

Zoran Tabak
JP „Elektroprivreda HZ HB” d.d. Mostar
zoran.tabak@ephzhh.ba

Karlo Guštin
Ericsson Nikola Tesla
karlo.gustin@ericsson.com

Goran Kopčak
Ericsson Nikola Tesla
Goran.Kopcak@ericsson.com

RAZVOJ IT PLATFORME ZA PRAĆENJE OKOLIŠNIH KRITERIJA U SUSTAVU DISTRIBUCIJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

SAŽETAK

U ovom članku opisuje se razvoj IT platforme za praćenje okolišnih kriterija u sustavu distribucije električne energije, s ciljem osiguravanja održivosti i usklađenosti s okolišnim standardima. Platforma omogućuje nadzor kvalitete zraka, tla i vode, upravljanje IoT senzorima, integraciju satelitskih podataka i aktivno uključivanje lokalne zajednice. Opisani su ključni use caseovi, uključujući praćenje okolišnih parametara, automatsko otkrivanje curenja ulja, integraciju podataka i vizualizaciju putem GIS modula. Zaključno, navedene su preporuke za daljnji razvoj i proširenje funkcionalnosti platforme.

Ključne riječi: IT platforma, IoT senzori, GIS modul, Prediktivna analitika, Big data, Praćenje okolišnih kriterija

DEVELOPMENT OF AN IT PLATFORM FOR MONITORING ENVIRONMENTAL CRITERIA IN THE ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEM

SUMMARY

This article describes the development of an IT platform for monitoring environmental criteria in the electricity distribution system, with the aim of ensuring sustainability and compliance with environmental standards. The platform enables monitoring of air, soil and water quality, management of IoT sensors, integration of satellite data and active involvement of the local community. Key use cases are described, including monitoring of environmental parameters, automatic detection of oil leaks, data integration and visualization through GIS modules. In conclusion, recommendations for further development and expansion of the platform's functionality are listed.

Key words: IT platform, IoT sensors, GIS module, Predictive analytics, Big data, Monitoring environmental criteria

1. UVOD

Upravljanje kvalitetom okoliša postaje sve značajniji izazov u suvremenom društvu, posebno u kontekstu energetske infrastrukture i industrijskih postrojenja koja imaju izravan utjecaj na ekosustave. Digitalizacija i napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije omogućuju preciznije praćenje okolišnih parametara te olakšavaju donošenje informiranih odluka temeljenih na realnim podacima. U tom kontekstu, platforma za nadzor kvalitete okoliša predstavlja inovativno rješenje koje integrira različite izvore podataka, senzorske sustave i analitičke module kako bi osigurala pouzdane informacije o stanju okoliša u stvarnom vremenu.

Kroz upravljanje sustavom distribucije električne energije potrebno je pratiti njegov učinak na okoliš, prvenstveno u pogledu utjecaja na ekosustav i promjena u okolišnim uvjetima uzrokovanih izgradnjom i radom elektroenergetske infrastrukture. Posebnu važnost u praćenju učinaka na okoliš ima kontinuirana analiza fizikalno-kemijskih svojstava zraka, tla i elektromagnetskog polja, za čiju je preciznu analizu trenutno potreban znatan angažman i resursi.

Znanstvene studije [1-4] koje analiziraju utjecaj elektroenergetske infrastrukture na okoliš ističu kontinuirani istraživački i instrumentalni monitoring kao ključni mehanizam za praćenje stanja svih komponenti prirodnog okoliša te identificiranje potencijalnih utjecaja na zdravlje ljudi i bioraznolikost. Nameće se potreba za izgradnjom cjelovitog rješenja u obliku centralne informacijske platforme kako bi se olakšao nadzor kvalitete okoliša i, uz korištenje informacijskih tehnologija, omogućili napredni analitički mehanizmi za donošenje odluka.

