriva i maziva“²

Ako se uzme u obzir definicija nafte, tada se ulje sastoji primarno od spojeva ugljikovodika, te može biti u krutom (asfalt), tekućem (maziva ulja, ulja za loženje) i plinovitom stanju. Elementi koji čine naftu su 98% vodik i ugljik dok su ostali sastojci nafte derivati ugljikovodika koji sadrže sumpor, dušik, kisik, mineralne soli. Sirova nafta se razlikuje u fizikalnim i kemijskim svojstvima, a to svojstva razno utječu na okoliš kada nafta počne istjecati. Glavne fizikalne značajke koje utječu na ponašanje bilo kojeg uljnog izljevaju su:

- Gustoća
- Površinska napetost
- Viskoznost
- Krutište
- Plamište
- Topljivost.

Specifična težina ulja je odnos gustoće ulja i gustoće čiste vode. Čista voda ima gustoću 1, dok morska voda ima gustoću 1,025. Budući da je ulje lakše od vode, ima specifičnu težinu manju od 1. Ta težina izražava se kao skala gustoće API . API je kratica od „American Petroleum Institute“ kojom se označavaju norme u naftnoj industriji, a dobije se formulom:

$$API = \left(\frac{141,5}{\text{Specifična Težina}} \right) - 131,5$$

¹ Dorčić, I.: Osnove čišćenja uljnih zagađenja, Zagreb p.3.

² Plan intervencije - <https://mmpi.gov.hr/more-86/zastita-jadrana-103/plan-intervencija-kod-iznenadnih-oneciscenja-mora/15349>

Sirova nafta obično ima API masu između 5 i 30 stupnjeva, dok benzini imaju API oko 60 stupnjeva. Što je veći API to je nafta manje gustoće, a što je on manji, to je nafta gušća.

Gustoća je odnos neke supstance prema njegovom volumenu. Pa tako gustoća ulja djeluje na to kako dolazi do disperzije u vodi. Većina ulja, obzirom da im je gustoća manja od vode, plivaju na morskog površini, ali kako im kroz vrijeme hlape pojedine frakcije tako im raste gustoća pa mogu potonuti.

Destilacijske značajke ulja opisuju njegovu sposobnost za isparavanjem. Ako se ulju podiže temperatura, njegove različite sastavnice dosežu stupanj pri kojem isparavaju i tako prelaze u destilat.

Viskoznost je mjera unutrašnjeg trenja između slojeva tekućine u gibanju na točno određenoj temperaturi. Dakle promjena viskoznosti događa se zbog promjene temperature i izražava se indeksom viskoznosti. Što je viša temperatura to je viša i viskoznost. Kod uljnog izljeva viskoznost utječe na širenje mrlje, njenu ljepljivost, prodiranje u tlo, te na mogućnost uklanjanja ulja s površine.

Krutište nekog ulja je temperatura na kojoj ono postaje polučvrsto ili „plastično“ i ne može teći³. Krutište ulja varira od 32 do -57 stupnjeva. Što su ulja lakša, odnosno što im je manja gustoća, to im je niže i krutište. Što se tiče istjecanja ulja i utjecaja naftne mrlje na obalu i čišćenje. Krutište je jedno od najvažnijih svojstava koje treba poznavati o određenoj vrsti ulja obzirom da tekuća ulja brže prodiru u niže slojeve tla, a polučvrsta ulja će ostati na površini ukoliko nije previsoka temperatura okoline.

Plamište je temperatura na kojoj se uljne pare zapale kada se izlože otvorenom plamenu ili izvoru topline. Prilikom čišćenja treba posebnu pozornost obratiti na primjerice benzine koji se mogu zapaliti u gotovo svim atmosferskim uvjetima kada se razliju.

Topljivost je sposobnost ulja da se otapa u određenom otapalu, primjerice u vodi. Otapanje ulja u vodi je vrlo slabo, ali je jedan od najvažnijih procesa što se tiče toksičnosti za vodene organizme.

2.1. BIOLOŠKI UTJECAJ

Uljno izlivanje negativno utječe na život u moru bilo to fizikalno (fizičko zatrovanje i pare) ili kemijski (otrovno djelovanje i akumulacija koja vodi do onečišćenja). Glavnu

³ Dorčić, I.: Osnove čišćenja uljnih zagađenja, Zagreb p.5.

prijetnju ostataka izlivenog ulja, živim organizmima predstavlja opasnost zbog ispuštenih para.

U slučajevima većih onečišćenja, zbog fizičkog prekrivanja obale, mogu nastupiti uginuća zbog nemogućnosti hranidbe, disanja i gibanja kako životinja tako i biljaka. Najugroženije su biljke i životinje koje dolaze u fizički kontakt s onečišćenom morskou površinom uključujući morske sisavce, gmazove, ptice, te morski život na obalama. Učinci izljevanja nafte dakle ovise o nizu čimbenika uključujući količinu i vrstu izlivenene nafte i način na koji ona djeluje na morski okoliš.

Prevladavajući vremenski uvjeti također će utjecati na fizičke karakteristike ulja i njegovo ponašanje. Ostali ključni čimbenici uključuju biološke i ekološke značajke područja poput ekološkog značaja ključnih vrsta i njihova osjetljivost na zagađenje uljem kao i doba godine. Važno je napomenuti i kako tehnike čišćenja također utječu na okoliš.

Veliki problem predstavlja fizičko gušenje organizama uzrokovane od strane teških ulja jer utječe na sposobnost organizama da nastavi kritične životne funkcije. Kemijska toksičnost je također problem jer se lakše kemijske komponente apsorbiraju u organima, tkivima i stanicama, te mogu imati čak i smrtonosne toksične učinke.

Ekološke promjene koje se dešavaju gubitkom ključnih organizama mogu utjecati na cijelu ekološku zajednicu jer iako se prirodno organizmi zamjenjuju drugima koji obavljaju slične funkcije, često se dešava i da se zamjenjuju organizmima koji obavljaju potpuno drugačije funkcije čime se mijenja dinamika ekosustava.



Slika 1 - Zauljena ptica

Izvor: <https://edition.cnn.com/2021/10/05/us/oil-spills-wildlife/index.html>

Otrovnost neke tvari se izražava kao vrijeme i koncentracija potrebna za izazivanje određenog stupnja onečišćenja. U uljima se većina otrovnih tvari topi u vodi, ali brzo isparavaju nakon izlivanja nafte. Stoga su otrovne tvari, iako smrtonosne, u dosta malim količinama. Najugroženije životinje i biljke što se tiče otrovnosti su one koje žive u područjima gdje je slabija izmjena vodenih masa. Otrovnost ima veliki utjecaj na razmnožavanje, rast, hranidbu i obavljaju drugih životinjskih funkcija, a u velikim količinama može imati za posljedicu i smrt. Obzirom da svi morski organizmi u svojim tijelima prirodno skupljaju tvari iz morske vode u malim koncentracijama, tako mogu i skupiti štetne elemente nastale od topljivosti ulja u morskoj vodi.

Također ako se ljudi hrane tim morskim životinjama koje mogu sakupljati ulja kao što su primjerice školjke, onda otrovnost ulja može imati i štetan utjecaj na čovjeka i njegovo zdravlje.

Istraživanja i detaljne studije⁴ pokazuju da čak i velika izlivanja nafte rijetko uzrokuju trajne posljedice. To je iz razloga što morski ekosustavi imaju veliku prirodnu varijabilnost i podložni su promjenjivim ekološkim pojavama poput klimatskih promjena i antropogenim pritiscima.

Morski organizmi imaju različite stupnjeve prirodne otpornosti na pritiske koji utječu na njihova staništa. Ova prirodna varijabilnost znači da je malo vjerojatno da će se postići točni uvjeti prije izlivanja pa je zbog toga teško predvidjeti točnu točku oporavka nakon izlivanja nafte i vrijeme koje će biti potrebno kako bi se ekosustav vratio u početno stanje. Zbog toga je općenito prihvaćeno da se oporavak postiže kada se uspostavi normalno funkcionirajuća zajednica biljaka i životinja karakterističnih za određeno stanište.

2.2. UTJECAJ NA EKONOMIJU I TURIZAM

Onečišćenje obalnih područja s visokom turističkom vrijednošću uobičajena je značajka mnogih izlivanja nafte. Osim troškova nastalih aktivnostima čišćenja, industrije i pojedinci ovisni obalnim resursima mogu pretrpjeti ozbiljne ekonomske gubitke. Obično se najveći utjecaji osjećaju u sektorima turizma i ribarstva.

⁴ <https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Papers/GardNews.pdf> (17.08.2022.)

Osim na život, istjecanje ulja može utjecati i na morske djelatnosti kao što su ribolov i marikultura. Izravno se od posljedice izlivanja ulja mogu oštetiti brodovi, oprema za ribolov ili uzgoj morskih organizama.

Plutajuća oprema i zamke koje se nalaze iznad morske površine su izloženije onečišćenjima od plutajućih ulja, dok su zaronjene mreže, vrše i konopi dobro zaštićeni ako ih se ne uzdiže na površinu vode ili ako onečišćivač nije počeo tonuti. Kada se onečisti ribolovna oprema, uobičajeno je manji ulov ribe, rakova i školjki pa je tako i smanjena djelatnost ribarenja. U to i stupanj u kojem je izgubljeno povjerenje tržišta u kvalitetu plodova mora iz pogođenih područja je također jedan od glavnih čimbenika.

Kako bi se olakšao postupak naknade štete nakon izlivanja, potrebne su rigorozni znanstveni pristupi jer je teško izdvojiti učinke izlivanja od drugih čimbenika poput pretjeranog ribarenja i industrijskog onečišćenja. Stoga je potrebno napraviti usporedbu oporavka nakon izlivanja sa statusom ribolova prije izlivanja.

Osim morskih djelatnosti, velike gubitke snosi i turizam ako se uljna mrlja približi obali turističkih zemalja. Prekid rekreacijskih aktivnosti poput plivanja, vožnje čamcem, pećanje i ronjenje uzrokovani naftom zagađenih obala obično su kratkotrajni i nastavak normalne aktivnosti se očekuje nakon što se očiste obale. Štetniji gospodarski učinci nastaju zbog javne percepcije koja može ostati dugo nakon onečišćenja.

Tako su se posljedice nakon onečišćenja izazvanog od platforme „Deepwater Horizon“ ispred Meksičkog zaljeva mogle osjetiti 2010. godine. Naime analize od strane organizacije „Oceana“ objavljene u informativnom listu pokazale su kako je turizam značajno opao nakon izlivanja, čak i u susjednim zaljevskim državama koje su uglavnom bile bez ulja na svojim plažama. Hoteli i restorani imali su poteškoća s rezervacijama i internetska pretraživanja pokazala su značajan pad turističkog interesa u regiji. Potrošnja posjetitelja samo u Louisiani pala je za 247 milijuna dolara u 2010. godini.⁵ To je utjecalo na prijevoznike tvrtke, nacionalne parkove i tvrtke koje su ovisne o turizmu.

U ovakvim slučajevima dobro je organizirati strategiju regionalnog oglašavanja i promotivnih kampanja radi suzbijanja degradacije imidža pogođenog područja zbog negativnog publiciteta. Povratak normalnoj trgovini za turistički sektor dakle zahtjeva ne samo učinkoviti program čišćenja, već i strategiju za vraćanje ugleda i privlačnosti potencijalnim turistima.

⁵ <https://www.surfrider.org/coastal-blog/entry/tourism-and-oil-spills-dont-mix> (19.08.2022)



Slika 2 – Uljno onečišćenje na plaži

Izvor: <https://www.conservation-strategy.org/news/fisheries-management-area-research-impact-oil-spills-tourism-economy-fma-711>

2.3. PROCESI KOJI SLIJEDE NAKON IZLJEVANJA ULJA

Razliveno ulje sa sobom donosi niz posljedica na morski okoliš svojim djelovanjem. Ulje obzirom na svoja fizička i kemijska svojstva može stvarati procese poput:

- Isparavanja
- Otapanja
- Disperzije
- Emulgiranje
- Taloženje
- Biološka razgradnja
- Širenje

Isparavanje je prvi proces koji se događa nekoliko sati nakon izlivanja, a posljedica su hlapive frakcije koje se gube u atmosferi. Brzina isparavanja ovisi o vrsti ulja, brzini vjetra i temperaturi morskog okoliša. Većina sirovih nafti isparavanjem gubi do 40% volumena, teška pogonska ulja pokazuju male gubitke isparavanjem, dok lagani rafinirani proizvodi poput benzina i laganog dizela isparavaju u potpunosti. Isparavanjem se smanjuje volumen, zapaljivost i toksičnost, ali se povećava viskoznost i gustoća ostataka.

Gubitci nastali od otapanja ulja su relativno mali jer je većina ugljikovodika iz nafte slabo topljiva u morskoj vodi i proces je razmjerno dug.

