

Primjena digitalnih blizanaca u području korozije

Krndelj, Ema

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:036408>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

EMA KRNDELJ

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ema Krndelj

Primjena digitalnih blizanaca u području korozije

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof.dr.sc. Sanja Martinez, FKIT

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Sanja Martinez

dr.sc. Marko Viskić

doc. dr. sc. Petar Kassal

Zagreb, rujan 2023.

Prvenstveno se zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Sanji Martinez na strpljenju, pomoći, pruženom povjerenju i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Posebno se želim zahvaliti svom dečku Filipu bez čije svakodnevne podrške i pomoći ne bih došla do ovdje.

Zahvaljujem se svojoj najboljoj prijateljici Rene koja je uz mene svaki dan od prvog dana škole, već nešto više od 17 godina.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, a posebno baki Nadi čija mi je podrška puno značila kroz cijelo obrazovanje.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Teorijski uvod.....	1
2.1 Digitalni blizanci	1
2.2. Općenito o koroziji.....	5
2.2.1. Klasifikacija korozije	6
3. Pregledni dio.....	9
3.1 Potreba za digitalnim blizancima u koroziji	9
3.2. Primjer primjene digitalnih blizanaca u koroziji vjetroelektrana	9
3.2.1 Digitalni blizanci za prediktivno održavanje zaštitnih premaza vjetroelektrana.....	10
3.3 Primjer primjene digitalnih blizanaca u podvodnim cjevovodima.....	18
3.3.1. Automatizirano stvaranje digitalnog blizanca tijekom izgradnje	19
3.3.2. Ažuriranje digitalnog blizanca sa informacijama dobivenim u inspekciji	20
3.3.3. Planiranje održavanja temeljno na digitalnom blizancu.....	20
3.4. Primjer primjene digitalnih blizanaca na cjevovodima u tlu	23
3.5. Primjena digitalnih blizanaca u održavanju betonskih mostova.....	23
4. Zaključak	24
5. Literatura	26

Sažetak

U zadnje vrijeme sve se više istražuju mogućnosti primjene digitalnih blizanaca u koroziji kao i njihova primjena u drugim industrijama. Digitalni blizanci su virtualni prikaz stvarnih fizičkih sustava koji nastaju pomoću podataka koje prikupljaju senzori, kamere i drugi izvori informacija o sustavu. Oni pružaju do sada neviđenu razinu kontrole nad fizičkim uređajima i pomažu upravljati složenim sustavima. Korozija je sveprisutan problem koji ima veliku važnost u širokom rasponu industrijskih primjena i proizvoda, stoga je isplativo ulagati i proučavati nove tehnologije poput digitalnih blizanaca s kojima bi se postigla bolja kontrola procesa korozije. U ovom radu dan je pregled najnovijih primjena digitalnih blizanaca u koroziji. Detaljnije je opisan razvoj digitalnog blizanca za prediktivno održavanje zaštitnih premaza na vjetroelektranama. Prikazana je mogućnost integracije podataka dobivenih pomoću različitih senzora, kao i matematički modeli održavanja. Ostali kraće opisani primjeri uključuju primjenu digitalnih blizanaca za održavanje podvodnih i ukopanih cjevovoda i betonskih mostova. Navedeni primjeri ilustriraju mogućnosti i upućuju na prednosti primjene digitalnih blizanaca u korozijskim sustavima .

Ključne riječi: digitalni blizanci, korozija, vjetroelektrana, cjevovod, prediktivno održavanje

Abstract

Recently, the possibilities of using digital twins in corrosion and their application in other industries have been increasingly explored. Digital twins are virtual representations of real physical systems created using data collected from sensors, cameras and other sources of information about the system. They provide an unprecedented level of control over physical devices and help manage complex systems. Corrosion is a pervasive problem that is of great importance in a wide range of industrial applications and products. Therefore, it is worth investing in and investigating new technologies such as digital twins to achieve better control of the corrosion process. This paper provides an overview of the latest applications of digital twins in corrosion. The development of digital twins for predictive maintenance of protective coatings on wind farms is described in more detail. The possibility of integrating data obtained with different sensors and mathematical maintenance models are presented. Other briefly described examples include the application of digital twins for the maintenance of underwater

and underground pipelines as well as concrete bridges. The above examples illustrate the possibilities and show the advantages of using digital twins in corrosion systems.

Keywords: digital twins, corrosion, wind turbine, pipeline, predictive maintenance

1. Uvod

Digitalni blizanci (engl. *digital twins*) tehnološki su koncept koji je već desetak godina središte pažnje industrije, a posljednjih godina i znanstvenika. Primjena tehnologije digitalnih blizanaca raste eksponencijalnom brzinom i transformira industriju i način poslovanja. To su virtualne kopije proizvoda, procesa ili usluga koje modeliraju njihovo stvarno ponašanje u realnom vremenu. [1, 2] Korozija je proces koji ima značajan utjecaj na čovjeka, privredu i okoliš. Radi se o nenamjernom razaranju metala (konstrukcijskih materijala) pod utjecajem kemijskog, biološkog i mehaničkog okoliša. To je spontan proces koji se ne može spriječiti, može se jedino usporiti. Najzastupljeniji konstrukcijski materijal, zbog dobrih fizikalnih i kemijskih svojstava je čelik, a i drugi metalni materijali se vrlo često koriste. [10,24] Sami atmosferski uvjeti, a pogotovo morska voda kao jako agresivan medij, uzrokuje brojna korozijska oštećenja na konstrukcijskim materijalima. Korozija je primjerice glavni uzrok kvara vjetroelektrana u priobalnom području i vjetroelektrana usred mora. [13] Inspekcija, praćenje stanja i održavanje različitih metalnih konstrukcija, cijevi i zaštitnih premaza često je tehnički i vremenski izrazito zahtjevna. Radi udaljene ili nedostupne lokacije, složene opreme troškovi održavanja su vrlo visoki. [13, 21] Digitalni blizanci su pronašli primjene u strategijama održavanja, gdje se koriste za predviđanje stanja konstrukcija, poboljšanje praćenja stanja, dijagnostiku kvarova, smanjenje broja aktivnosti održavanja i oblikovanje optimalnih intervala održavanja. [13,15]