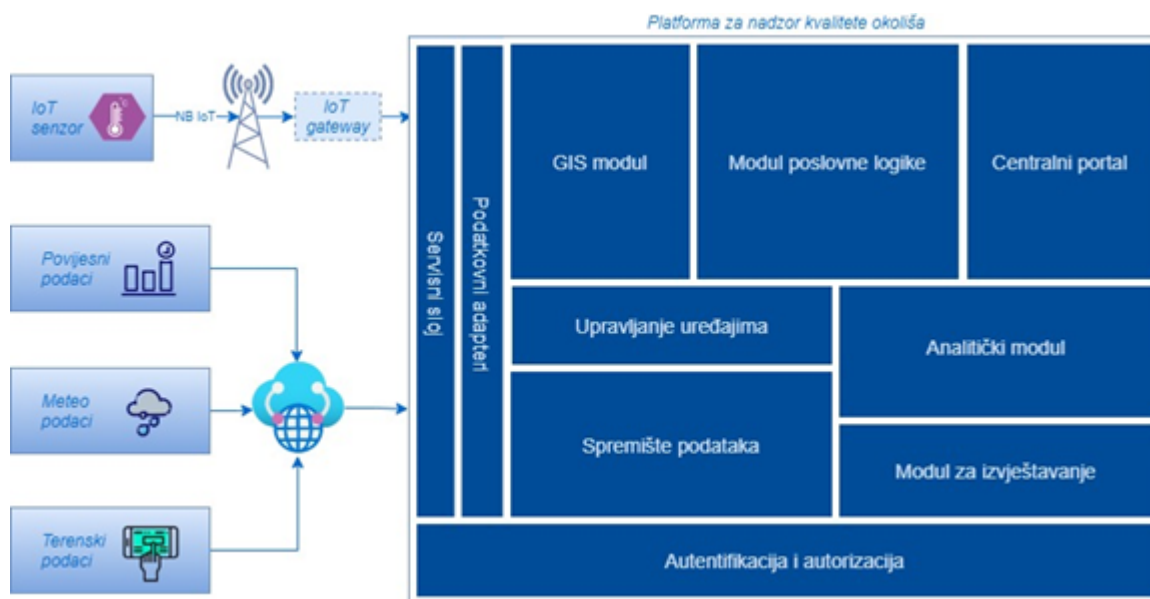
Glavni motiv za razvoj platforme leži u potrebi za povećanjem transparentnosti i učinkovitosti upravljanja okolišnim resursima u kontekstu elektroenergetskog sektora i industrijskih postrojenja. Elektroenergetska infrastruktura, poput trafostanica i prijenosnih vodova, može uzrokovati negativne ekološke utjecaje poput elektromagnetskog zračenja, onečišćenja tla i vode, fragmentacije ekosustava te povećanja rizika od požara i eksplozija. Stoga je ključno kontinuirano nadzirati i analizirati ključne okolišne čimbenike kako bi se pravovremeno poduzele mjere za smanjenje štetnih posljedica i osigurala održivost energetskega sektora. Cilj članka je objasniti uspostavu centralne, modularne IT platforme za potrebe nadzora kvalitete okoliša u distribucijskom sustavu i praćenje potencijalnih negativnih utjecaja elektroenergetske infrastrukture na okoliš.

U nastavku dokumenta detaljno se razrađuju funkcionalne komponente platforme, uključujući arhitekturu sustava, integraciju senzora, metode prikupljanja i analize podataka, GIS module, sustav za izvještavanje i autentifikaciju korisnika. Također, posebna pažnja posvećena je procjeni utjecaja elektroenergetske infrastrukture na okoliš, pri čemu se analiziraju ključni čimbenici kao što su elektromagnetsko zračenje, kemijsko onečišćenje, fragmentacija ekosustava i rizici od požara.

2. PLATFORMA ZA NADZOR KVALITETE OKOLIŠA

2.1. Opis sustava

Predložena arhitektura platforme za nadzor kvalitete okoliša uključuje modularan način razvoja čime bi se omogućilo iterativno dodavanje novih funkcionalnosti i jednostavno proširivanje osnovnog opsega. Slika 1 prikazuje arhitekturu platforme za nadzor kvalitete okoliša te ilustrira integraciju različitih izvora podataka (IoT senzori, povijesni, meteo i terenski podaci) kroz servisni sloj i podatkovne adaptore u centralizirani sustav, koji uključuje module za GIS, analitiku, upravljanje uređajima, izvještavanje i poslovnu logiku, s naglaskom na sigurnu autentifikaciju i autorizaciju korisnika.



Slika 1 - Osnovne komponente sustava

2.2. IoT senzor

Platforma mora omogućiti integraciju sa najmanje jednom vrstom senzora koji mjere fizikalne i/ili kemijske karakteristike tla u svrhu praćenja utjecaja na stanje okoliša za pojedine lokacije. Od više mogućih parametara za praćenje obavezno je da senzor ima mogućnost za praćenje:

- pH vrijednosti tla
- kemijski sastav ulja
- status izolacijskog plina
- Oksidacijsko redukcijski potencijal (ORP)
- Temperatura
- Zamućenost

U ovisnosti o tome koji senzor se koristi u svrhu monitoringa, odabrat će se i način integracije sa centralnom platformom. Prva mogućnost integracije obuhvaća prijenos podataka sa senzora na vanjski entitet (npr. proizvođač senzora) koji će prikupiti podatke i proslijediti ih na centralnu platformu dok druga mogućnost omogućuje izravno slanje podataka sa senzora na centralnu platformu.