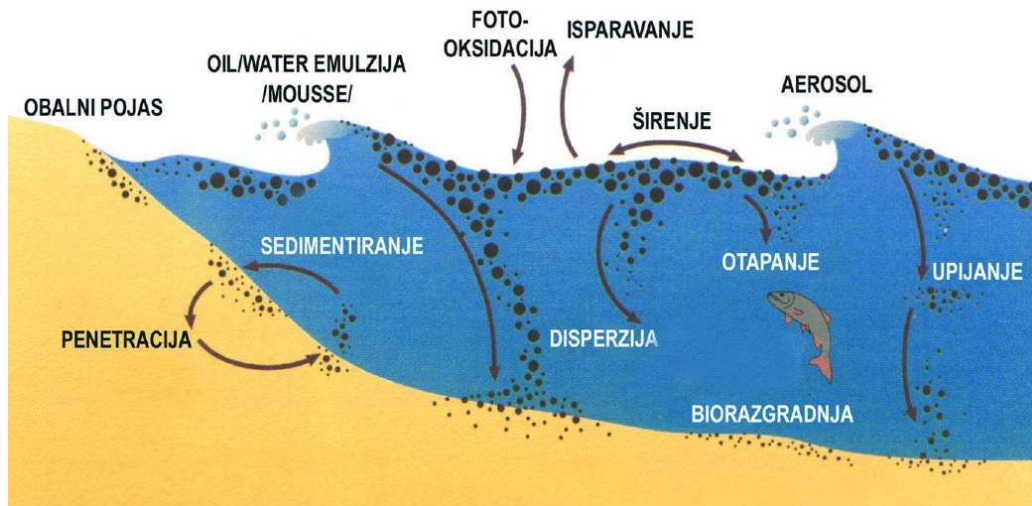
Raspršivanje (disperzija) je proces kojem je izloženo izliveno ulje, a posljedica je mehaničkog djelovanja mora i vjetra. U ovom procesu valovi i turbulencija razbijaju ulje u kapljice čime manje kapljice ostaju u suspenziji, a veće kapljice se ponovno dižu na površinu. Brzina disperzije ovisi o vrsti ulja i stanju mora odnosno brzini vjetra, te se može povećati primjenom kemijskih disperzanata na tekućem, odnosno plivajućem ulju.

Emulgiranje se često očituje u fenomenu stvaranja tzv. „čokoladne pjenice“. Ta pjenica sadrži vodu i do 90% tako da se ukupni volumen materijala kojeg treba ukloniti povećava i raste mu viskoznost.

Taloženje nastaje kao posljedica starenja, uslijed čega dolazi do povećanja gustoće izlivenog ulja. Neki teški rafinirani tonovi u moru niskog saliniteta ili slatkoj vodi, dok većina ulja ne tone u moru. Dodavanje suspendiranih krutih čestica u „izvjetreno“ ulje potpomaže potapanje ulja. Na uzgon ulja može utjecati i temperatura, dok na pješčanim plažama ulje može akumulirati velike količine pijeska.

Biološka razgradnja se dešava redovito i može imati veliki utjecaj na razgradnju ulja. Stupanj razgradnje Brojne bakterije, gljivice i kvasci prisutni u morskom okolišu mogu biološki razgraditi ugljikovodike, a brzina razgradnje ovisi o faktorima poput sastava ulja, kontaktne površine ulja i vode, prisutnost mikroorganizama, rasprostranjenost ulja, raspršivanje ulja, količini hranjivih tvari, kisiku. Lakše komponente se brže biološki razgrađuju.

Širenje ulja jedan je od najznačajnijih procesa u ranom stadiju uljnog izlivanja. Glavna pokretačka sila koja utječe na početno širenje ulja je njegova masa. Veliki uljni izljev se širi puno brže od izljeva koji nastaje sporijim izlivanjem. Težinu koja djeluje na kretanje uljnog izljeva zamjenjuje djelovanje površinske napetosti, a na brzinu širenja izravno utječe parametar viskoznosti.



Slika 3 - Procesi kroz koje prolazi ulje

Izvor: Jadranski edukativno - istraživački centar za reagiranja na iznenadna onečišćenja mora

3. SPRJEČAVANJE ŠIRENJA I ODSTRANJIVANJE ULJA S VODENE POVRŠINE

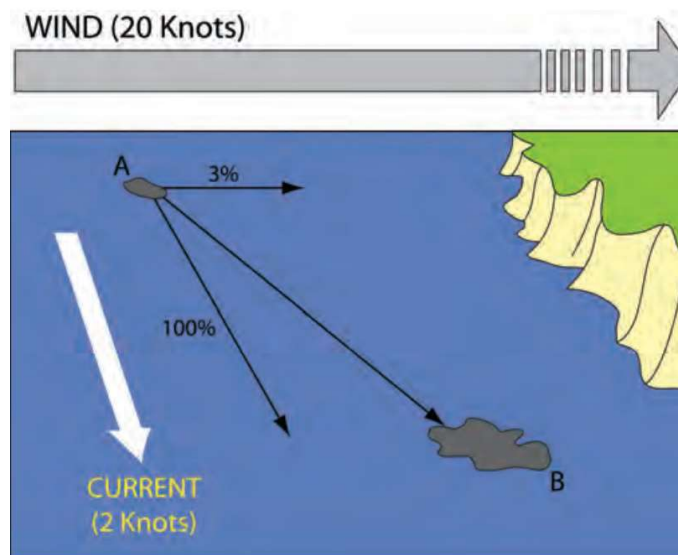
Kretanje ulja na vodenoj površini ovisi o površinskoj dinamici morske vode. Intenzitet širenja ovisit će o djelovanju valova, morskih struja, morskih mijena i vjetra. Širenje ulja po površini vode dešava se i bez utjecaja vanjskih čimbenika, a razlog tomu je gravitacija i površinska napetost vode i ulja. Kako se s vremenom mrlja širi u sve tanji sloj, gravitacija igra sve manju ulogu u nastavljanju procesa širenja.

Daljnje širenje mrlje ne ovisi o debljini uljnog filma, već tada ovisi o površinskoj napetosti između ulja i vode. „Prema tome je površinska napetost dominantna sila koja utječe na širenje mrlje u odsutnosti vanjskih faktora kao što su vjetar i struje. Glavne sile koje zaustavljaju ili ograničavaju proces širenja su viskoznost ulja i inercija.“⁶ Nakon razlijevanja ulja, na širenje i razgradnju utječe stanje mora uključujući vjetar, struje, plimu i oseku, dubinu i valove.

Vjetar je faktor koji utječe na brzinu pomicanja ulja oko 3% u smjeru puhanja. Također utječe na visinu, period i oblik valova. To znači kako jači vjetar uzrokuje stvaranje viših valova, kao i širih valova a to utječe na stupanj i isparavanje ulja, širenje i oblik uljne mrlje, na mogućnost upotrebe određenih uređaja i opreme za čišćenje ulja, te može stvoriti emulziju u vodi.

Veći utjecaj od vjetra, na kretanje uljne mrlje, ima morska struja koja može čak i raspršiti uljnu mrlju. Površinske struje pomiču ulje u smjeru struje i prilikom računanja kretanja uljne mrlje, morska struja je najvažniji faktor za predviđanje njenog kretanja, te se kod računanja kretanja uz 3% od smjera vjetra uzima 100% od smjera morske struje za predviđanje površinskog širenja ulja.

⁶ Dorčić, I.: Osnove čišćenja uljnih zagađenja, Zagreb p.8.



Slika 4 - Brzina širenja uljen mrlje

Izvor:

https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_1_Aerial_Observation_of_Marine_Oil_Spills.pdf

Prije nego se počne s odstranjivanjem uljne mrlje s površine vode, treba se spriječiti njeno širenje, pa se tako svaka akcija i kontrola sakupljanja i čišćenja ulja sadrži od faze sprječavanja širenja i od faze odstranjivanja ulja s vodene površine.

3.1. SPRJEČAVANJE ŠIRENJA ULJA NA VODENIM POVRŠINAMA

Sprječavanje širenja ulja na vodenim površinama je postupak u kojem se nastoji zaustaviti širenje uljne mrlje u određenom području u kojem je došlo do izljeva. Što se prije zaustavi širenje, lakše će biti odstraniti ulje s vodene površine iz samog razloga što je tada prostor zahvaćen uljnom mrljom manji.

Pažljivo planiranje je neophodno za učinkovitu pripremu za izlivanje ulja. „Mjere za sprječavanje se mogu poduzeti čak i prije samog izljeva, što je i tamo gdje postoji potencijalna opasnost od samog izlivanja razvijanjem strategije i operativnog plana. Proces izrade plana za nepredviđene situacije utvrđuje uloge i odgovornost, prioritete za zaštitu, učinkovite strategije odgovora i operativne procedure bez dodatnog pritiska stvarnog incidenta izlivanja.

Dobro uvježban plan za nepredviđene situacije promiče obučeno i uvježbano osoblje i maksimalno povećava spremnost organizacija i pojedinaca uključenih u akciju uklajnjanja

onečišćenja.⁷ Nakon pokretanja reakcije na izlijevanje ulja, važno je kontinuirano planirati, voditi operacije i pratiti njihovu učinkovitost, te se sukladno učinkovitosti prilagođavati situaciji. Za planiranje je važan zračni nadzor kojim se može utvrditi opseg i priroda incidenta u ranoj fazi, a nakon pokretanje reakcije na naftnu mrlju, zračni nadzor se može koristiti za praćenje i procjenu učinkovitosti operacije.

Zadržavanje plutajućeg ulja unutar brana i prikupljanje pomoću specijaliziranih prikupljača (eng. Skimmera) često se smatra idealnim rješenjem za izlijevanje u more jer je to cilj fizičkog uklanjanja ulja iz morskog okoliša. Kao rezultat toga, to je primarna strategija reagiranja na uljno onečišćenje na moru koju su usvojile mnoge vlade diljem svijeta.

3.1.1. Brane

Brane su sredstva za ograđivanje vodene površine radi sprječavanja daljnjeg širenja uljne mrlje. Mogu djelovati u vodoravnom, okomitom ili kosom smjeru, odnosno djeluju kako površinski tako i dubinski. Brane dijelimo na plivajuće i upijajuće. Plivajuće brane izgledaju kao zavjese koje, postavljene u vodu, okružuju uljnu mrlju i sprječavaju njeno širenje.

Konstruktivski je brana izvedena tako da u vodi zadržava okomiti položaj i u tom položaju jednim dijelom pluta iznad vode, a drugim dijelom visi okomito ispod površine vode. Najčešće se koriste za okruživanje uljne mrlje, pa se laganim sužavanjem smanjuje površina i povećava debljina sloja ulja. Može se koristiti i za preventivnu zaštitu posebno ugroženih područja poput luka, naftnih terminala, turističkih obala, biološki osjetljivih područja, te za skretanje ulja iz područja jakih struja u područja gdje se može lakše odstranjivati uljnu mrlju.

Plivajuća brana, da bi bila djelotvorna mora slijediti kretanje valova tako da njezin gornji dio ne dođe ispod površine mrlje, a donji rub ne smije doći iznad mrlje. Utjecaj brane naravno jako ovisi o stanju mora, prvenstveno o valovima.

Plivajuće brane sastoje se od četiri elementa: plovnog tijela (nadvodni dio) koji sprječava širenje uljne mrlje po vodenoj površini, podvodne zavjese koja sprječava prolaz ulja ispod površine vode, uzdužnog pojačanja poput lanca i čeličnog užeta koji služi za pojačavanje mehaničkog otpora brane, te utega za održavanje okomitog položaja podvodne zavjese.

⁷ <https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Papers/iosc2001.pdf> (19.08.2022)

Plovna tijela koja brana sadrži sastoje se od plastične pjene, drva, pluta, zraka ili ugljičnog dioksida. Veću prednost pri transportu imaju brane koje se pune plinovima, dok su brane s krutim plovnim tijelima u nadvodnom dijelu sigurnije u eksploataciji. Podvodne zavjese također mogu biti različito konstruirane, te je vrlo važno do koje dubine zavjesa prodire u vodu jer dublja zavjesa zadržava veću količinu ulja. To je moguće samo u mirnim vodama jer djelovanjem morske struje i pod pritiskom valova, dublja zavjesa ima veći pritisak pa će se pomicati u smjeru sile i tako propuštati ulje „što ima velikog utjecaja obzirom da se samo oko 1/10 uljne mrlje nalazi iznad vodene linije, a oko 9/10 nalazi se ispod površine, dakle vrlo slično santi leda.“⁸



Slika 5 - Plutajuća brana u "U" obliku

Izvor: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/containment-recovery/>

3.1.2. Sakupljači

Sakupljači ulja ili „Skimmeri“ su uređaji namijenjeni za prikupljanje ulja s površine mora. Optimalni dizajn „skimmera“ ovisi o viskoznosti ulja kojeg treba izvući i uvjetima mora. Budući da „skimmeri“ plutaju na površini vode, suočavaju se s istim vremenskim poteškoćama kao i brane. Svaka vrsta „skimmera“ ima svoje karakteristike i ograničenja u radu s čimbenicima kao što su viskoznost, stanje mora i krhotine. Najjednostavniji

⁸Dorčić, I.: Osnove čišćenja uljnih zagađenja, Zagreb p.31.