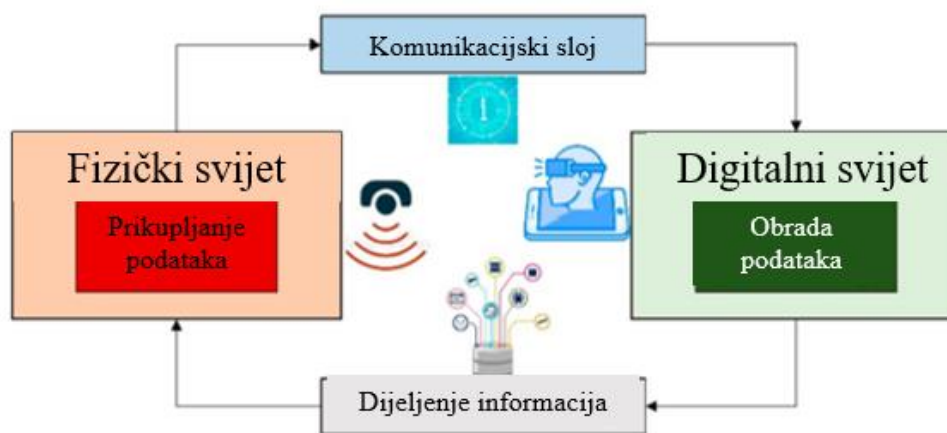
2. Teorijski uvod

2.1 Digitalni blizanci

Digitalni blizanci predstavljaju svoje fizičke blizance (engl. *physical twins*) u stvarnom svijetu putem modela, simulacija te osjetnih podataka senzora. Grieves i Vickers definiraju digitalne blizance kao „skup virtualnih informacijskih konstrukcija koje u potpunosti opisuju potencijalni ili stvarni fizički proizvod, od mikroskopske atomske razine do makroskopske geometrijske razine. Na optimalan način, bilo koje informacije koje bi se mogle dobiti pregledom fizičkog proizvoda mogu se dobiti i iz njegovog digitalnog blizanca". [1, 2] Ako digitalnog blizanca promatramo kao sustav može se reći da se sastoji od tri glavna podsustava:

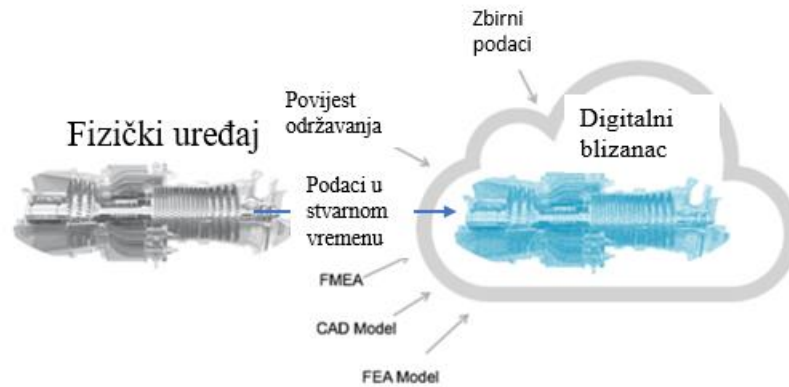
1. fizičkog proizvoda u stvarnom prostoru
2. virtualnih proizvoda u virtualnom prostoru
3. podataka i informacija koji povezuju virtualne i stvarne proizvode

Tok rada digitalnog blizanca može se prikazati kao ciklus između fizičkih i virtualnih stanja, pri čemu podaci teku iz fizičkog u virtualni svijet, a informacije i procesi teku iz virtualnog u fizički svijet (slika 1.). [3]



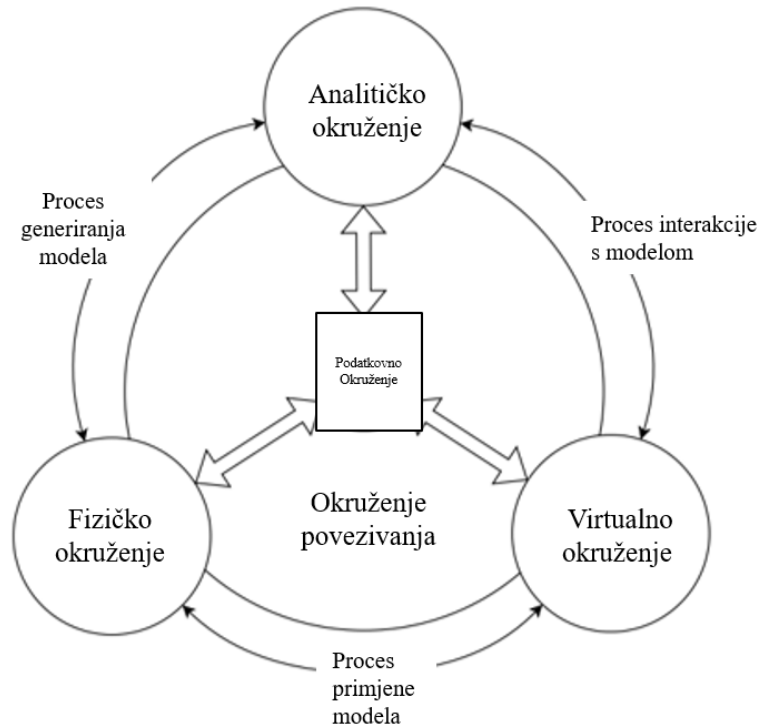
Slika 1. Koncept digitalnog blizanca [3]