2.3. Ostali izvori podataka

Platforma mora omogućiti i prikupljanje podataka za pojedine lokacije iz dodatnih izvora:

- Povijesni podaci (npr. rezultati istraživačkih studija)
- Meteo podaci
- Terenski podaci

Platforma za prikupljanje i analizu podataka integrira povijesne, meteorološke i terenske podatke kako bi omogućila precizno praćenje i predviđanje ekoloških, klimatskih i infrastrukturnih trendova. Povijesni podaci, uključujući istraživačke studije, podatke o ekološkim i energetske trendovima, geološke

karakteristike te socio-ekonomske informacije, omogućuju analizu dugoročnih promjena i procjenu utjecaja infrastrukturnih projekata. Meteorološki podaci poput temperature zraka, brzine i smjera vjetera, padalina, sunčevog zračenja i atmosferskog tlaka ključni su za optimizaciju rada elektroenergetskih sustava te procjenu rizika povezanih s vremenskim ekstremima, pri čemu se podaci prikupljaju iz meteoroloških stanica, satelita, IoT senzora i nacionalnih meteoroloških instituta. Terenski podaci pružaju realne informacije o kvaliteti zraka, razinama buke i vibracija, kontaminaciji tla i vode, a prikupljaju se putem IoT senzora, satelitskih i dron snimanja te mobilnih terenskih timova, omogućujući pravovremenu detekciju ekoloških problema i donošenje odluka temeljenih na aktualnim uvjetima. Ova integracija podataka osigurava cjelovit uvid u stanje okoliša i infrastrukture te omogućuje donošenje održivih i strateških odluka za buduće projekte.

2.4. Servisni sloj

Platforma mora pružiti servisni pristup za prihvrat podataka iz različitih izvora. Za inicijalni opseg projekta dovoljno je podržati RESTful oblik servisne infrastrukture. Izgrađeni servisi moraju zadovoljiti slijedeće karakteristike:

- Nepostojanje stanja
- Mogućnost keširanja
- Uniformno sučelje (URI)
- Korištenje HTTP metoda
- Prijenos podataka u JSON i/ili XML obliku

2.5. Podatkovni adapteri

Budući da se u platformu integriraju podaci iz različitih izvora te da ti podaci imaju zasebne strukture i oblike potrebno je izgraditi sloj podatkovnih adaptera koji će primljene podatke prilagoditi za uniformni način spremanja u jedinstveno centralno spremište platforme. Svaki izvor podataka će imati zaseban podatkovni adapter koji će podatke prilagoditi za pohranu i mapiranje na postojeće podatke u platformi.

2.6 GIS modul

Zbog specifičnosti domene i potrebe za prikazom georeferenciranih podataka potrebno je implementirati zaseban modul koji će omogućiti integraciju GIS podataka u platformu. Modul će biti zadužen za infrastrukturu vezanu za kartografski prikaz informacija. Modul mora imati mogućnost pohrane raster tipa podataka kako bi se mogle prikazati pojedine lokacije vezane uz nadzor kvalitete okoliša. Većina dostupnih komponenti za prikaz GIS podataka nudi svoje servise samo za demo potrebe, a u slučaju produkcijske implementacije potrebno je osigurati vlastitu infrastrukturu. Upravljanje uređajima

Platforma mora omogućiti integraciju sa podacima prikupljenim senzorima koji su postavljeni na lokacijama za koje se vrši nadzor stanja okoliša. Potrebno je implementirati modul koji će omogućiti upravljanje informacijama vezanim uz pojedine uređaje. Za ovu fazu projekta dovoljno je implementirati zaseban modul u ovu svrhu, a u eventualnim nadogradnjama i proširivanjima opsega platforme može se umjesto ovog modula integrirati cijela IoT platforma koja će omogućiti napredne IoT mehanizme za upravljanje pojedinim uređajima.

2.7 Spremište podataka

Platforma mora implementirati centralno spremište podataka koje će objediniti i integrirati podatke iz različitih izvora u jedinstven i što je više moguće normaliziran oblik zapisa podataka. Skladište podataka je potrebno implementirati koristeći kombinaciju relacijskih i nerelacijskih tehnologija zbog različitosti izvora i strukture podataka koji čine podatkovni tok platforme.

2.8 Modul poslovne logike

Modul poslovne logike predstavlja centralnu komponentu platforme i povezuje ostale komponente sustava. Unutar ovog modula potrebno je integrirati sva domenska pravila vezana za nadzor kvalitete

okoliša te potporu svim ostalim procesima unutar platforme. Funkcionalnosti koje se realiziraju kroz ovaj modul su konsolidacija semantičkog značenja podataka u jedinstveni model uz validaciju i proširenje konteksta povezivosti podataka.