„skimmeri“ su usisni uređaji koji uklanjaju ulje s vodene površine izravno ili preko brane. Ove konstrukcije imaju tendenciju pokupiti puno vode u isto vrijeme kad i ulje, osim ako rade u vrlo mirnim uvjetima. Složenije jedinice oslanjaju se na prijanjanje ulja na metal, plastične diskove ili oleofilne trake ili užad.

Drugi koriste sustave četkica ili su dizajnirani za stvaranje vrtloga radi koncentriranja i povrata ulja.⁹ Kada počnu raditi, mogu prikupljati ulje velikom brzinom pa je jednako važno imati na raspolaganju i odgovarajuće privremene objekte za skladištenje ulja. Prikadne jedinice za skladištenje uključuju teglenice i prijenosne spremnike koji se mogu postaviti na brodove. Plutajući otpad može ugroziti učinkovitost „skimmera“.

Tamo gdje su krhotine uobičajene, primjerice u blizini urbanih područja ili riječnih ušća, „skimmeri“ će možda trebati mreže za sakupljanje smeća i redovito deblokiranje. Također će im trebati kontinuirano održavanje od strane tehničara i opskrba rezervnim dijelovima. Nakon završetka prikupljanja treba ih se očistiti i pripremiti za korištenje u sljedećem izlivanju. Obzirom na praktične izazove upravljanja i koordinacije višestrukih plovila za rukovanje na moru u uvjetima koji nisu idealni, izgrađena su specijalna plovila koja koriste bumove (krakove za skretanje) i „skimmere“.

Jedna od vrsti „skimmera“ su „Weir skimmeri“ koji su čvrsti, izdržljivi, plutajući i usisni, te su prikladni za korištenje na oceanima, u rijekama, lukama i marinama. To su „skimmeri“ velikog kapaciteta koji se proizvode lokalno u Australiji i koriste drugačiju metodu od „klasičnih“. „Weir skimmeri“ plutaju bliže površinskoj uljnoj mrlji gdje pregrada skuplja naftu dok još uvijek dopušta protok vode.

Neki „skimmeri“ za brane koriste sustava plutanja koji sadrži četiri ravnomjerno raspoređena plovka koji pomažu brani da se prilagodi promjenjivim razinama vode. Osim drugačijeg načina izvedbe, ovakva vrsta „skimmera“ može se spojiti na pumpu ili vakumski sustav za brzo odvajanje i uklanjanje plutajućeg ulja.

⁹https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/TIPS_TAPS_new/TIP_5_Use_of_Skimmers_in_Oil_Pollution_Response.pdf (19.08.2022)



Slika 6 - Skimmer za uklanjanje nafte

Izvor: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/containment-recovery/>

3.2. ODSTRANJIVANJE ULJA S VODENE POVRŠINE I OBALE

Prilikom odstranjivanja ulja s vodene površine postoji niz opcija za reakciju na uljnu mrlju, a dijelimo ih u tri strategije: zadržavanje i obnavljanje, „in situ“ spaljivanje i primjena disperzanata. Odabir najprikladnije strategije ovisit će o mnogim čimbenicima, uključujući raspoložive resurse za reagiranje na izlijevanje, nacionalne i lokalne propise o reagiranju na izlijevanje nafte, scenarij izlijevanja te fizičke i ekološke značajke područja zahvaćenog izlijevanjem.

Većina izlijevanja ulja s brodova događa se blizu obale i, kao rezultat toga, mnoga izlijevanja rezultiraju onečišćenjem obala. Ulje koje se nasukalo na obalu može uzrokovati značajne utjecaje na okoliš i gospodarstvo te može uvelike odrediti političku i javnu percepciju razmjera incidenta, kao i prevelike troškove.¹⁰

Kada ulje ipak dospije do obale, može biti potreban znatan napor za čišćenje zahvaćenih područja. Stoga je bitno da sveobuhvatni i dobro uvježbani aranžmani za čišćenje obale budu uključeni u planove za nepredviđene situacije. Tehnike koje su dostupne za čišćenje obale relativno su jednostavne i obično ne zahtijevaju specijaliziranu opremu.

¹⁰<https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/> (19.08.2022)

Međutim, neprikladne tehnike i loša organizacija mogu pogoršati utjecaje uzrokovane samim uljem.

3.2.1. Odstranjivanje s vodene površine

Postoje razni načini i metode uklanjanja ulja s vodene površine koje svrstavamo u četiri grupe:

- Mehaničke metode
- Fizikalno kemijske metode
- Kemijske metode
- Mikrobiološke metode

Prema pravilima operacija čišćenja mora, odstranjivanje ulja bi trebalo ići ovim redoslijedom.

Mehaničke metode sastoje se od ručnog odstranjivanja koristeći kante, lopate i slično oruđe, a to zahtijeva veliki broj ljudi i ogroman radni napor i često je kod manjih izljeva ulja, dok se kod većih izljeva koriste prethodno spomenuti „skimmeri“.

Fizikalno kemijske metode uključuju upotrebu sredstava koja će spriječiti ulje u daljem širenju bez mijenjanja konstitucije ulja uključujući agense za potapanje, za koncentriranje i za apsorbaciju.

Agensi za potapanje su teški materijali koji kada se miješaju s uljem na morskoj površini tonu i tako povlače za sobom ulje što je u priobalnim zonama neprihvatljivo.

Agensi za koncentriranje koriste se kada je uklanjanje ispuštanjem nemoguće zbog oštećenja tankera pa je bolja opcija skrutiti ulje u tankovima da bi se spriječilo zagađenje. Ovi agensi zahtijevaju miješanje s uljem kako bi se postigla želatina, ali je sam proces jako skup pa se ne koristi.

Agensi za apsorbaciju se najviše koriste jer daju najbolje rezultate, te im je primjena sigurna, djelotvorna i bezopasna za okolinu. Absorbenti su materijali koji upijaju i zadržavaju ga pa ga je lakše skupiti u neku mrežu ili ga hvatačima odstraniti s vodene površine. Absorbente dijelimo u tri grupe: prirodni materijali, hidrofazni absorbenti mineralnog sastava i sintetski organski hidrofazni absorbenti. Ovi su agensi jako uspješni i prilikom sanacije uljnih izljeva na obali.

Kemijske metode uključuju korištenje disperzanata i emulgatora, te „in-situ“ spaljivanje.

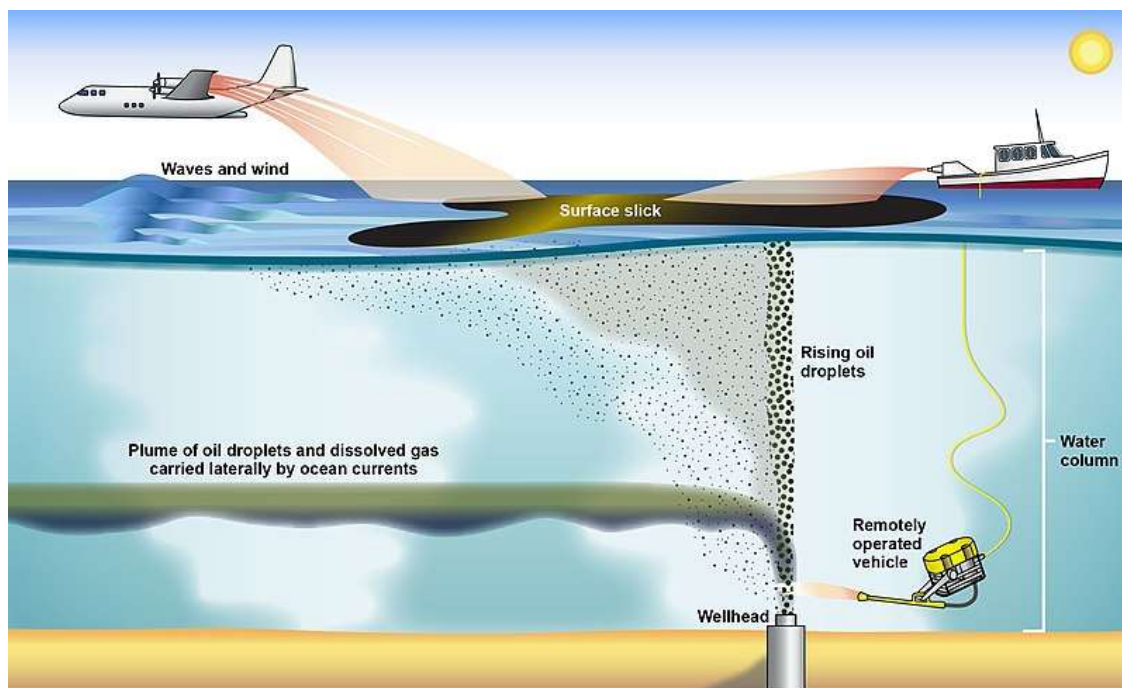
Kemijski disperzanti su proizvodi namijenjeni ubrzavanju prirodne disperzije ulja u moru. Oni pomažu u razbijanju površinske uljne mrlje na male kapljice koje se široko dispergiraju u vodeni stupac.

Prednosti kod upotrebe disperzanata su to što se mogu primjenjivati u svim uvjetima valova i struja, kao i u određenim uvjetima vjetra, te su uvijek djelotvorni u određenom postotku u borbi s uljnim zagađenjem. Raspršivanjem disperzanta na ulje koje pliva smanjuje se obljepljivanje ptica i vodenih organizama, koji su pričvršćeni za litoralni sloj obale uljima. Imaju tendenciju sprječavanja fotooksidacije ulja u otrovne perokside i kiseline, te smanjuju opasnost od požara kada se u ulju nalaze lako hlapljivi ugljikovodici. Raspršivanje disperzanata na ulje dok se još nalazi na vodi znatno smanjuje zagađivanje obale.¹¹ Uz to su i najbrža metoda koja sprječava formiranje emulzija, te ne zahtjeva skladišni prostor i daljnji tretman. Prilikom rada s disperzantima pojavljuju se dva osnovna problema, a to su postizanje točno određenog omjera miješanja disperzanta i ulja, i svođenje toksičnosti za morski život na minimum. Unošenje disperzanata u sloj ulja i njihovo miješanje uvjetovano je stiništem i viskoznošću.

Disperzanti mogu biti vrlo djelotvorni kada se tretira manja količina ulja, ali se na velikim i debljim naslagama dobri efekti postižu vrlo teško s obzirom na poteškoće postizavanja povoljnih omjera miješanja, teškoća u vezi s prodiranjem disperzanata u sloj ulja, te naknadnog miješanja.¹²

¹¹ Dorčić, I.: Osnove čišćenja uljnih zagađenja, Zagreb p.78.

¹² Ibidem p.80.



Source: GAO review and analysis of scientific literature. | GAO-22-104153

Slika 7 - Upotreba disperzanata

Izvor: <https://www.gao.gov/products/gao-22-104153>

„*In situ*“ spaljivanje, odnosno spaljivanje na licu mjesta je naziv za spaljivanje plutajuće nafte u moru, na mjestu izlijevanja ili blizu njega. Kako bi došlo do spaljivanja, ulje mora biti koncentrirano i primijenjen izvor paljenja. Spaljivanjem ulja u idealnim uvjetima se može otkloniti relativno velika količina ulja s površine mora ali odluka o spaljivanju mora se donijeti obzirno. Vatra i potencijalno otrovni dim koji nastaju mogu utjecati na ljudsko zdravlje, pa je ova tehnika uklanjanja onečišćenja ulja prikladnija za korištenje na moru ili izvan naseljenih područja.

U arktičkim je regijama primjerice velika zabrinutost zbog mogućeg utjecaja na brzinu otapanja leda. Jako je važno stanje ulja prilikom spaljivanja, jer kako ulje stari tako može izgubiti svoje lakše frakcije isparavanjem i može početi stvarati emulziju. Oba procesa mogu otežati paljenje i gorenje ulja pa odluku o spaljivanju treba donijeti prilikom procesa planiranja reakcije za iznenadno izlijevanje ulja.

Kako bi spaljivanje bilo uspješno, sloj ulja mora biti debeo najmanje 2-3 mm kako bi se suprotstavilo rashladnom utjecaju morske vode i vjetrova, te kako bi održao izvor goriva za vatru. Ako se ulje širi velikom brzinom, prvo bi je trebalo ograditi određenim barijerama poput protupožarnih brana ili prirodnim putem uz obalu ili ledene ploče. Sam proces paljenja može se započeti pomoću raznih uređaja poput krpe natopljene dizelom ili bacačem plamena

iz helikoptera koji je jedan od najsigurnijih načina paljenja ako je osoba za to trenirana, ali treba napomenuti kako uređaj i iskustvo nisu dostupni u većini država.