Digitalni blizanci služe za otkrivanje potencijalnih nedostataka i problema, provođenje različitih analiza, testiranje novih funkcija i simulacija mogućih scenarija koji bi bili skupi ili čak nemogući za provedbu na fizičkom proizvodu. Pomoću senzora i različitih tehnologija u digitalnoj okolini prikazuju se elementi i dinamika proizvoda koji su povezani putem interneta stvari (engl. *internet of things*, IoT), omogućujući praćenje stanja uređaja i njegove okoline te način na koji se mijenjaju tijekom životnog ciklusa. Uloga senzora je prikupljanje podataka o trenutnom stanju uređaja i okoline, a podaci se zatim pohranjuju na računalo. Osim podataka koji dolaze iz fizičkih izvora, računala također pohranjuju podatke koji su generirani u digitalnom okruženju, kao što su specifikacije konstrukcije, popisi komponenti i materijala, rezultati proračuna, simulacije i slično. Integriranjem tih podataka s informacijama prikupljenima putem senzora stvara se potpuna slika o radu i performansama sustava što je shematski prikazano na slici 2. [2, 4, 5, 6]



Slika 2. Shema digitalnog blizanaca [6]

Prema definiciji Tao-a i Zhanga-a digitalni blizanac se konstruira koristeći pet komponenata. Te komponente su fizičko okruženje (eng. *physical environment*), podatkovno okruženje (eng. *data environment*), analitičko okruženje (eng. *analytical environment*), virtualno okruženje (eng. *virtual environment*) i okruženje povezivanja (eng. *connection environment*). Podaci o fizičkom blizancu dobivaju se mjerenjem određenih varijabli fizičkog okruženja digitalnog blizanca, podaci se zatim pohranjuju u podatkovno okruženje. Analitičko okruženje pruža simulacije, usluge i automatizaciju. Korisnici često percipiraju digitalni blizanac samo kroz virtualno okruženje kao model fizikalnog blizanca, a nisu svjesni uključenosti svih ostalih komponenata. Okruženje povezivanja, ako je pravilno izvedeno, predstavlja nevidljivu sponu koja povezuje različite komponente i omogućava usklađivanje s drugim digitalnim blizancima. Na slici 3. shematski su prikazane komponente digitalnih blizanaca prema definiciji Tao-a i Zhanga-a. [7]



Slika 3. Komponente digitalnog blizanca [7]

U suštini, svi digitalni blizanci su isti odnosno predstavljaju objekt ili proces virtualno. No, ono u čemu se razlikuju je područje primjene. Prema području primjene digitalni blizanci mogu se podijeliti na četiri vrste:

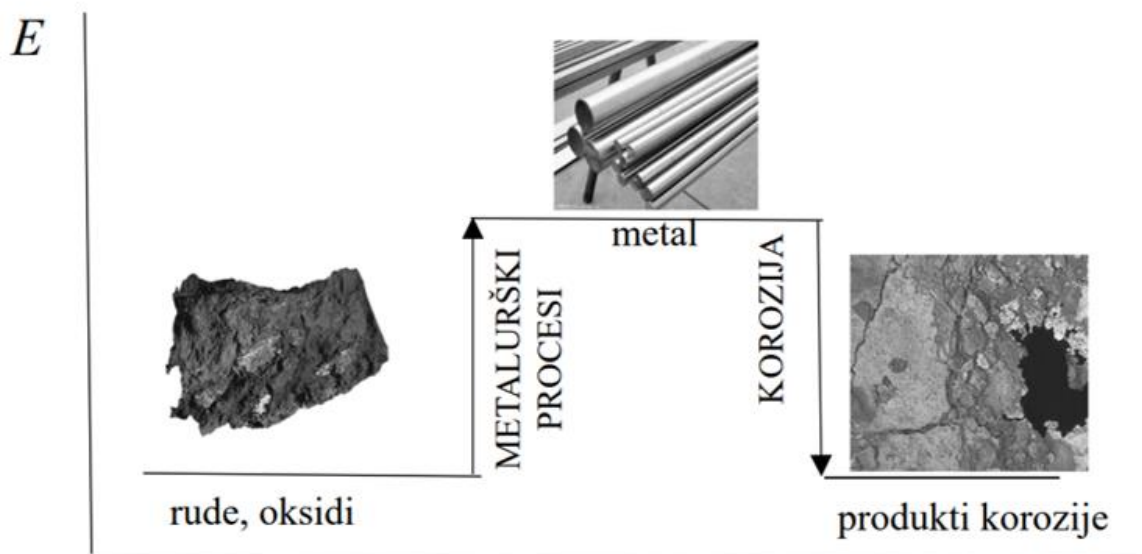
1. Blizanci komponenata/ blizanci dijelova (eng. *component twins / parts twins*)
2. Blizanci imovine (eng. *asset twins*)
3. Blizanci sustava ili jedinice (eng. *system ili unit twins*)
4. Blizanci procesa (eng. *process twins*)