2.9 Analitički modul

Analitički modul mora pružiti podršku za analizu procjene stanja vodenog ekosustava temeljem procjene razine eutrofikacije i to analizom povijesnih podataka, te omogućiti dodavanje novih automatiziranih procjena ili praćenja graničnih vrijednosti odabranih senzora. Također sustav mora omogućiti prikaz prosječne razine eutrofikacije vodenog tijela za odabrani period. U sklopu ovog modula treba biti omogućeno i definiranje te ažuriranje graničnih vrijednosti za odabrane parametre za svaku od lokacija na kojima ODS upravlja infrastrukturom (broj lokacija se utvrđuje izvidom na terenu).

2.10 Centralni portal

Centralni portal će predstavljati glavnu vizualizacijsku komponentu koja ima namjenu prezentiranja svih podataka unutar platforme krajnjim korisnicima.

Pristup portalu bit će određen kroz dvije glavne autorizacijske role:

- Javna uloga: Pristup bez potrebe za autentifikacijom. Mogućnost prikaza osnovnog skupa podataka predviđen za javni prikaz.
- Korisnički profil: Pristup uz mehanizme autentifikacije i autorizacije. Mogućnost prikaza cijelog skupa podataka iz centralne platforme.

Jedna od glavnih funkcionalnosti portala bit će prezentacija georeferenciranih podataka na prikazu karte pojedinih lokaliteta. U sklopu projekta bit će definirano 7 lokacija, određenih njihovim GPS koordinatama, te će se u obliku markera pojedine lokacije prikazivati na sučelju sa prikazom geografske karte. Markeri će imati različite boje, određene sa ocjenom kvalitete okoliša (npr. stupanj eutrofikacije) za pojedinu lokaciju. Svaki marker će sadržavati i osnovne informacije o odabranoj lokaciji (naziv lokacije, slika lokacije, tekstualni opis lokacije, tekstualni opis trenutnog stanja okoliša za tu lokaciju, GPS koordinate lokacije). Vizualna prezentacija komponente GIS karte treba prikazati i legendu koja objašnjava pojedine boje (odnosno ocjene stanja okoliša) markera lokacija. Komponenta legende treba biti interaktivna i to u obliku da korisniku omogućuje filtriranje pojedinih stanja radi lakšeg prikaza informacija na karti.

Prilikom odabira pojedinog markera korisnik mora imati mogućnost pregleda detaljnog skupa podataka za svaku lokaciju. Detaljni skup podataka uključuje:

- Naziv lokacije
- Opis lokacije
- Fotografija lokacije
- Tip lokacije (npr. stajalište/tekućica)
- Trenutna ocjena stanja okoliša
- Grafički prikaz podataka prikupljenih senzorom za tu lokaciju
- Grafički prikaz podataka prikupljenih terenskim mjerenjima za tu lokaciju
- Grafički prikaz prikupljenih povijesnih podataka za tu lokaciju
- Grafički prikaz meteo podataka u korelaciji za tu lokaciju (npr. temperatura, oborine)

Zbog mogućnosti nakupljanja velikog opsega podataka u skupu informacija koje se prikazuju za pojedinu lokaciju, ovaj pregled podataka mora imati implementiranu mogućnost filtriranja podataka po vremenskoj kategoriji. Korisnik mora imati mogućnost definiranja početnog i završnog datuma za vremenski interval unutar kojeg želi analizirati podatke.

Autorizirani korisnici moraju imati mogućnost ručnog unosa podataka o kvaliteti okoliša za pojedinu lokaciju. Autorizirani korisnik će odabrati opciju unosa podataka, odabrati predefiniranu lokaciju za koju želi obaviti unos i upisati podatke o parametrima koji su se promatrali. Potrebno je osigurati unos do 20

parametara. Unos parametara može biti kroz slobodan tekst ili kroz skup predefiniраниh vrijednosti za pojedini parametar.

Opća karakteristika vizualizacije podataka za stanje okoliša je da sustav mora omogućiti prikaz svih povijesnih i prikupljenih podataka grafički i/ili tablično, neovisno o izvoru podataka. Dodatno se mora omogućiti filtriranje po praćenom parametru ili vremenskom periodu za koji se želi prikazati vrijednost parametara.