Nakon što se ulje zapali, valovito more ili nedovoljna temperatura ulja mogu požar prekinuti, ali kako mrlja postaje sve tanja zbog paljenja požar će se ionako ugasi zbog utjecaja vjetrova i mora. Nakon paljenja nastaje problem sa ostacima ulja koji mogu potonuti i tako biti otrovni za pridnene morske vrste.¹³



Slika 8 - "In situ" paljenje ulja

Izvor: <https://www.elastec.com/products/floating-boom-barriers/fire-resistant-oil-boom/>

Mikrobiološke metode uključuju *bioremedijaciju*. Bioremedijacija sadrži niz postupaka kojima je cilj ubrzati mikrobiološku razgradnju ulja. Dijelimo je na biostimulaciju i bioaugmentaciju. *Biostimulacija* je proces dodavanja hranjivih tvari (umjetnih gnojiva koja sadrže dušik i fosfor) razlivenom ulju (na obali ili na zemlji, ne na moru), dok je *bioaugmentacija* proces dodavanja posebno selektiranih mikroba za pospješivanje razgradnje ulja.

U stvarnosti postoji vrlo malo potrebe za dodavanjem selektiranih mikroba u ekosustave zagađene uljem. Potreban je veliki metabolički potencijal za rješavanje raznolikog niza kemikalija u sirovoj nafti, a čak i kada bi to bilo izvedivo, održavanje tih gena bilo bi vrlo teško u prirodnom okruženju jer se takvi mikrobi teško mogu natjecati s prirodnom mikroflorom. Obzirom da biorazgradnja nafte unutar morskog okoliša nije ograničena na mikrobe i bioaugmentaciju, daljnji razvoj sredstava za bioremedijaciju koja

¹³ <https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Papers/newdir.pdf>, str.7 (20.08.2022)

kao jedini aktivni sastojak sadrži mikrobe i bakterije koje razgrađuju ulje je teško opravdati. Stoga je bolja opcija biostimulacija i dodavanje nutrijenata.

Prilikom procesa biostimulacije, najveći problem je dostupnost hranjivih tvari, ali primjerice gnojidba dušikom i fosforom se pokazalo kao dobra protumjera protiv izlivanja ulja u more. Kako bi se optimizirala isporuka hranjivih tvari, razvijene su oleofilne formulacije hranjivih tvari na granici ulja i vode gdje i dolazi do biorazgradnje što je i dokazano na popločanim plažama koje su zagađene na Aljasci kao posljedica izlivanja ulja iz broda „Exxon Valdes“. Međutim potrebna su dodatna istraživanja čimbenika koji kontroliraju mehanizme djelovanja jer nije dokazano da je biostimulacija učinkovita u svim uvjetima. Neuspjeh se uglavnom pripisuje brzom gubitku hranjivih tvari i akutnim toksičnim odgovorima prirodne mikroflore na ulje.¹⁴

Kontrolirane studije sugeriraju da bi se optimalne stope razgradnje mogle održati zadržavanjem visokih, netoksičnih, obnovljivih koncentracija hranjivih tvari. Izvedivost dodavanja anorganskih hranjivih tvari na periodičnoj osnovi dokazana je u terenskim ispitivanjima kao način održavanja povišenih koncentracija hranjivih tvari unutar sedimentata za učinkovitu bioremedijaciju. Prednosti anorganskih poljoprivrednih gnojiva kao sredstava za bioremedijaciju uključuju nisku cijenu, dostupnost i jednostavnost primjene.

3.2.2. Odstranjivanje s obale

Odabir najprikladnijih tehnika čišćenja zahtijeva brzu procjenu stupnja i vrste onečišćenja, zajedno s duljinom, prirodom i pristupačnošću zahvaćene obale. Gdje je to moguće, važno je započeti s uklanjanjem ulja s onečišćenih obala što je prije moguće. Kako vrijeme bude prolazilo i ulje će se čvršće zalijepiti za stijene i morske zidove te se može pomiješati ili zakopati u sedimentima.

Operacije čišćenja ulja s obale mogu se podijeliti u tri faze: 1. faza je uklanjanje velikih nakupina naplavljenog tekućeg ili polu-tekućeg, pokretnog ulja kako bi se spriječila mobilizacija. 2. faza je uklanjanje nepokretnog ulja, fiksiranog na obali i najdugotrajnija je faza pri čišćenju nafte s obale. 3. faza je završno čišćenje malih zaostalih nakupina ulja i završno čišćenje.

¹⁴ Lee K., 2000, *In situ bioremediation of oiled shoreline environments*, Opportunities for Environmental Applications of Marine Bioetchnology, str.4 (46)

Ovisno o prirodi kontaminacije, napredovanje kroz svaku od ovih faza možda neće biti potrebno. Također će se morati uzeti u obzir ekološka osjetljivost obale kako bi se osiguralo da planirana razina čišćenja neće prouzročiti veću štetu od ostavljanja ulja na mjestu. Iskustvo iz mnogih incidenata pokazalo je da je najskuplja i najdugotrajnija komponenta cjelokupnog odgovora na izlivanje ulja obrada ili odlaganje prikupljenog otpada. Kao rezultat toga, odabrana strategija čišćenja trebala bi imati za cilj minimiziranje proizvedenog otpada. Za mnoge tipove obale i scenarije reakcije, uklanjanje svih tragova ulja bit će izuzetno teško ili nepreporučljivo zbog zabrinutosti za okoliš, zdravlje i sigurnost. Važno je da kriteriji za odlučivanje kada je određeno mjesto rada dovoljno čisto da se dopusti prekid radova. Postoji široki raspon tehnika koje su dostupne za čišćenje pogođene obale, ali mnoge od njih mogu biti prikladne samo za jednu od spomenutih faza ili vrsti obale.

Tijekom 1. faze koriste se vakuumske kamioni, vakuumske pumpe i „skimmeri“ ako je ulje još dovoljno tekuće. Za vrlo gustu, emulgiranu ili mekani sediment natopljen naftom koristi se mehaničko prikupljanje uz pomoć lopata i kanti, te ostalih nespecijaliziranih građevinskih ili poljoprivrednih strojeva za prikupljanje i uklanjanje nafte i kontaminiranog materijala.

U 2. fazi čišćenja može se koristiti tehnika ispiranja pomoću vode pod niskim pritiskom za ispiranje nasukane ili zakopane nafte s obale. U ovoj fazi veliku pomoć daju valovi koji prirodno oslobađaju naftu iz obalnog sedimenta.¹⁵

Tijekom zadnje faze čišćenja obale, mogu se primijeniti druge tehnike kako bi se dovršilo čišćenje uključujući visokotlačno pranje vrućom ili hladnom vodom na tvrdim površinama i čišćenje strojevima na šljunčanim obalama poput miješalica za beton. Najčešće je ograničen pristup stjenovitim ili popločanim obalama pa je jedina opcija rulno brisanje za aktivno uklanjanje ulja. U određenim okolnostima može se razmotriti i upotreba proizvoda za prethodno objašnjenu bioremedijaciju.

Veoma važnu ulogu pri određivanju tehnike za čišćenje obale ima i sama obala. Postoje tri važna čimbenika u razmatranju čišćenja određene vrste obale: razina korištenja sadržaja, osjetljivost okoliša i izloženost obale prirodnom čišćenju.

Luke, pristaništa, morske obrane i slične građevine koje je napravio čovjek obično su u područjima s velikom upotrebom sadržaja, te su izgrađene od betona ili sličnih materijala i slabo su osjetljive na okoliš. Tehnike čišćenja za ovu vrstu obale mogu koristiti visokotlačno pranje ili ispiranje s prioritetom visoke razine uklanjanja ulja. Prirodne tvrde

¹⁵ <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/shoreline-clean-up-and-response/> (20.08.2022)

površine, poput kamene podloge ili gromada, mogu se očistiti metodama sličnim onima koje je napravio čovjek. Međutim, prirodna obala često ima veću ekološku osjetljivost i izloženost valovima. Slijedom toga, aktivnosti čišćenja moraju voditi računa o smanjenju utjecaja na faunu i floru, a prekid aktivnog čišćenja treba uzeti u obzir prirodni potencijal čišćenja.

Obale od šljunka su jedne od onih koje je najteže očistiti jer ulje može prodrijeti u prostore između kamenja pa je mehaničko sakupljanje problematično. Kod ovakvih vrsta plaža su se najučinkovitije pokazale tehnike ispiranja i pranja valovima kao i mehaničko pranje.

Pješčane plaže su plaže koje je najlakše očistiti jer je prodiranje nafte ograničeno, međutim nafta se može zakopati zbog utjecaja plime ili valova. Na ovoj vrsti obale treba biti oprezan sa svim tehnikama kako bi se izbjeglo uklanjanje čistog pijeska s plaže što može uzrokovati probleme s erozijom.¹⁶

Najteže obale za očistiti su muljevite obale jer su osjetljive na fizička oštećenja uzrokovana operacijama čišćenja i često imaju visoku ekološku osjetljivost stoga je dosta česta praksa puštanja ulja koji dospije na ovu vrstu obale da se ukloni prirodnim putem, a tamo gdje to nije moguće je najbolja opcija ispiranje i ručno čišćenje obale.

¹⁶ Ibidem



Slika 9 - Mehaničko čišćenje ulja na obali

Izvor: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/how-manage-damage-oil-spills>

Učinkovito upravljanje resursima uključenim u čišćenje obale ključno je za uspjeh operacije. Pri odlučivanju koje će se tehnike čišćenja koristiti, upravljački tim mora uzeti u obzir interese svih koji se bave različitim lokalnim korištenjem morskog okoliša uključujući rekreaciju, turizam, ribarstvo, industriju i očuvanje mora.

Pravilna organizacija radne snage i aktivnosti na obali također je ključna kako bi se čišćenje provelo na najsigurniji i najučinkovitiji mogući način te kako bi se izbjegli nepotrebni štetni utjecaji na okoliš.

Uspješnom upravljanju i organizaciji čišćenja obale može uvelike pomoći dobro osmišljen plan za iznenadne situacije koji uključuje visok stupanj lokalnog znanja i koji su pripremile one agencije i organizacije koji bi mogli biti uključeni u reagiranje na obali.

4. MODELIRANJE IZLIJEVANJA NAFTE

Kako bi se pravovremeno reagiralo na istjecanje ulja i sprječavanje daljnjeg istjecanja, odnosno uklanjanje uljne mrlje, uvelike pomaže predviđanje smjera i brzine kretanja uljne mrlje.

U tu je svrhu razvijen niz modela za simulaciju procesa trošenja i predviđanja sudbine nafte nakon što se izlije, te se koriste računalni programi koji matematičkim modelima predviđaju kretanje i sudbinu uljne mrlje.

Modeli izlijevanja nafte su alati koji mogu predvidjeti putanju izlijevanja, procijeniti vrijeme koje je potrebno da izlijevanje dosegne određena područja i procijeniti stanje uljne mrlje kada dođe na modelirana mjesta. Modeli slijede niz različitih pristupa. Mogu se kretati od jednostavnog vektorskog izračuna do sofisticiranih računalnih modela kretanja i distribucije nafte u tri dimenzije, zajedno s predviđanjima promjene svojstava kako ulje stari.

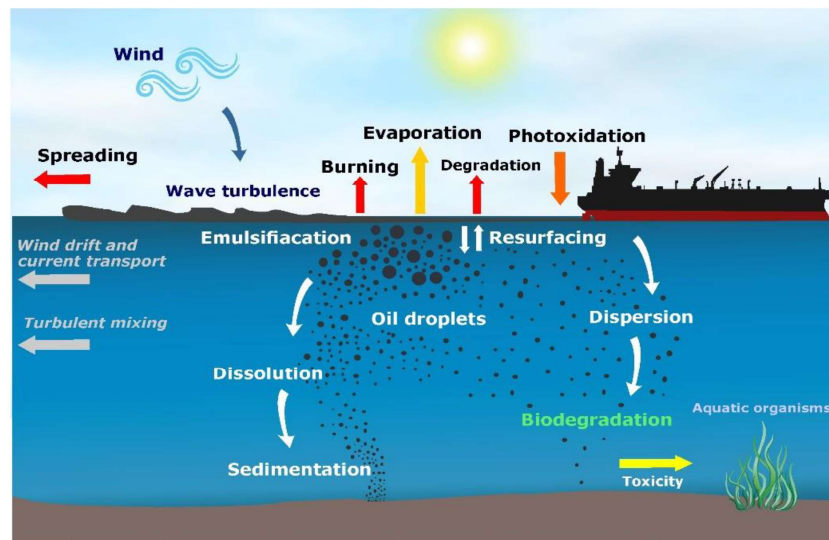
Za modeliranje nafte najvažniji ulazni parametri uključuju vrstu i količinu prolivene nafte, zajedno s brzinom ispuštanja. Ključni ulazni podatci o okolišu za predviđanje putanje i procjena vremena su stvari koje zahtijevaju točnost poput podataka o vjetrovima strujama i valovima u širem području izlijevanja nafte. Procjena stanja uljne mrlje pri dolasku na određeno područje je pitanje koje zahtjeva razumijevanje i pouzdane algoritme trošenja ulja u procesima.