Blizanci komponenata predstavljaju blizance pojedinačnih komponenata u nekom sustavu dok su blizanci imovine prikaz kako individualne komponente rade zajedno kao cjelovita imovina. Blizanac procesa najčešće predstavlja cijeli proizvodni pogon i pruža uvid u zajednički rad svih jedinica. [8] Tokom životnog ciklusa proizvodi prolaze kroz različite operacije i radne uvjete, što rezultira trošenjem i promjenom stanja komponenata. Upotrebom digitalnih blizanca za praćenje procesa kroz koje proizvodi prolaze tijekom svog životnog vijeka te njihovih parametara, moguće je prepoznati potencijalna područja za optimizaciju. Glavni cilj korištenja digitalnih blizanca je smanjenje ukupnih troškova, pružanje pravovremenih

upozorenja na nepravilnosti u radu uređaja kako bi se poboljšalo održavanje, otvorile mogućnosti za razvoj novih proizvoda i usluga, unaprijedile postojeće proizvode putem optimizacije komponenti ili smanjenja vremena čekanja između pojedinih operacija, te povezivanje različitih podsustava u mrežu kako bi se dobila jasnija slika o ponašanju kompleksnih sustava i olakšalo donošenje odluka. [2, 4, 5]

2.2. Općenito o koroziji

Korozija je fizikalno kemijsko međudjelovanje metala i njegova okoliša koje uzrokuje promjenu uporabnih svojstava metala te može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji oni čine. Danas se puno pažnje posvećuje koroziji metala iz više razloga. Neki od razloga su povećana upotreba metala u svim područjima tehnologije, upotreba metalnih konstrukcija sve tanjih dimenzija, upotreba metala za specijalnu primjenu (npr. u području atomske energije), upotreba rijetkih i skupih metala čija zaštita zahtijeva posebne mjere opreza. Korozija je spotan proces koji se ne može spriječiti samo se može usporiti. Radi se o skupu elektrokemijskih i kemijskih promjena tijekom kojih metal prelazi iz elementarnog stanja u spojeve u kojima se često nalazi u prirodi. Većina metala se u prirodi nalazi u oksidiranom i vezanom stanju, kako bi se rude ili određeni spojevi prerađali u metal moraju se podvrgnuti pirometalurškim procesima koji zahtijevaju dovodjenje energije. Metal se u usporedbi s rudom ili spojem nalazi u stanju više energije pa ima težnju reagirati s drugim tvarima tim putem osloboditi energije i prijeći u stanje niže energije kao što prikazano na slici 4. Smanjivanje slobodne energije metala je pokretačka sila procesa korozije. Proces korozije je ireverzibilan proces koji je suprotan proizvodnji metala. [9, 10, 11]



Slika 4. Energetske promjene pri dobivanju i koroziji metala [11]

2.2.1. Klasifikacija korozije

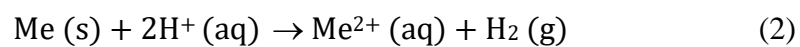
Bolje razumijevanje korozije nije važno samo kako bismo identificirali mehanizme korozije, već i kako bismo primijenili odgovarajuće metode zaštite od korozije i predvidjeli ponašanje metalnih materijala u radnim uvjetima. Korozijski procesi klasificiraju se na temelju mehanizma djelovanja, izgleda korozijskog oštećenja i vrsti korozivnih sredina. [10]

2.2.1.1. Klasifikacija korozije prema mehanizmu djelovanja

Prema mehanizmu djelovanja koroziju možemo podijeliti na kemijsku i elektrokemijsku. Elektrokemijska korozija je puno učestalija od kemijske. Osnovna razlika je u tome što se kemijska korozija javlja samo u neelektrolitima, dok je za elektrokemijsku koroziju elektrolit nužan. Kemijska korozija odvija se prema zakonima kemijske kinetike heterogenih reakcija u plinovima, u odsutnosti vode na površini metala, obično pri visokim temperaturama. Oksidacija metala kisikom je primjer kemijske korozije. [9, 10]



Elektrokemijska korozija se događa na metalima i legurama u kontaktu s elektrolitima kao što su vodene otopine soli, vodene otopine kiselina i lužina. Tijekom ovog procesa, odvijaju se kemijski procesi oksidacije (oslobađanje elektrona) i redukcije (primanje elektrona). Za elektrokemijsku koroziju potrebna su tri osnovna elementa: anoda, katoda i elektrolit. Na elektrodi koja je elektronegativnija, odvija se anodni proces oksidacije tijekom kojeg se metal ili legura ioniziraju, oslobađajući tako jedan ili više elektrona taj se proces naziva oksidacija. Paralelno s tim, na elektrodi koja je elektropozitivnija, odvija se katodni proces redukcije gdje se primaju elektroni oslobođeni anodnom oksidacijom. Otapanje metala u kiselini primjer je elektrokemijske korozije. [9, 10, 11]



anodni proces: $\text{Me (s)} \rightarrow \text{Me}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{e}^-$

katodni proces: $2\text{H}^+ (\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 (\text{g})$