2.11 Sustav za izvještavanje

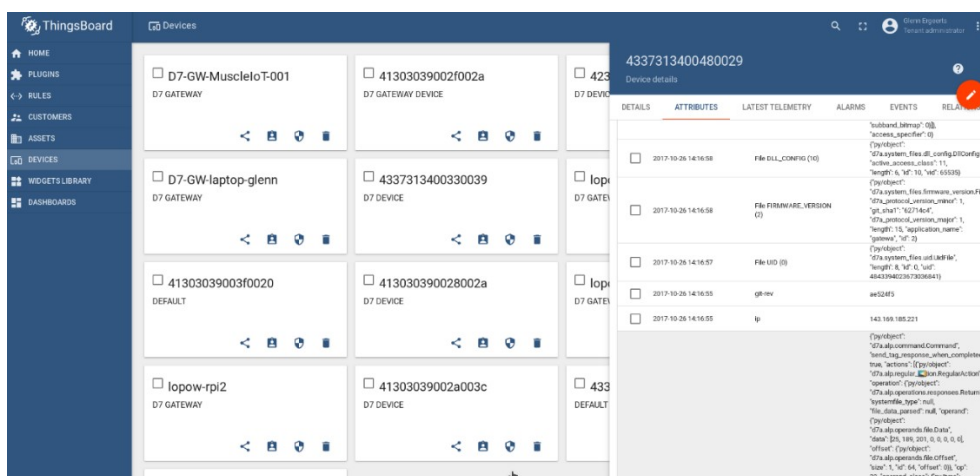
Jedna od glavnih funkcionalnosti platforme je uvid u informacije o nadzoru kvalitete okoliša te je potrebno razviti modul koji će omogućiti kreiranje izvještaja na temelju informacija koje su prezentirane kroz centralni portal. Potrebno je omogućiti računalni ispis (npr. pdf dokument) tabličnih i grafičkih vrijednosti prezentiranih u sklopu prikaza pojedine lokacije.

2.12 Autentifikacija i autorizacija

Kroz izgradnju ovog modula potrebno je osigurati sigurnosne mehanizme komunikacije. Osnovni mehanizmi moraju uključiti mogućnost autentifikacije korisnika za pristup platformi te razinu autorizacije za pristup pojedinim skupovima podataka unutar platforme.

2.13 Modul integracije IoT platforme

U slučaju širenja opsega projekta, dodavanju novih funkcionalnosti na sloju izvora podataka (prvenstveno senzorski dio) uvodimo modul „Upravljanje uređajima“ i integracija zasebne IoT platforme kao dodatne komponente sustava. Na ovaj način dobit će se tehnološka podloga za mnogo složenije i robusnije IoT scenarije (napredno prikupljanje podataka, procesuiranje, dodatne mogućnosti upravljanja uređajima, vizualizacija procesa i analitika nad skupljenim podacima).



Slika 2 - Upravljanje uređajima korištenjem IoT platforme

Uvođenje cjelovitog IoT modula unutar platforme omogućava sljedeće procese:

- Integracija uređaja – provizioniranje i upravljanje uređajima koji sudjeluju u procesu automatiziranog praćenja okolišnih parametara. Kroz ovu modifikaciju omogućit će se jednostavan unos IoT podataka i pristup tim podacima ostalim modulima platforme.
- Integracija podataka – Na ovaj način omogućit će se jednostavnija korelacija postojećih podataka u platformi sa onim koji dolaze od strane IoT uređaja
- Integracija procesa – IoT platforma kao cjelovit modul omogućit će jednostavno povezivanje IoT procesa sa ostalom poslovnom logikom platforme

3. INTEGRIRANJE KLJUČNIH ČIMBENIKA UTJECAJA NA OKOLIŠ U IT PLATORMU ZA PRAĆENJE OKOLIŠNIH KRITERIJA U SUSTAVU DISTRIBUCIJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Elektroenergetska infrastruktura, uključujući trafostanice i prijenosne vodove, značajno utječe na okoliš kroz različite čimbenike koji zahvaćaju zrak, vodu, tlo, bioraznolikost i ljudsko zdravlje. Glavni ekološki problemi proizlaze iz elektromagnetskog zračenja, kemijskog onečišćenja, fragmentacije ekosustava i emisije stakleničkih plinova, što može dugoročno narušiti stabilnost prirodnih sustava. Dodatno, otpadno transformatorsko ulje (eng. Waste Transformer Oil - WTO) [5] predstavlja ozbiljnu prijetnju okolišu zbog prisutnosti toksičnih spojeva poput PCB-a, PAH-a i teških metala, koji mogu uzrokovati kontaminaciju tla i voda te negativno utjecati na zdravlje ljudi i životinja.

3.1 Elektromagnetsko zračenje

Transformatori i dalekovodi stvaraju elektromagnetska polja niske frekvencije (50/60 Hz), čiji dugoročni učinci još nisu u potpunosti istraženi, međutim preporučuju se sigurnosne udaljenosti i zaštitne barijere kako bi se smanjila izloženost stanovništva. Osim ljudi, elektromagnetska polja mogu ometati navigaciju ptica i insekata, uzrokujući promjene u njihovom ponašanju i migracijskim obrascima. Neke od preporučenih mjera uključuju smanjenje snage polja, korištenje zaštitnih materijala i optimalno planiranje trase dalekovoda kao ključne strategije za ublažavanje ovih učinaka.

Međutim da bi svaka od ovih pretpostavki imala realno utemeljenje u konkretnim brojkama, potrebno je i precizno izmjeriti zračenje i integrirati ga u IT platformu radi transparentnog praćenja. Za kontinuirano praćenje elektromagnetskih polja niske frekvencije (50/60 Hz) u blizini elektroenergetske infrastrukture, poput transformatora i dalekovoda, preporučuje se korištenje IoT uređaja koji omogućuju daljinsko mjerenje i prijenos podataka u stvarnom vremenu [6].