Moderni modeli kombiniraju najnovije informacije o ulju kako bi odredili gdje će se ulje širiti i u kakvom stanju će biti kada dođe na određenu lokaciju. Modeli se naširoko koriste za planiranje u nepredviđenim okolnostima gdje mogu biti osobito korisni donositeljima odluka. Modeliranjem niza najvjerojatnijih scenarija izlijevanja ulja mogu se donijeti odluke o odgovarajućim mjerama odgovora i strateškim lokacijama za skladištenje opreme i materijala. Lokacije za koje se pokazalo da su najranjivije mogu se identificirati, logistika reakcije na tim lokacijama proučena i oprema za odgovor postavljena u skladu s tim.

Obuka za reakciju na izlijevanje još je jedna aktivnost koja koristi modele izlijevanja nafte kako bi polaznicima omogućila da reagiraju na simulirane scenarije izlijevanja u različitim okolnostima. Najveći problem tih programa je nedostatak točnog predviđanja sile morske struje i vjetra i to će vjerojatno biti problem i u budućnosti s ovim modelima. Osim što mogu predvidjeti kretanje, određeni modeli mogu predvidjeti i količinu isparavanja, mogućnost emulgiranja, količinu koja se rasprši prirodnim putem, te količinu koja će doći

do obale. „Vlasti mogu koristiti modele izljevanja nafte za planiranje u nepredviđenim okolnostima i kao hitni odgovor na krizu koja dolazi zbog slučajnog ispuštanja ulja. Takvo planiranje u kombinaciji s modelom izljevanja može dovesti do dubljeg razumijevanja učinka nafte i procese trošenja nafte kako na površini tako i u dubini, te tako doći do poboljšanih metoda za praćenje i čišćenje.“¹⁷

Važno je imati na umu da modeli imaju svoja ograničenja i nisu zamjena za stvarna opažanja.



Slika 10 – Čimbenici i procesi ulja u moru

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Main-transport-and-weathering-processes-OWPs-affecting-the-oil-spill_fig1_349282028

4.1. MODELI ZA PREDVIĐANJE KRETANJE ULJNOG ONEČIŠĆENJA I NJIHOVA SVOJSTVA

Općenito se modeli izlijevanja mogu podijeliti na dvije vrste: Eulerove i Lagrangeove. Prvi se pristup bavi jednadžbama očuvanja mase i količine gibanja koje se primjenjuju na uljne mrlje, te ilustriranjem širenje nafte i opisuje kretanje kroz morske struje i vjetar. Drugi pristup opisuje naftne mrlje kao veliki broj čestica koje su stvorene rezultatom vjetrova, valova i morski struja i prenose se disperzijom.

¹⁷ Karamea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G., 2021. Oil spill modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges., Laboratory of Ecological Engineering and Technology., Xanthi, Grčka

Za brze simulacije su prikladniji Lagrangeovi modeli kada dođe do izlivanja ulja, te su učinkovitiji i isplativiji od Eulerovih pristupa. „Preciznost položaja čestica ovisi o preciznosti njihovog početnog položaja, o kapacitetu spojenih meteoceanskih modela, te o uključivanju odgovarajućih fizikalnih mehanizama poduzimanjem radnji za praćenje čestica.“¹⁸

Za predviđanje širenja naftne mrlje nisu dovoljni samo podatci o vrsti nafte i početnoj lokaciji nego su potrebni i podatci poput trodimenzionalnog polja strujanja, temperatura mora, salinitet, gustoća. Ovi podatci mogu se dobiti iz različitih operativnih oceanografskih prognostičkih sustava poput NOAA (Nacionalna uprava za oceane i atmosferu), te CMEMS (Usluge praćenja morskog okoliša programa Copernicus).

Najsuvremeniji modeli izlivanja ulja koriste se ne samo za predviđanje izlivanja nafte, već i za procjenu dvosmislenosti prognoza što je i ključno za korisne i isplative odgovore. Nesigurnost proizlazi najčešće iz pogrešaka u ulaznim poljima poput početnih uvjeta, i predviđanju meteoroloških i oceanoloških modela. Zbog toga je ASTM (Američko društvo za ispitivanje i materijale) uspostavilo standard za modele izlivanja ulja koji zahtijevaju procjene nesigurnosti za putanju izlivanja ulja, ali metodologija za neizvjesnost procjena nije dobro utemeljena i modelima izlivanja ulja i potrebna su dodatna buduća istraživanja.

Unatoč tome postoje modeli koji imaju određeni kredibilitet te se koriste do određene granice. Neki od najkorištenijih modela koji mogu predvidjeti širenje i sudbinu uljne mrlje su:

- GNOME
- OILMAP
- CDOG
- MOTHY
- OpenOil
- MEDSLIK-II

¹⁸ Ibidem

		CDOG	GNOME	OILMAPDEEP	SIMAP	OILMAP	TAMOC	OSCAR	MOTHY	OILTOX	POSEIDON-OSM	MEDSLIK	MEDSLIK-II	OILTRANS	OSERIT	MOHID	BLOSOM	OPENOIL	DELFT3D-PART		
General features	Open-source code		✓																		
	Fate/weathering model		✓																		
	Lagrangian model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Transport model		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Near field plume	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Far field transition	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Surface oil model		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Blowout/buoyant plume model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Back-tracking option		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Stochastic component		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Random walk scheme for diffusion	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Oil database		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Bathymetric data		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Response support		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Environmental impact		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Injury assessment		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Oil transport and weathering processes	Research	✓																			
	Advection		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Spreading		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Diffusion	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Beaching		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Natural dispersion and entrainment		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Evaporation		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Emulsification		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Dissolution		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Sedimentation (OSA)		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Biodegradation		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Wind drift		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Vertical turbulent mixing		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Resurfacing		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Stokes drift																				
Photo-oxidation																					

Slika 11 - Značajke pojedinih modela za praćenje ulja

Izvor: Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges

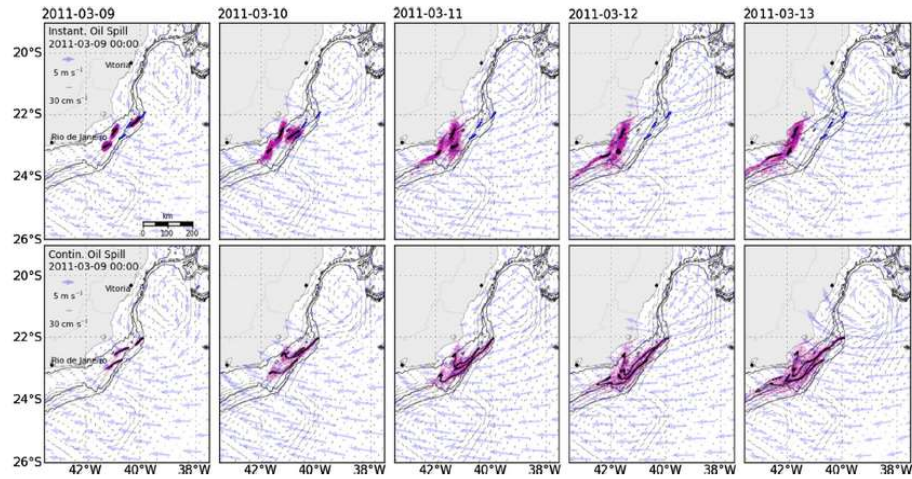
4.1.1. GNOME

GNOME je model izlivanja ulja koji predviđa sudbinu i prijenos zagađivača i kretanja ulja uzrokovano vjetrovima, morskom strujom, plimom i osekom. Razvijen je od strane Hazardous Materials Response Division¹⁹ i model je otvorenog koda koji je besplatno dostupan za javno korištenje od strane šire akademske zajednice i zajednice za odgovor i planiranje izlivanja ulja. Pruža 3D transporte čestica i sposoban je raditi sa gotovo svim hidrodinamičkim modelima. Koristi Runge - Kutta algoritam s porastom brzina kapljica ovisno o veličini i gustoći kapljice, površinski transport vjetra koji je nasumično podesiv s različitim vrijednostima koje odabire korisnik, „backtracking“, te algoritam za trošenje ulja iz ADIOS naftne baze podataka koja se konstantno ažurira.

Također nudi i interakciju ulja s ledom temeljnoj na koncentraciji i brzini kretanja leda, kao i interakciju s obalom. Jedna od stavki koje čine GNOME jako vrijednim modelom je i integrirani kalkulator odgovora koji služi za procjenu učinkovitosti sustava za odgovor na

¹⁹ Inovativni sistemi istreniranih tehničara i specijalne opreme za pomaganje u slučaju incidenata s opasnim materijalima. U Americi podijeljni na regije.

izlijevanje kao što je obrada, spaljivanje i primjenjivanje kemijskog sredstva za raspršivanje. GNOME se koristi kao podrška reakcije na izlijevanje u Sjedinjenim američkim državama gotovo 20 godina.

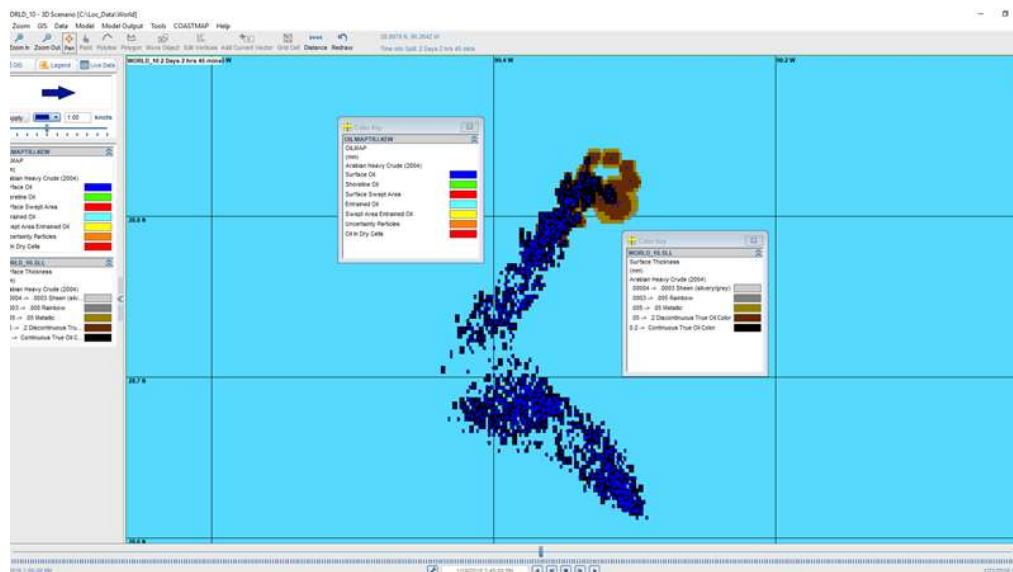


Slika 12 - GNOME - proces praćenja ulja kroz 5 dana

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Oil-spill-locations-of-a-GNOME-simulation-using-five-days-of-forecast-data-Upper-panel_fig4_307078999

4.1.2. OILMAP

OILMAP je model razvijen od ASA i SIMPAP-a, a oboje dijele iste baze koda. To je 3D model odgovora na izlijevanje ulja i planiranja za nepredviđene situacije. Bavi se površinskim i podzemnim ispuštanjem ugljikovodika i pruža algoritme za širenje ulja, isparavanje, emulgiranje i kontakt nafte s obalom kao i s ledom. Koristi stohastički modul koji predviđa veliki broj putanja s jednog mjesta kako bi izradio statistiku vjerojatnosti. Model je primijenjen u Dubaiju i regiji zaljeva 2006. godine, a njime se primarno služi OSRL (Oil Spill Response Limited) u Ujedinjenom kraljevstvu te se konstantno ažurira i u vrijeme pisanja ovog rada koristi verziju 7.2.



Slika 13 - Glavno sučelje OilMap modela

Izvor: <https://www.rpsgroup.com/services/oceans-and-coastal/modelling/products/oilmap/>

4.1.3. CDOG

CDOG je sveobuhvatni, trodimenzionalni model nafte i plina kojeg je razvio Yapa, a modificirala ga je Zheng²⁰. Simulira aspekt nafte i plina ispuštenih u nesrećama u dubokoj vodi. Više je baziran na ispuštanju plina pa tako koristi procese stvaranja i dezintegracije hidrata, otapanje plina, neidealno ponašanje i potencijalno odvajanje svojstava plina pomoću jakih poprečnih struja. Uključuje fluktuaciju ambijentalnih struja, stratifikaciju gustoće, saliniteta i temperature vode. Iako se koristi za potrebe reakcije na izlivenu naftu ili plin, njegov primarni cilj je istraživanje te su ga nedavno počele koristiti organizacije američke vlade (MMS i NOAA), te naftne tvrtke.