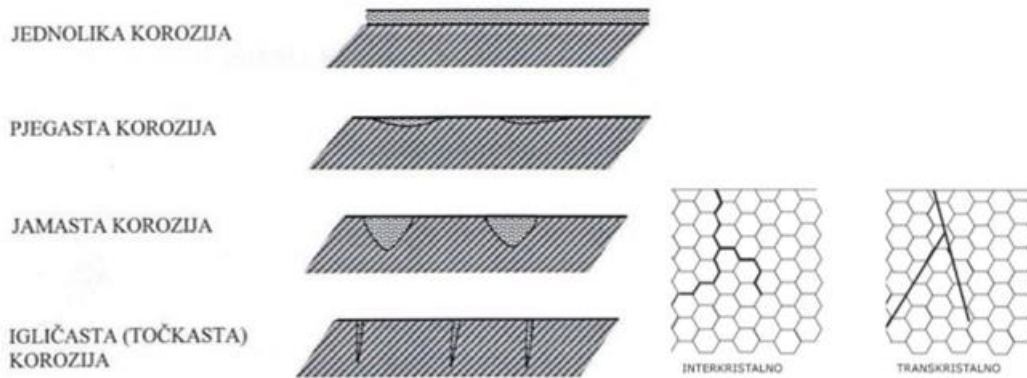
2.2.1.2 Klasifikacija korozije prema izgledu korozijskog oštećenja

Korozija se prema izgleda korozijskog oštećenja može podijeliti na više vrsta korozije (slika 6.) [10] od koji su najvažnije:

- a) Jednolika korozija, najčešći i najmanje štetan oblik korozije. Ravnomjerno zahvaća cijelu površinu metala, a nastali korozijski produkti često štite od daljnje korozije.
- b) Lokalizirana korozija npr. jamičasta (engl. *pitting*), jedan od opasnijih oblika korozije koji djeluje izrazito lokalizirano i duboko u masu metala.
- c) Korozija koja narušava mehnička svojstva metala u cijelosti i može biti interkristalna ili transkristalna.

Interkristalna korozija, nastaje na granicama kristalita, opasan oblik korozije jer može dugo ostati neprimjećena. Naglo smanjuje čvrstoću i žilavost metala, a konačna posljedica je lom. Vodikova krhkost sličan je oblik korozije gdje adsorbirani i kemisorbirani vodikovi atomi s površine difundiraju u metal te se vežu u molekulu H_2 . Molekule H_2 ne mogu izaći iz metala u kojem se nalaze pod velikim tlakom, metal posljedično postaje krhak te uz dodatno opterećenje

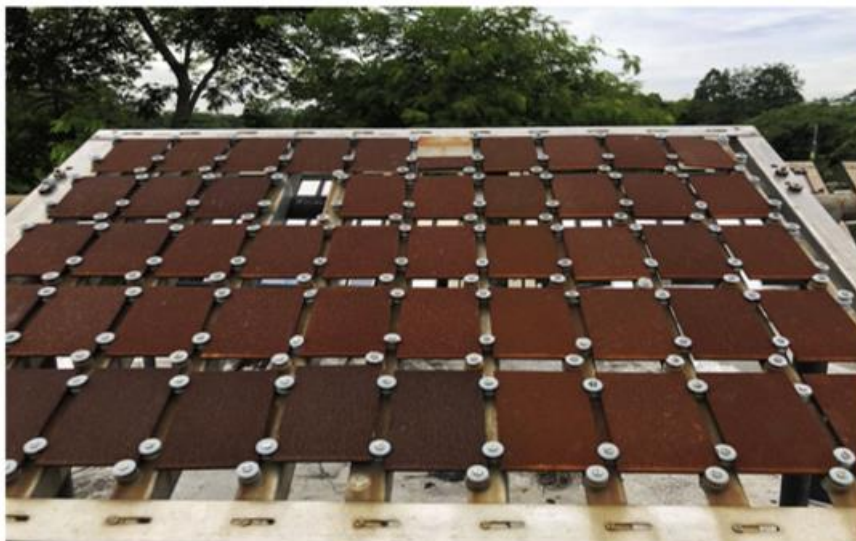
može puknuti. Transkristalna korozija, u suštini rašireniji oblik interkristalne i najčešće je nalazimo uz visokolegiranim čelicima. Događa se u obliku pukotina i rasjeda po kristalima u metalima ili legurama. [10]



Slika 5. Vrste korozije prema izgledu korozijskog oštećenja [10]

2.2.1.3. Klasifikacija korozije prema korozivnim sredinama

Prema korozivnim sredinama razlikuju se: atmosferska korozija, korozija u tlu, korozija u suhim plinovima, korozija u elektrolitima, korozija u neelektrolitima, kontaktna korozija, korozija zbog lutajućih struja, korozija zbog napreznja, biokorozija. Najraširenija je atmosferska korozija koja je rezultat djelovanja kisika i vlage. Na slici 6. prikazana je stanica za ispitivanje atmosferske korozije u São Paulo-u u Brazilu. [10, 12]



Slika 6. Stanica za ispitivanje atmosferske korozije u São Paulo-u, Brazil [12]