3.2 Onečišćenje tla i vode (curenje ulja, teški metali i PCB spojevi)

Transformatorsko ulje sadrži poliklorirane bifenile (PCB), policikličke aromatske ugljikovodike (PAH) i teške metale (Cu, Fe, Pb, Zn, Ni, Mn), koji u slučaju curenja ozbiljno onečišćuju tlo i podzemne vode. PCB-i su trajni organski zagađivači (POPs) koji su bioakumulativni i kancerogeni, a unatoč zabrani, i dalje su prisutni u starijim transformatorima. WTO se često nepravilno odlaže ili spaljuje, pri čemu nastaju toksične emisije poput dioksina i furana. Primjena biorazgradivih esterskih ulja, strogi ekološki propisi i tehnike pročišćavanja otpadnih ulja mogu značajno smanjiti ove ekološke rizike [7].

Za praćenje prisutnosti polikloriranih bifenila (PCB), policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) i teških metala u okolišu putem IoT tehnologije, specijalizirani senzori mogu se integrirati u sustave za kontinuirani nadzor. Iako su tradicionalne metode analize ovih zagađivača laboratorijske i zahtijevaju uzorkovanje, napredak u tehnologiji omogućio je razvoj prijenosnih senzora koji se mogu povezati s IoT platformama za real-time praćenje [8].

3.3 Fragmentacija staništa i gubitak bioraznolikosti

Izgradnja dalekovoda i trafostanica uzrokuje fizičku fragmentaciju ekosustava, što otežava kretanje divljih životinja i smanjuje dostupnost staništa. Ptice su posebno osjetljive na sudare s vodovima, dok sisavci mogu izbjegavati koridore ispod dalekovoda zbog povećane izloženosti predatorima. Vegetacija ispod vodova se redovito uklanja, što može potaknuti širenje invazivnih biljnih vrsta i smanjiti broj autohtonih biljaka i životinja. Kako bi se smanjio negativan utjecaj, potrebno je planirati ekološke koridore, koristiti vizualne oznake za ptice i primijeniti prilagođene metode održavanja vegetacije.

IoT uređaji poput kamera sa senzorima pokreta, akustičnih senzora, ekoloških senzora i LIDAR sustava omogućuju prikupljanje i analizu podataka o prisutnosti divljih životinja, promjenama u vegetaciji i ekološkim uvjetima ispod dalekovoda, pri čemu se prikupljeni podaci u stvarnom vremenu šalju na IT platformu za ranu identifikaciju problema i donošenje pravovremenih odluka.

GIS sustavi koriste satelitske i dron snimke za mapiranje područja visoke bioraznolikosti, planiranje ekoloških koridora, identifikaciju područja osjetljivih na gubitak vegetacije te predikciju utjecaja izgradnje novih vodova na migracije i ponašanje životinja, dok integracija s IT platformom omogućuje vizualizaciju kritičnih zona i donošenje odluka temeljenih na prostornim podacima.

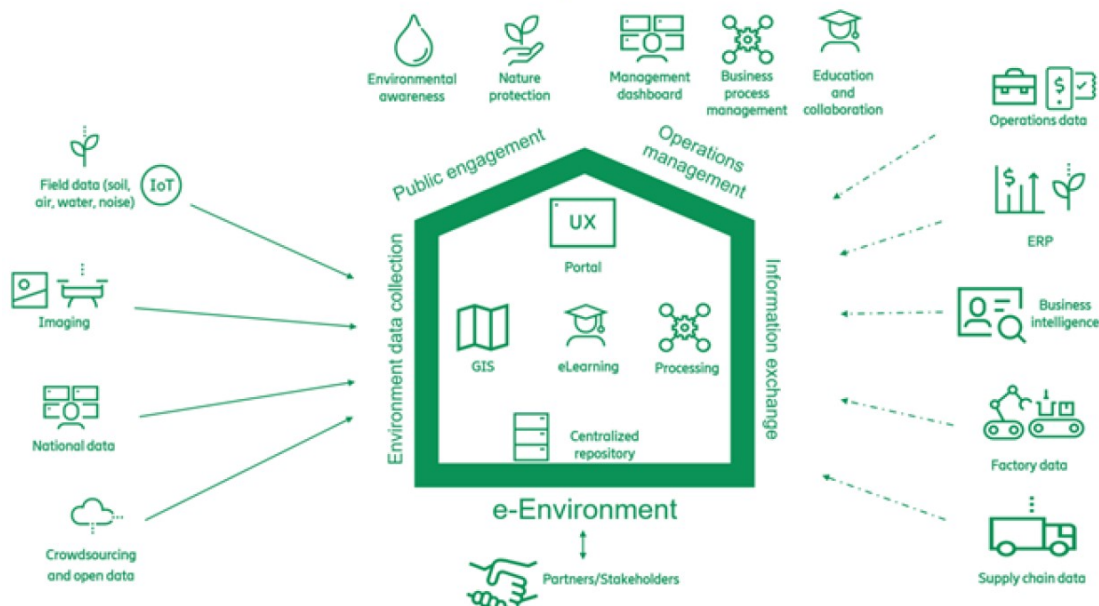
IT platforma koristi AI i analizu velikih podataka za praćenje kretanja divljih životinja, predviđanje sudara ptica s dalekovodima, detekciju invazivnih biljnih vrsta putem satelitskih i dron snimaka te simulaciju utjecaja infrastrukturnih projekata na ekosustave, omogućujući pravovremenu prilagodbu planova i donošenje ekoloških korekcija prije nego što dođe do štete. Dodatno, integracijom pametnih vizualnih oznaka, IoT senzora za upravljanje vegetacijom i GPS praćenja migracija životinja, platforma omogućuje kontinuirani monitoring ekoloških koridora i optimizaciju zaštitnih mjera putem automatiziranih izvještaja i analitičkih modela [9].