4.1.4. MOTHY

MOTHY je 3D Lagrangeov model koji predviđa sudbinu i transport uljne mrlje na površini oceana koji je razvio MeteoFrance. Koristi se od 1994. godine i korišten je u stvarnim slučajevima izljeva nafte. Mješoviti sloj izražen je kombinacijom modela plitke vode u odnosu na atmosferski tlak i vjetar i modela turbulentne viskoznosti. Za hidrodinamiku koristi CMEMS (Copernicus Marine Service) i MFC (Komisija za morsko

²⁰ Poojitha D. Yapa je profesor inženjstva građevinarstva i zaštite okoliša na privatnom sveučilištu Clarkson u New Yorku

Elise Li Zheng je studentica na fakultetu za znanost i inženjstvo u Georgiji

ribarstvo) modele koje je osigurao Europski centar za vremenske prognoze. Ovaj model pruža i neke dodatne kapacitete poput nasukavanja, taloženja i backtrackinga dok kao zagađivače može koristiti ulje ili plutajuće objekte.

4.1.5. OpenOil

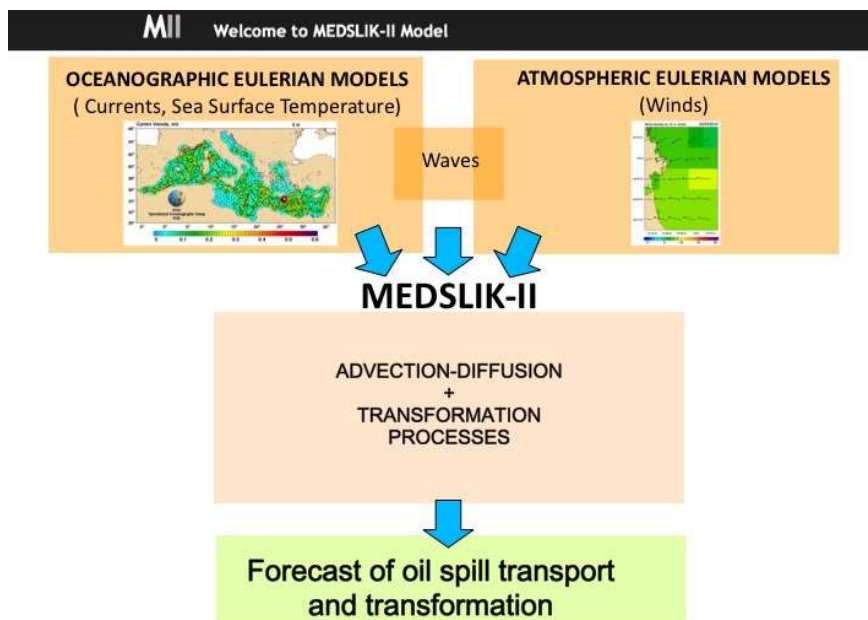
OpenOil je model koji je operativno implementiran u Norveškoj kao model za nepredviđene slučajeve izlivanja ulja, ali se koristi i za traganje i spašavanje u Sjevernom moru. Norveška vlada koristi vlastite meteorološke modele kao podršku za prognozu izlivanja ulja s OpenOilom. Također, ako je potrebno se služi CMEMS-om za hidrodinamiku i stanje oceana i NOAA-om za polja udara vjetra. Model integrira algoritme s nekoliko fizičkih procesa poput okomitog miješanja zbog oceanske turbulencije, uvlačenje ulja valovima, izranjanje nafte na površinu zbog uzgona, emulgiranje. Za svojstva o različitim vrstima ulja također, kao i GNOME koristi ADIOS bazu podataka o ulju koji sadrži gotovo 1000 vrsta ulja iz različitih dijelova svijeta.

4.1.6. MEDSLIK-II

MEDISLIK-II je model izlivanja ulja dizajniran za prognozu širenja i trošenja naftne mrlje koji koristi Lagrangeove formule zajedno sa Eulerovim modelom cirkulacije oceana, te može predviđati kretanje nafte mrlje pod utjecajem morske struje i vjetra. Potrebni podatci za definiranje početnih uvjeta moraju uključivati lokaciju izlivanja ulja, vremensku i površinsku pokrivenost izlivanja, stopu i trajanje izlivanja, vrstu i starost izlivanja ulja od početnog izlivanja u more.

Za parametrizaciju koristi eksperimentalni Jonswap valni spektar u smislu brzine vjetra i dohvata. Svi ovi podatci mogu se jednostavno uključiti u programu putem satelitskih nadzornih sustava. Osim podataka o izlivanju ulja, kako bi program radio pouzdano, potrebne su mu i pouzdane informacije o vjetru, temperaturi i tridimenzionalna mapa morskih struja. Program je usko vezan uz podatke o atmosferskim poljima koja su dostupna od strane ECMWF (Europskog centra za srednjoročne vremenske prognoze) i s oceanografskim poljima (struje, temperature, gustoće i salinitet) koje pruža CMEMS. MEDSLIK-II sa svim potrebnim podacima računa razvoj svojstva ulja i položaj raspršene površine nafte na moru i obali.

Osim toga izračunava i masu komponenti ulja, a s obzirom na vrijeme pruža i učinkovito praćenje procesa trošenja ulja. Model se koristio u „in situ“ paljenju, te raznim zanimljivim primjenama u mediteranskoj regiji dopuštajući i podršku REMPEC-u za hitne slučajeve izlivanja ulja u cijelom mediteranskom bazenu.



Slika 14 - Proces MEDSLIK-II modela

Izvor: <http://medslik-ii.org/model.html>

4.2. RAČUNALNI PROGRAM PISCES II – PRIMJER SIMULACIJE

Simulacije uklanjanja onečišćenja mora napravljene su s ciljem testiranja spremnosti na onečišćenja mora. Jedna od najpoznatijih simulacija za uklanjanje onečišćenja mora je PISCES II (The Potential Incident Simulation, Control and Evaluation System) koji se koristi kao podrška programu vježbi za reakciju kojom upravlja američka obalna straža s ciljem pružanja poboljšanog okruženja za obuku.

Ovaj softver je u početku razvio Transas Marine kao alat za upravljanje vježbom za obalnu stražu SAD-a. Danas se PISCES II koristi za osposobljavanje učenika i profesionalaca koji rade za reagiranje na velike incidente izlivanja kako bi se smanjio utjecaj tog izlivanja na okoliš i lokalno gospodarstvo. Također se koristi za testiranje i razvoj odgovarajućih planova odgovora na području te za poboljšanje timskog rada i vještina donošenja odluka.

Softver PISCES II povezuje se s simulatorima mostova kako bi pružio široku paletu višenamjenske obuke za odgovor u logističkom i operativnom upravljanju raznim potencijalnim izljevima nafte u različitim geografskim regijama. To je program koji omogućava unošenje realnih meteoroloških i oceanoloških podataka i podatke o ulju, također sadrži veliku bazu u kojoj se može odabrati točno određeni tip ulja, kao i opciju odabira uređaja i materijala za uklanjanje onečišćenja. Program sudionicima vježbe pruža interaktivno informacijsko okruženje temeljeno na matematičkom modeliranju izlivanja nafte u interakciji s okolinom. Uz pomoć PISCES II programa mogu se napraviti različiti scenariji koji pomažu u treningu za stvarno onečišćenje.

Osnovna konfiguracija mu je podijeljena na radno mjesto primarnog instruktora, servera za vježbanje, glavnog servera za modeliranje, alata za konfiguraciju mreže, uslužni programi za pripremu podataka. Postoje i dodatne opcije poput dodatnog radna mjesta za instruktora, radnog mjesta za promatrača, vizualnog kanala, dodatnog servera za modeliranje, ALOHA komunikacijskog protokola, baze podataka o morskim mijenama i strujama, UAIS transponder uređaja, sučelje sustava za promet vozila, automatske kontrole, ICE uvjeta za izlivanje na ledu, vanjsko vrijeme, zajedničku vježbu, backtracking odnosno vraćanje na određeni dio scenarija, te Forecast Mode.

Značajke simulacije PISCES II odnosno njegova najbitnija stavka je vježba i arhiviranje scenarija, obzirom da jedna vježba može imati više scenarija, pa tako postoje i tri operacijska načina rada a to su priprema, ponašanje i debriefing.

Priprema služi za postavljanje scenarija i pokretanje predviđanja u svrhu taktičkog planiranja, ponašanje je način rada u kojem sudjeluju svi članovi i svaka njihova akcija se dokumentira kako bi se u posljednjem načinu rada (debriefingu) analizirale akcije. Također jedna od značajki sustava je kontrola scenarija gdje se scenarij može odviti u realnom vremenu ili čak ubrzati ili pauzirati kako bi se odredila sljedeća akcija.

Za program PISCES II ne treba imati posebnih računalnih znanja iz razloga što je program veoma sličan svim ostalim računalnim programima, jedino ga treba znati kvalitetno upotrijebiti. Osnovne stvari koje se moraju otvoriti prilikom pokretanja programa su karte i podatci. Karte nam služe za geografsko viđenje područja u kojem se dogodio incident i pokazuju se na elektronskim nautičkim kartama. Uz operacije na kartama u program se mogu dodati i podatci o okruženju poput točke izljeva, obale, vremenski uvjeti, morske struje, vjetar i zaštićena područja.

Kako bi se što bolje prikazalo izlivanje ulja, mogu se namjestiti određeni parametri poput izvora izlivanja, tip ulja, izlivena količina, vrijeme početka izlivanja i ostali

parametri ovisno o vrsti izlivanja kao što su centar uljne mrlje, područje, odnosno oblik mrlje, putanja i brzina izlivanja ovisno o vremenu.

Podatci koji su prikazani prilikom izlivanja ulja su količina izlivenog, isplivanog, isparenog, raspršenog, nasukanog, spaljenog, potopljenog i prikupljenog naftnog proizvoda. Također se prikazuje količina plutajuće i obnovljene naftne emulzije, maksimalna debljina, ukupna površina uljne mrlje. Za korisnički definirano lokalno područje prikazuju se maksimalna debljina, površina, količina plutajućeg i nasukanog ulja. Promjene koje se dogode prilikom izlivanja nafte pokazuju se u statistici i razdoblje spremanja tih podataka je podesivo.

U programu se također nalazi i jako korisna baza podataka ulja i kemikalija čiji se parametri mogu odrediti prije započinjanja scenarija, dok se tijekom scenarija može koristiti samo za očitavanje zadanih parametara ulja. Uz bazu podataka može se napraviti model i predviđanje zagađenja zraka koristeći ALOHA model koji matematički izračunava i na modelu prikazuje putanju kretanja ispušnih para nastalih na površini izlivenog produkta.

U simulaciji reakcije na izlivanje program PISCES II sadrži brojne resurse koje se mogu koristiti poput platformi za prijenos resursa na mjesto izljeva, generalne opreme, brana, skimmera, disperzanata.

Efikasnost brana i skimmera se automatski može izračunati na temelju uvjeta okoline i svojstava ulja. Korisnik može izraditi pojedinačne inačice brana, skimmera disperzanata i sustava za isporuku disperzanata kako bi pokazali različite karakteristike izvedbe.

Skimmere se može namjestiti na različite intervale, dok se brane mogu korigirati za otvoreno more i zaštićeno područje te tako prikazati drugačiji učinak obzirom na morsku struju, vjetar i općenito stanje mora.

Organizacijska stanja se mogu podijeliti na dvije grupe i to na slobodne resurse i resurse u upotrebi kojima upravlja kontrolni centar, a lista zaduženja pojedinog resursa se automatski ispravlja kada korisnik prebaci resurs između ta dva stanja.

Za resurse u upotrebi rad se izračunava automatski i moguće ga je postaviti u jedno od tri stanja (dostupno, dodijeljeno, van funkcije). Može se uređivati i hijerarhijska organizacijska struktura i dodjeljivati resurse u skladu sa strukturom koja održava postojeću organizaciju reagiranja. Razvoj cijele vježbe može koristiti različite inventare opreme uvozom iz baze podataka, te je mogućnost uvoza podataka vanjskih resursa olakšana omogućavanjem mjernih jedinica i propisa podatkovnih polja za izvoz i uvoz koje namješta operater prije prijena podataka.

Brane su simulirane kao fleksibilne barijere s mogućnošću kretanja, a njihova se propusnost ili učinkovitost izračunava ovisno o tipu brane, visinu vala i relativnoj brzini mora. U vrijeme izračuna se automatski u obzir uzima i vjetar te morska struja, a sama učinkovitost se može namjestiti i ručno ili se može postaviti na vrijednost 0 čime se simulira potpuni kvar brane. Sama propusnost određena je upijajućom količinom upijajuće brane, odnosno količinom koju brana može apsorbirati po dužini jedinice, sva upijena količina dodaje se statistici „sakupljenog“ ulja.

Skimmer uklanja plutajuće ulje u neposrednoj blizini mjesta gdje je raspoređen. Njegova stopa iskoristivosti ovisi o modelu skimmera, definiranoj produktivnosti, viskoznosti ulja i stanju mora, što se također može ručno korigirati u samome programu za poboljšanje ili pogoršanje preformansi, kao i za njegovo potpuno nefunkcioniranje.