3. Pregledni dio

3.1 Potreba za digitalnim blizancima u koroziji

Većina konstrukcija, procesne opreme, cjevovoda u industriji i općenito konstruirana je od metala te je od ključne važnosti njihovo stanje. Zbog nepristupačnih lokacija i kompleksne opreme, troškovi održavanja su vrlo visoki u različitim industrijskim sektorima, poput energetike, pomorstva, aeronautike. Cjevovodi ukopani u zemlju također predstavljaju velik problem. Troškovi popravka oštećenja zaštitnih premaza za primjerice kopnene vjetroelektrane su 5 do 10 puta veći od početnih troškova primjene premaza, a što se tiče vjetroelektrana na moru, troškovi mogu biti veći i do 100 puta od početnih troškova. Za takve je sustave posebno interesantno integriranjem podataka o koroziji sa simulacijskim modelom stvoriti digitalne blizance. Što se tiče procesnog inženjerstva, stvaranje digitalnog blizanca ojačava plan upravljanja korozijom postrojenja omogućavajući inženjerima u proizvodnji da imaju sve podatke na dohvat ruke. Pomoću digitalnih blizanaca također se može utvrditi trenutno stanje korozije cjevovoda i opreme, upravljati upotrebom inhibitora korozije te odlučivati o odabiru odgovarajuće opreme. Digitalni blizanci pronašli su primjenu i u dijagnostici grešaka kao što je na primjer oštećenje u zaštitnom premazu, smanjenju broja aktivnosti održavanja i formuliranju optimalnih intervala održavanja. Budući pristupi održavanju povezani su s primjenom prediktivnih strategija, gdje će integracija digitalnih blizanaca biti obavezna. [13, 14, 15]

3.2. Primjer primjene digitalnih blizanaca u koroziji vjetroelektrana

Vjetroelektrane jedan su od brzorastućih izvora obnovljive energije. U zadnje vrijeme sve više vjetroelektrana instalira se u priobalnom području ili na moru što dodatno povećava probleme vezane uz koroziju i troškove održavanja. U 2021. godini, novo instalirani kapacitet svjetskih vjetroelektrana na moru povećao se trostruko u odnosu na 2020. godinu. [23]

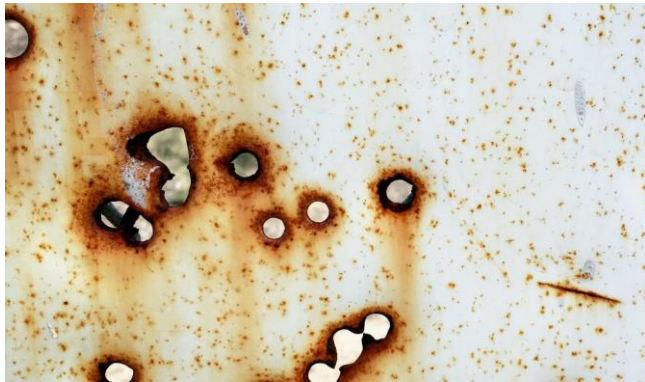
Korozija je jedan od najizazovnijih problema u održavanju struktura vjetroelektrana, bez obzira na to nalaze li se one na kopnu, u priobalnim područjima ili daleko od obale. Što se tiče vjetroelektrana u priobalnom području i onih odobalnih (engl. *off-shore*) korozija predstavlja vodeći uzrok kvarova. Veliki problemi vezani za koroziju odnose se na nosivi dio konstrukcija

vjetroelektrana. Stupovi vjetroelektrana sastoje od zavarenih komponenata, vijčanih spojeva i prirubnica koji su posebno osjetljivi na koroziju. Osim vanjskih faktora kao što su UV zračenje, mraz, morska voda itd. i dinamička naprezanja mogu uzrokovati oštećenje spoja između tornja vjetroelektrane i njegovih temelja. Korodirani dijelovi mogu dovesti do značajnih daljnjih korozijskih oštećenja i čak ugroziti stabilnost samog tornja. Najviše se pažnje posvećuje jednolikoj koroziji koja doprinosi smanjenju nosivosti konstrukcije i jamičastoj koroziji koja doprinosi pojavi korozijskog zamora (slika 7.). [13, 21, 23]

a)



b)



Slika 7. Primjer a) jednolike korozije [18] i b) jamičaste korozija odobalne vjetroelektrane [17]

3.2.1 Digitalni blizanci za prediktivno održavanje zaštitnih premaza vjetroelektrana




Primjena zaštitnih premaza predstavlja ključnu mjeru u borbi protiv korozije čeličnih dijelova vjetroelektrana. Zaštitni premazi, koji su uglavnom sastavljeni od organskih materijala na bazi epoksida i poliuretana, propadaju tijekom svog vijeka trajanja, zahtijevaju inspekciju i održavanje. Proces inspekcije, praćenja stanja i održavanja zaštitnih premaza vremenski je zahtjevan, te zahtijeva značajan ljudski napor. Momber i suradnici predstavili su koncept digitalnih blizanaca za praćenje stanja i planiranje prediktivnog održavanja sustava površinske zaštite tornjeva vjetroelektrana. [13] Postupak razvoja digitalnog blizanca iz rada Momber-a i suradnika može se primijeniti na kopnene vjetroelektrane i one koje se nalaze na moru. Neke od prednosti korištenja digitalnih blizanaca za praćenje stanja i održavanje zaštitnih premaza na tornjevima vjetroelektrana su:

- digitalizacija postojeće vjetroelektrane uzimajući u obzir određenu razinu detalja

- online praćenje i klasifikacija vizualnih prikaza

- uzimanje u obzir više redova veličine, od geografske razine do razine milimetra

Za izradu digitalnog blizanca vjetroelektrane, bitno je poznavati mikro, mezo i makro-razinu te strukture, što se naziva razinom detalja (eng. *Level of Detail*, LoD). Ideje o razinama sažete su i kategorizirane na slici 8. Razina 3 je referentno područje koje je uvedeno kako bi se uzeo u obzir utjecaj mikrookoliša. Slika 8. ističe važnost okolišnih opterećenja na odgovarajućoj razini za funkcionalnost struktura. [13, 21]