3.4 Požari i eksplozije

Pregrijavanje transformatora i curenje ulja može izazvati požare i eksplozije, što dovodi do emisije toksičnih plinova, uništenja vegetacije i onečišćenja okoliša kemikalijama. Mineralna ulja imaju nisku točku paljenja, dok esterska ulja nude sigurniju alternativu zbog više točke samozapaljenja ($>300^{\circ}\text{C}$). Također, ptice koje se naslanjaju na dalekovode mogu izazvati kratke spojeve i požare, osobito u sušnim područjima. Redovito održavanje, protupožarne barijere i korištenje sigurnijih dielektričnih tekućina mogu znatno smanjiti ove rizike.

Kada nije moguće koristiti sigurnije dielektrične tekućine poput esterskih ulja, IT platforma i IoT senzori mogu igrati ključnu ulogu u prevenciji pregrijavanja, detekciji curenja ulja i ranom otkrivanju požara, omogućujući pravovremenu intervenciju i smanjenje rizika.

IoT senzori za nadzor temperature i pregrijavanja omogućuju kontinuirano praćenje temperature, razine ulja i izolacije transformatora, slanjem podataka na IT platformu za prediktivno održavanje i prevenciju kvarova. Detekcija curenja ulja i kemijskog onečišćenja ostvaruje se pomoću IoT senzora za uljne pare, razinu ulja, tlak i vibracije, koji omogućuju ranu identifikaciju curenja i aktivaciju sigurnosnih protokola putem IT platforme. IoT senzori za detekciju požara i prevenciju kratkih spojeva uzrokovanih pticama koriste senzore dima, plamena, pokreta i elektromagnetskih polja za pravovremeno prepoznavanje rizika i automatsku aktivaciju zaštitnih mjera. Prediktivna analitika i umjetna inteligencija analiziraju povijesne podatke i stvarne uvjete putem Big Data modela, omogućujući donošenje preventivnih odluka i optimizaciju opterećenja kako bi se smanjio rizik od požara i kvarova [10].



Slika 3 - Konceptualni prikaz IT platforme

Slika 3 prikazuje koncept e-okoline (e-Environment) koja integrira prikupljanje podataka o okolišu putem IoT senzora, nacionalnih baza podataka i crowdsourcinga, povezuje ih s javnim angažmanom i operativnim upravljanjem te omogućuje razmjenu informacija s poslovnim sustavima poput ERP-a, poslovne inteligencije i upravljanja opskrbnim lancem.

4. ZAKLJUČAK

Razvoj i implementacija platforme za nadzor kvalitete okoliša omogućuje sveobuhvatno praćenje ekoloških čimbenika povezanih s elektroenergetskom infrastrukturom, uključujući kontaminaciju tla i vode, elektromagnetsko zračenje, gubitak bioraznolikosti i rizike od požara. Integracija IoT senzora, GIS sustava, AI analitike i big data tehnologija omogućuje kontinuirano prikupljanje, analizu i vizualizaciju podataka u realnom vremenu, čime se postiže pravovremena detekcija ekoloških problema i donošenje informiranih odluka.

U ovom radu identificirane su ključne komponente platforme, uključujući IoT senzore za detekciju onečišćenja tla, zraka i vode, analitičke module za procjenu eutrofikacije i predviđanje ekoloških rizika, te GIS modul za prostornu analizu i vizualizaciju podataka. Posebno je naglašena važnost automatiziranog nadzora elektromagnetskog zračenja, s ciljem preciznog mjerenja i transparentnog izvještavanja o razinama EMF-a u blizini elektroenergetskih objekata.