Scenarij primjene disperzanata može se simulirati pomoću dvije metode. Prva metoda je putem dodjele rute do sustava za isporuku disperzanata napunjenog određenim disperzantom gdje se sustav kreće duž rute i primjenjuje disperzant na malome području. Veličina površine i primijenjeni dio disperzanta ovisi o širini raspršivanja i brzini primjene sustava za isporuku.

Druga metoda u svrhe treninga može koristiti pojednostavljeni scenarij gdje korisnik definira pravokutnu površinu u području vježbanja i odabire količinu i vrijeme nanošenja disperzanta. Kada scenarij dostigne vrijeme primjene, disperzant se ravnomjerno nanosi unutar područja primjene. Model ulja izračunava učinak primjene disperzanta uzimajući u obzir masu i svojstva disperzanta.

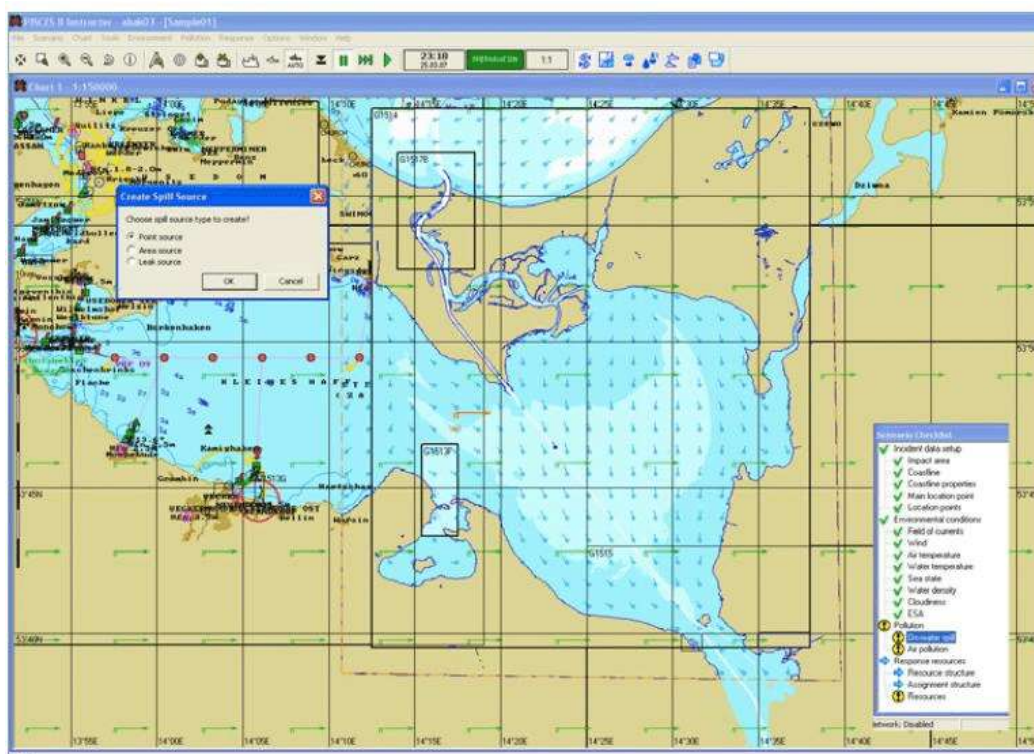
Za metodu slobodnog gorenja korisnik definira početno područje gorenja, te vrijeme paljenja. U trenutku paljenja ulje se unutar područja zapali i model izračunava proces gorenja uzimajući u obzir temperaturu vode, svojstva ulja, debljinu plutajućeg produkta i postotak vode u ulju. Za obavezno spaljivanje korisnik definira područje gorenja na krati i trajanje rada gorenja. Program automatski uklanja ulje unutar navedenog područja koje je „izgorilo“ i to brzinom izgaranja koju odredi korisnik.

Na obali se može napraviti model koji čisti ulje s obale i za kojeg se također mogu postaviti parametri ovisno o kapacitetu čistača. Zajedno s prikupljenim uljem prikuplja se i nešto zemlje pa se prilikom određivanja prikupljenog ulja u statistici program nalazi količina prikupljenog materijala (ulje + zemlja), količina prikupljenog ulja i količina preostalog ulja.

Program PISCES II prikazuje objekte dobivene od VTS i AIS izvora podataka. Resursi se mogu povezati s ciljevima i mijenjati pozicije prema podacima dobivenim od objekata, te se njihove pozicije na karti ažuriraju u skladu s time. Podatci objekata imaju IMO broj,

MMSI, pozivni znak i naziv broda. Kada se program poveže s objektom automatski se pretvara u stanje „GPS praćeno“.

Matematički model PISCES II simulira procese izlivanja ulja na površini vode uključujući širenje morskom strujom i vjetrom, isparavanje, raspršivanje, emuligranje, varijacija viskoznosti, gorenje i interakcija s branama, skimmerima i obalom (nasukanje na plažu). U matematičkom modelu uzimaju se u obzir parametri okoliša, fizikalna svojstva prolivenog ulja, svojstva izvora izlivanja i ljudska reakcija.



Slika 15 - Glavni ekran PISCES II simulatora

Izvor: Testing of a oil spill mathematical model contained in PISCES II simulator

Simulator PISCES II se koristi za predviđanje ponašanje pri širenju izlivanja ulja po površini mora, promatrajući procese koji se odvijaju tijekom interakcija između nafte, morske vode i zraka. Također simulator se koristi za koordinaciju operacija spašavanja u slučaju izlivanja nafte i obuke. Najveći utjecaj na kretanje izlivena nafte imaju meteorološki i oceanološki uvjeti.

Obzirom da je teško doći do programa, analiziran je scenarij proveden od strane Kinga Lazuga iz Sveučilišta Szczecin u Poljskoj²¹. U primjeru je navedeno kako su postavljene dvije točke promatranja, jedna na Atlanskom Oceanu, a jedna na Sjevernom moru.

U ovom scenariju promatra se utjecaj vjetra i procesi koji se odvijaju na naftnoj mrlji IFO 300 početne površine od 0,1 km² i maksimalne početne debljine od 3,3 mm u količini od 100 tona. U svakoj simulaciji vjetar je puhao u smjeru sjevera, a brzina mu je bila od 5-30 m/s.

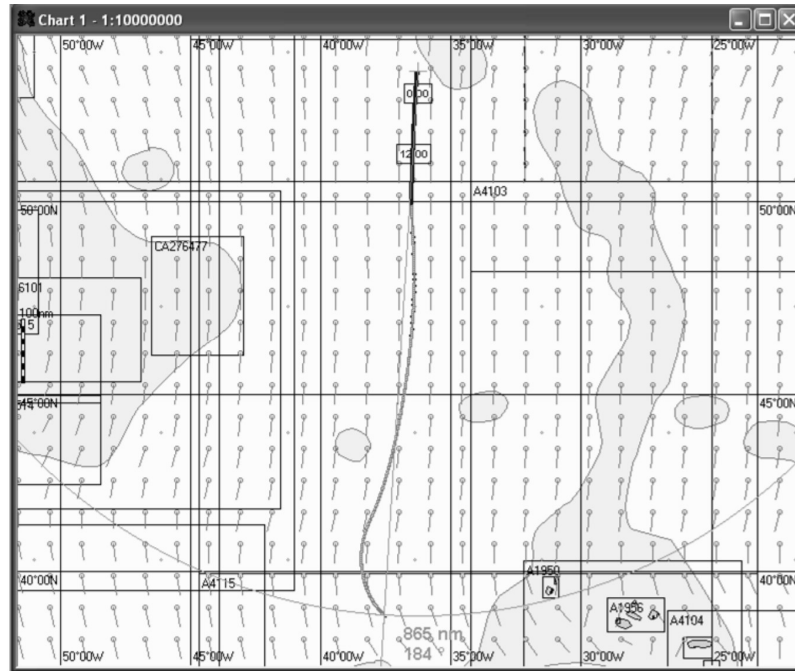
Name		Type		Group		Distillation curve	
IFO 300		<input checked="" type="checkbox"/> Refined		IV		Temperature	Fraction
Density	11.9 API					180 °C	1 %
Surface tension	37.3 dyn/cm					200 °C	2 %
Viscosity	54492 cSt					250 °C	8 %
Emulsification constant	0 %					300 °C	17 %
Maximum water content	25 %					350 °C	24 %
Pour point	-6 °C					400 °C	32 %
Flash point	100 °C					450 °C	38 %
						500 °C	41 %
						550 °C	46 %
						600 °C	56 %
						650 °C	71 %
						700 °C	82 %

Slika 16 - Primjer svojstva ulja IFO 300

Izvor: Testing of a oil spill mathematical model contained in PISCES II simulator

Na slici 16. može se vidjeti dio programa PISCES II a koji, kada se upiše vrsta ulja, izbacuje podatke o gustoći, viskoznosti, temperaturi zapaljenja, itd. Jedan od glavnih faktora u kretanju nafte na površini mora je vjetar koji utječe na brzinu i neke fizičke procese koji se dešavaju na naftnoj mrlji.

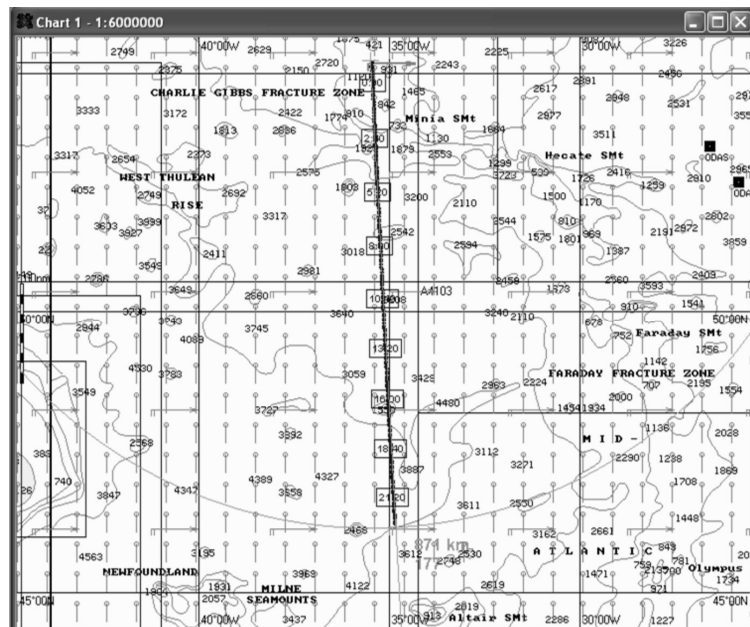
Također jedna od glavnih faktora je i morska struja, pa je tako u simulaciji na brzinu vjetra od 0 m/s stavljena brzina strujanja morske struje od 10 m/s i jedni rezultat je bio pomicanje naftne mrlje u smjeru strujanja morske struje. Valja napomenuti kako smjer strujanja morske struje ovisi i o obliku obale ukoliko naftna mrlja dođe do obale.



Slika 17 - Kretanje uljne mrlje prilikom djelovanja morske struje od 10 m/s

Izvor: Testing of a oil spill mathematical model contained in PISCES II simulator

Slika. 17 prikazuje djelovanje morske struje na naftnu mrlju. Kada se uz konstantnu morskku struju još doda i sila vjetra od 10 m/s koji puše u smjeru sjevera kao i kretanje morske struje tada je brzina kretanja nafte mrlje dodatno ubrzana što je vidljivo na slici 18.



Slika 18 - Kretanje uljne mrlje prilikom djelovanja sile morskse sturje 10m/s i djelovanja vjetra 10 m/s

Izvor: Testing of a oil spill mathematical model contained in PISCES II simulator

Smjer kretanja naftne mrlje najviše ovisi o morskoj struji, dok je za brzinu kretanja zaslužan vjetar, posebice ako se radi o evaporaciji ili disperziji nafte. Ostali faktori koji utječu na brzinu promjene fizičkog svojstva naftne mrlje su temperature vjetera i mora kao i gustoća vode.

Brod „Baltic Carrier“ se 2001. godine sudario s brodom „Tern“ na Baltičkom moru istočno od Danskog otoka Falster. Brod „Tern“ je prevezio šećer iz Kube u Latviju, dok je brod „Baltic Carrier“ prevezio 30 000 tona teškog goriva tipa 380 iz Estonije u Švedsku. Nakon sudara, gorivo iz tanka 6 je počelo curiti, a zbog loših morskih uvjeta nije se moglo kontrolirati curenje, te je uljna mrlja kretala prema Danskim otocima.

Zbog loših uvjeta jedino što se moglo je pratiti curenje iz zraka. Dan kasnije uljna mrlja stigla je do Danskih otoka Bogo, Mon i Falster te se počeo pripremati odred za skupljanje ulja na obali gdje je oko 50 km obale bilo zagađeno uljem koje je skupljalo oko 220 civila i 15 brodova. Oko 2700 tona je iscurilo a sakupljeno je oko 2135 tona s obala.