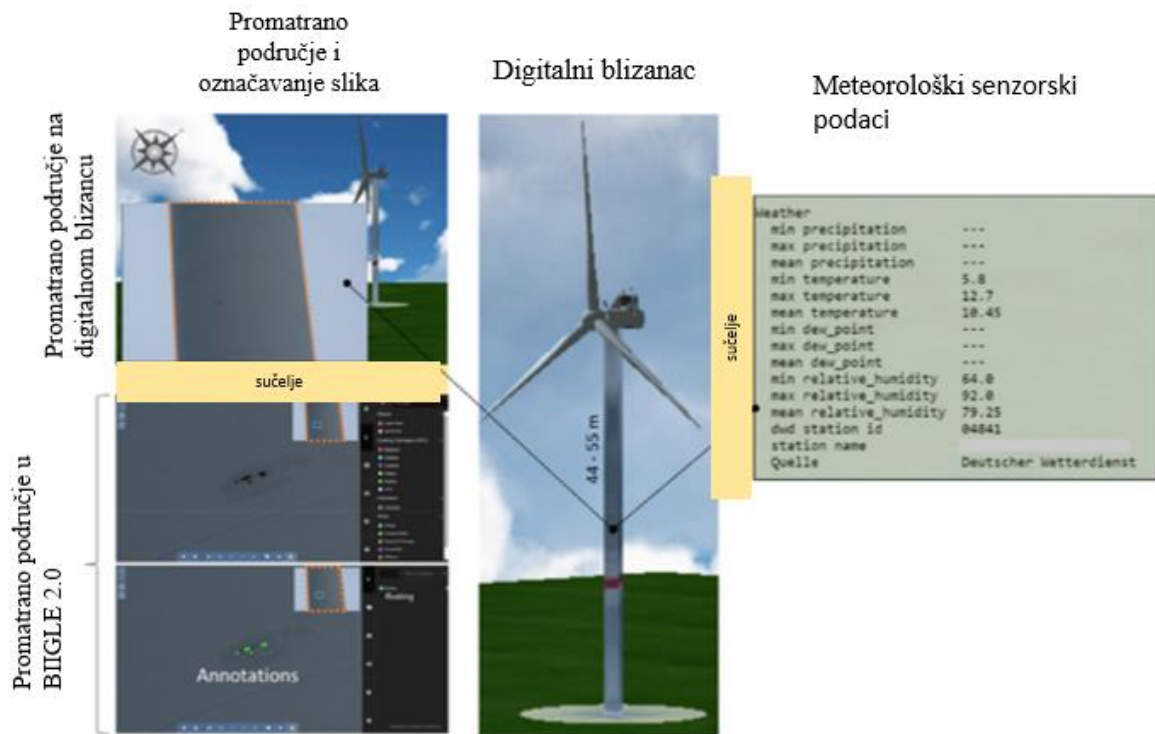
Razina 1 ili makrorazina sustava koja prikazuje polje vjetroturbina	Razina 2 ili srednja razina sustava koja prikazuje jednu vjetroturbinu	Razina 3 ili mikrorazina sustava koja prikazuje referentnu površinu
		

Slika 8. Razine detalja vjetroelektrane [13]

Utvrđeno da intenzitet korozije ovisi o zemljopisnom položaju, zemljopisnoj orijentaciji, kutu nagiba i konstrukcijskom dizajnu. Utjecaj zemljopisnog položaja na koroziju može se procijeniti iz globalnih mapa saliniteta i dominantnih vjetrova na određenoj lokaciji, a mogu se koristiti i globalne mape korozivnosti. Npr. Momber i suradnici proučavaju koroziju na vjetroelektrana u Sjevernom moru u Njemačkoj. [13] Došli su do zaključka da meki čelik najviše korodira kad je zemljopisna orijentacija konstrukcije jugoistočna, a najmanje kad je južna. Za kopnene i odobalne vjetroelektrane atmosferska visina također je bitan parametar. Kühne i suradnici su proučavajući naslage soli na konstrukcijama u Sjevernom moru na području Njemačke došli do rezultata da za primjerice naslage natrijeva klorida na CrNiMo čeliku variraju u rasponu od 97.6 mg/m² na visini od 20 m do 518.7 mg/m² na visini od 30 m. Treba napomenuti da je pri 30 m postignut maksimum, za veće visine koncentracija pada, ali je veća od one pri 20 m. [13, 21]