Također, analizirana je uloga IoT senzora u praćenju curenja transformatoriskog ulja i prisutnosti PCB-a, PAH-a i teških metala, pri čemu su istaknute prednosti prijenosnih senzorskih sustava povezanih s IoT platformama. Nadalje, GIS tehnologije i dron snimke pokazale su se ključnima u mapiranju ekoloških koridora i modeliranju utjecaja elektroenergetskih postrojenja na migracijske rute divljih životinja, dok su AI algoritmi korišteni za predikciju sudara ptica s dalekovodima i detekciju invazivnih biljnih vrsta.

U području upravljanja rizicima, platforma omogućuje rano otkrivanje požara i eksplozija putem IoT senzora koji detektiraju pregrijavanje transformatora, prisutnost plamena, dima i kemijskih spojeva, čime se značajno poboljšava sigurnost elektroenergetskih objekata i okoliša. Korištenje prediktivne analitike dodatno omogućuje proaktivno održavanje infrastrukture, smanjujući rizik od ekoloških incidenata.

Daljnji razvoj platforme bit će usmjeren na optimizaciju IoT senzorskih mreža, poboljšanje preciznosti i autonomije senzora te unapređenje kapaciteta analitičkih modela temeljenih na umjetnoj inteligenciji. Također, potrebno je istražiti bolje metode integracije satelitskih i dron snimaka s GIS analizama, kako bi se dodatno unaprijedilo kartografsko praćenje okolišnih promjena.

Poseban naglasak treba staviti na razvoj naprednih prediktivnih modela koji koriste big data analizu i strojno učenje, kako bi se omogućilo donošenje odluka u stvarnom vremenu i automatska aktivacija zaštitnih mjera. Dodatno, istraživanja bi trebala obuhvatiti učinkovitije metode energetske efikasnosti IoT nadzora, posebno u udaljenim i teško dostupnim područjima.

Napredak u ovim područjima omogućit će daljnju optimizaciju sustava upravljanja okolišem, povećati njegovu otpornost na ekološke izazove i osigurati održivu integraciju elektroenergetskih postrojenja u prirodne ekosustave, smanjujući njihov negativan utjecaj i doprinoseći održivom razvoju.

5. LITERATURA

- [1] Anđela Jevtić, Vladimir Stanković, Srđan Glišović, and Evica Jovanović, "ENVIRONMENTAL IMPACTS OF SUBSTATIONS: A SHORT REVIEW," *Ecological Engineering and Environment Protection*, vol. 2024, no. 2/2024, pp. 5–11, Nov. 2024, doi: <https://doi.org/10.32006/eeep.2024.2.0511>.
- [2] X. Fan et al., "Environmental noise pollution control of substation by passive vibration and acoustic reduction strategies," *Applied Acoustics*, vol. 165, p. 107305, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107305>.
- [3] R. Tiwari, P. S. Agrawal, P. N. Belkhode, Joseph V.L. Ruatpuia, and Samuel Lalthazuala Rokhum, "Hazardous effects of waste transformer oil and its prevention: A review," *Next Sustainability*, vol. 3, pp. 100026–100026, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100026>.
- [4] L. D. Biasotto and A. Kindel, "Power lines and impacts on biodiversity: A systematic review," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 71, pp. 110–119, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.010>.
- [5] Pramod Belkhode, Vinod Ganvir, A. S. Shende, and S. D. Shelare, "Utilization of waste transformer oil as a fuel in diesel engine," vol. 49, pp. 262–268, Feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.008>.
- [6] N. Djuric, N. Kavecan, M. Mitic, N. Radosavljevic, and A. Boric, "The concept review of the EMF RATEL monitoring system," 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), pp. 258–260, May 2018, doi: <https://doi.org/10.23919/mikon.2018.8405193>.
- [7] C. E. Gherdaoui et al., "Improving transformer oil decontamination: A synergistic approach integrating adsorption and radiative treatment for polychlorinated biphenyls," *Separation and Purification Technology*, vol. 334, p. 126028, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126028>.
- [8] Sambandh Bhusan Dhal et al., "An IoT-Based Data-Driven Real-Time Monitoring System for Control of Heavy Metals to Ensure Optimal Lettuce Growth in Hydroponic Set-Ups," *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 1, pp. 451–451, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23010451>.
- [9] M. Gazzea, M. Pacevicius, D. O. Dammann, A. Sapronova, T. M. Lunde, and R. Arghandeh, "Automated Power Lines Vegetation Monitoring using High-Resolution Satellite Imagery," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1–1, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2021.3059307>.
- [10] P. Guo, "The application of Internet of Things technology in intelligent fire protection," *Applied and Computational Engineering*, vol. 47, no. 1, pp. 159–163, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/47/20241278>.