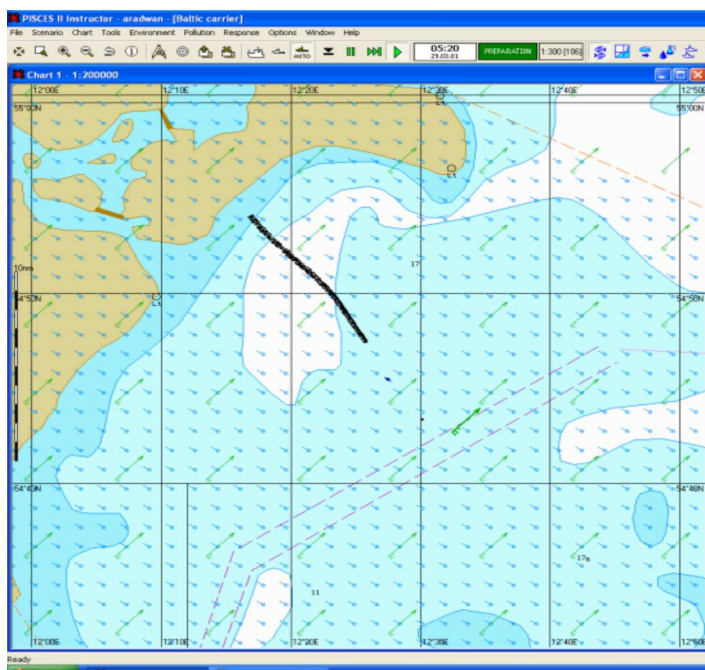


Slika 19 - Zona sakupljanja ulja

Izvor: M/t “Baltic Carrier” accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application

Provedeno je istraživanje može li se u programu PISCES II napraviti simulacija na temelju nesreće „Baltic Carrier“. Dva scenarija su provedena na temelju stvarnih podataka kako bi se usporedili dobiveni rezultati s pravom nesrećom.

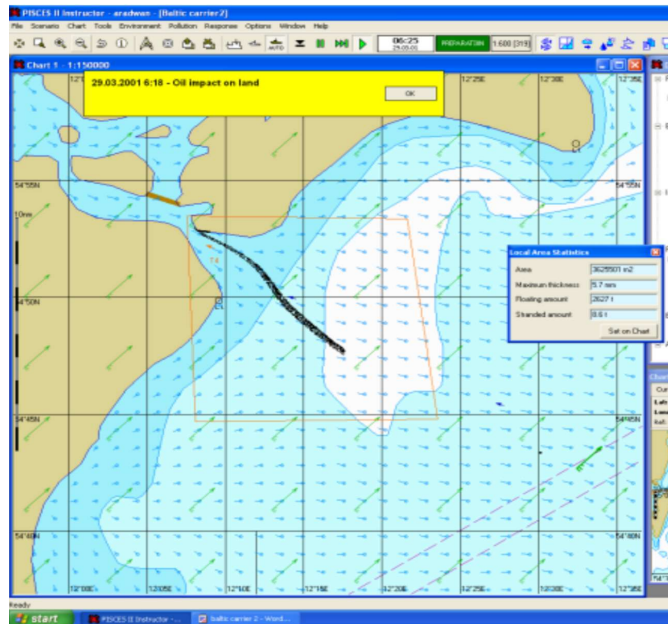
Prvi scenarij koristio je podatke dobivene od strane Danskih vlasti uključujući datum i vrijeme, pozicija tip i količina ulja, te hidrometeorološki podatci koji nisu mijenjani tokom cijele simulacije. U prvom scenariju kretanje uljne mrlje bilo je dosta različito od stvarnosti te je simulacija prekinuta nakon 5 sati iz razloga što je vjerojatnost da će naftna mrlja stići do obale bila 0.



Slika 20 - Pozicija naftne mrlje nakon 5 sati - Prvi scenarij

Izvor: M/t “Baltic Carrier” accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application

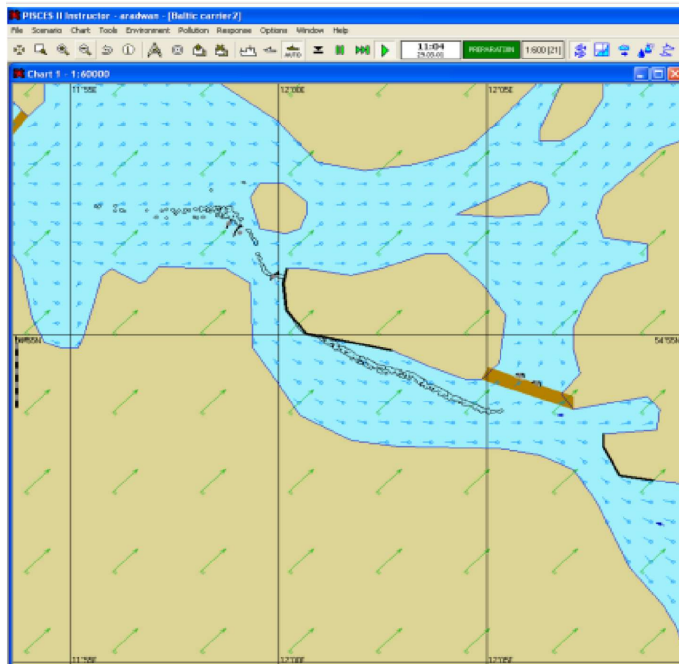
U drugom scenariju ulazni podatci bili su identični kao i u prvom, jedino što su se podatci tokom simulacije mijenjali. Najbitnija stavka koja se trebala promijeniti jest brzina i smjer morske struje. Sat vremena nakon početka scenarija, kako bi se povećala vjerojatnost da će mrlja stići do obale promijenjeni su parametri smjera na 295° i brzine na 2 čvora da bi što više odgovarali stvarnoj putanji mrlje. Program je nakon određenog vremena dao obavijest da je ulje došlo do kopna.



Slika 21 - Obavijest o nasukanju ulja na kopno - Drugi scenarij

Izvor: M/t “Baltic Carrier” accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application

U simulaciju su dodane dvije brane na obalu između Bogo i Mon otoka i promijenjen je smjer morske struje na 270° , a naftna mrlja se nasukala na otok Bogo. Postavljene su još tri brane.



Slika 22 - Pozicije brana na otoku Bogo

Izvor: M/t "Baltic Carrier" accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application

Tri postavljene brane prikazane na slici 21. nisu mogli zaustaviti kretanje nafte pa je postavljena još jedna brana za najdeblje i najmanje grupe ulja u „U“ poziciji dužine 20 metara. Male količine ulja su ostale u moru ali su brzo isparile i nisu uspjele ugroziti druge obale.

Cilj istraživanja je bio dokazati da se pomoću programa PISCES II može napraviti simulacija izlivanja nafte. Prilikom istraživanja utvrđeno je kako je najbitnija stavka prilikom izlivanja ulja stanje mora i meteorološki faktori koji se često ne znaju. Morske struje koje najviše utječu na širenje mrlje se ne zapisuju i jedino kako se mogu dobiti je od prijašnjih nezgoda.

PISCES II program pokazao je dobru korelaciju s pravim podacima, posebice u slučaju količine ulja koje je došlo na obalu, te je dokazano kako se uz prave podatke može napraviti veoma precizna simulacija, ali je problem u nedostupnosti tih istih podataka.

5. ZAKLJUČAK

Zagađenje mora zbog izlivanja ulja donosi niz problema koji, ako se na njih ne reagira pravovremeno i bez određenog plana intervencije mogu naštetiti morskom okolišu, biljkama, životinjama i ljudima. Akcije za reagiranje na same intervencije čak i uz plan intervencije zahtijevaju puno vremena i posla zbog nepredvidivosti iznenadnog izlivanja, područja izlivanja i uvjeta izlivanja, pa se samim time može zaključiti kako niti jedno izlivanje, makar bilo u istom području pod drugačijim uvjetima neće biti jednako prošlom ili budućem. Za takve situacije je teško biti spreman, ali uz pomoć određenih programa i simulacija može se napredovati u vremenu i obliku reakcije na onečišćenje uljima.

Računalne simulacije poput programa PISCES II su odlična ideja za pripremanje plana intervencije u slučaju iznenadnog onečišćenja. Pruža veliki spektar informacija o onečišćenju i dopušta veliku slobodu korisnicima kako bi što bolje vizualizirali onečišćenje, njegovo kretanje i njegov utjecaj na okoliš. Obzirom da se u simulaciji, uz sve potrebne informacije, može ubrzati kretanje onečišćenja kako bi se znalo kada će i kako kretati se onečišćenje, može se napraviti plan intervencije za svaku iznenadnu situaciju koja se dogodi kako bi se što efikasnije spriječilo njeno širenje i zagađenje. Potrebno je još puno informacija koje sam program nema, ali se mogu ručno unijeti od strane korisnika kako bi se vidjelo pravo stanje kretanja onečišćenja kao što su podatci o morskim mijenama, morskoj struji, vjetru i ostalim hidrometeorološkim podacima, ali kako je navedeno u radu najveći problem je u nedostupnosti tih podataka. Obzirom na brzinu unapređenja tehnologije, u skoroj budućnosti može se očekivati kako će računalne simulacije poput PISCES II nuditi još mnoštvo informacija i specifikacija kako bi što više pomogle u brzom i efikasnom rješavanju slučajeva iznenadnog onečišćenja i samim time spriječilo nastanak velike štete na moru.

LITERATURA

- [1] Dorčić I. 1987. *Osnove čišćenja uljnih zagađenja*, Savez kemičara i tehnologa Hrvatske, Zagreb, Hrvatska
- [2] Fingees M. 2017. *Oil Spill Science and Technology*, Second Edition, Spill Science, Edmonton, AB, Canada
- [3] Bičanić Z. 2003. *Zaštita mora i morskog okoliša*, Osobna naklada, Split, Hrvatska
- [4] Plan intervencija kod iznenadnih onečišćenja mora - <https://mmpi.gov.hr/more-86/zastita-jadrana-103/plan-intervencija-kod-iznenadnih-oneciscenja-mora/15349>
- [5] Parker H., Mauseth G., , ITOPF, Polaris Applied Sciences Inc., *Approaches to environmental damage claims* - www.itopf.org
- [6] Surfrider foundation - <https://www.surfrider.org>
- [7] Ansell D.V., Dicks B., Guenette C.C. i dr., 2001, ITOPF, *A review of the problems posed by spills of heavy fuel oils* – www.itopf.org
- [8] *Use of skimmers in oil pollution response*, 2014, Technical information paper – www.itopf.org
- [9] International Tanker Owners Pollution Federation – www.itopf.org
- [10] White I.C. dr., 1999, ITOPF, *New directions in marine pollution control* – www.itopf.org
- [11] Lee K., 2000, *In situ bioremediation of oiled shoreline environments*, Opportunities for Environmental Applications of Marine Biotechnology – www.nap.edu/catalog/9988.html
- [12] Karamea P., Spanoudaki K., Zodiatis G., Gikas G., Sylaios G., 2021. *Oil spill modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges.*, Laboratory of Ecological Engineering and Technology., Xanthi, Grčka
- [13] CDOG Model - https://webspaces.clarkson.edu/~pyapa/comp_model/cdog.html

[14] Lazuga K., Gucma L, Perkovic M., *M/t “Baltic Carrier” accident. The reconstruction of oil spill with PISCES II simulator application* – Scientific Journal

[15] Lazuga K., *Testing of a oil spill mathematical model contained in PISCES II simulator* – Scientific Journal

POPIS SLIKA

Slika 1 - Zauljena ptica.....	5
Slika 2 - Komadi nafte na plaži	8
Slika 3 - Procesi kroz koje prolazi ulje.....	10
Slika 4 - Brzina širenja uljen mrlje.....	12
Slika 5 - Plutajuća brana u "U" obliku	14
Slika 6 - Skimmer za uklanjanje nafte.....	16
Slika 7 - Upotreba disperzanata.....	19
Slika 8 - "In situ" paljenje ulja.....	20
Slika 9 - Mehaničko čišćenje ulja na obali	24
Slika 10 – Čimbenici i procesi ulja u moru	26
Slika 11 - Značajke pojedinih modela za praćenje ulja.....	28
Slika 12 - GNOME - proces praćenja ulja kroz 5 dana	29
Slika 13 - Glavno sučelje OilMap modela.....	30
Slika 14 - Proces MEDSLIK-II modela	32
Slika 15 - Glavni ekran PISCES II simulatora	36
Slika 16 - Primjer svojstva ulja IFO 300	37
Slika 17 - Kretanje uljne mrlje prilikom djelovanja morske struje od 10 m/s	38
Slika 18 - Kretanje uljne mrlje prilikom djelovanja sile morskse sturje 10m/s i djelovanja vjetra 10 m/s	38
Slika 19 - Zona sakupljanja ulja	39
Slika 20 - Pozicija naftne mrlje nakon 5sati - Prvi scenarij.....	40
Slika 21 - Obavijest o nasukanju ulja na kopno - Drugi scenarij	41
Slika 22 - Pozicije brana na otoku Bogo	41