3.2.1.2 Opis razvoja digitalnog blizanca

Virtualni blizanac opremljen je sučeljima prema bazama podataka i informacijskim sustavima, uključujući modele praćenja stanja zaštite premaza, modele održavanja, strukturalne podatke (opterećenje) i okolišne podatke (korozivnost) spomenute u prošlom poglavlju. Jedna od glavnih primjena virtualnog blizanca je definiranje i odabir referentnih područja unutar strukture vjetroelektrane. Za stvaranje takvih referentnih područja može se primijeniti modeliranje, kao što je CAD konstrukcijsko modeliranje. Međutim zbog određenih nedostataka takvog modeliranja Momber i suradnici predlažu proces modeliranja temeljen na podacima o vjetroelektranama nazvan In-situ proces computation virtualnog blizanca (eng. *In-situ Virtual Twin Computation*). [13] Prvi korak u razvoju virtualnog blizanca je proces fotografskog skeniranja. Cijela vjetroelektrana sekvencijalno se fotografira s digitalnim fotoaparatom odozdo prema gore prema određenom protokolu sa četiri različite pozicije (u obrascu rotacije od 90 stupnjeva) s fiksnom udaljenošću od tornja. Sa svake pozicije snima se serija preklapajućih digitalnih fotografija odozdo prema gore sa fiksnim povećanjem, zabilježenom lokacijom putem GPS-a i zabilježenim kutom nagiba. Snimljene fotografije zatim se spajaju postupkom koji se naziva mozaiciranje (eng. *mosaicking*) pomoću posebnog algoritma. Rezultat je fotografski mozaik koji se projektira na odabrani 3D model kako bi se vizualizirao virtualni blizanac. Svaka pozicija u foto mozaiku je povezana s originalnom fotografijom. Potrebno je naglasiti da se virtualni blizanac temelji na fotografijama i odražava stvaran izgled i morfologiju promatranih područja. Ta činjenica razlikuje ovog virtualnog blizanca od drugih koncepata blizanaca, kao što su primjerice oni temeljeni na CAD podacima (eng. *twins based on CAD data*). Kako bi se virtualni blizanac prikazao i pregledavao koristi se softver nazvan ViTO (engl. *Virtual Twin Observation Tool*) (slika 9). Fotografski mozaik koji nastaje procesom mozaiciranja projicira se na odabrani osnovni geometrijski 3D model, koji može biti pojednostavljena verzija točnog geometrijskog oblika konstrukcije. ViTO je također povezan s drugim bazama podataka, pa korisnici mogu povezati vizualne karakteristike promatrane na virtualnom blizancu sa primjerice meteorološkim zapisima podataka (slika 9). Korisnik može odabrati područje na virtualnom blizancu i pokrenuti drugi alat za inspekciju i označavanje pojedinačne fotografije. Momber i suradnici, kao jedan od prikladnih alata za to predlažu BIIGLE (*BioImage Indexing, Graphical Labeling and Exploration*) (slika 9). [13, 21]

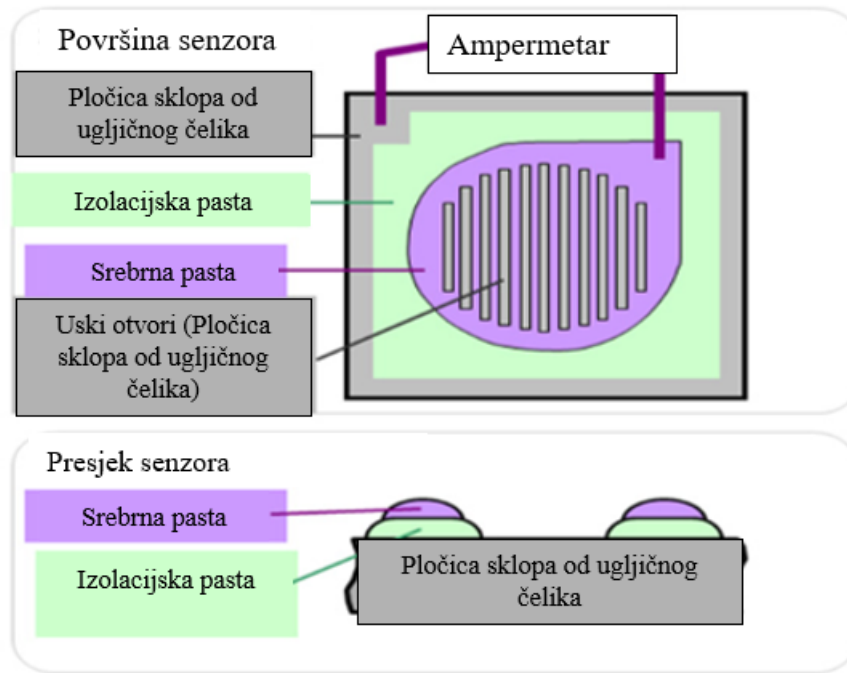


Slika 9. Prikaz softvera ViTO, BIIGLE 2.0 alat za inspekciju i označavanje slika i meteoroloških podataka [21]

Označavanja provedena u BIIGLE-u također se mogu prikazivati u ViTO-u. Automatsko označavanje slika pomoću metoda strojnog učenja također se može integrirati u postupak označavanja putem alata BIIGLE 2.0. Neki obrasci oštećenja primjećuju se u vrlo malom broju, stoga njihova klasifikacija može biti teža za automatizaciju. Momber i suradnici predlažu kombinaciju automatske klasifikacije za obrasce koji se češće primjećuju i precizniju klasifikaciju od strane obučenih stručnjaka za oštećenja i tipove korozije koji se rjeđe pojavljuju. Automatizirano razvrstavanje slika uklanja otprilike 70% slika prije ručne klasifikacije, smanjujući posao inspektora na 30%. Slike sa sumnjivim uzorcima zatim se dijele na oštećenja premaza i koroziju. Slike s oštećenjima premaza dalje se podklasificiraju prema ISO seriji 4628: hrđanje, mjehuranje, pucanje, ljuštenje i kredanje, a slike korozije dalje se podklasificiraju prema klasifikaciji za naftne i plinske konstrukcije: lagana hrđa (mrlje), umjerena hrđa, teška hrđa, jaka hrđa i primjetan gubitak metala/dubinska korozija. [13, 21]

3.2.1.3 Integracija senzorskih podataka

Predloženi koncepti virtualnog blizanca i ViTO softvera dizajnirani su na način da se mogu integrirati i podatci drugačijeg tipa od digitalnih fotografija. Za razvoj svakog digitalnog blizanca bitno je integrirati senzorske podatke. Senzori pomažu u praćenju otpornosti i praćenju propadanja. Neki od važnih parametara za procjenu brzine korozije su prosječna godišnja temperaturu zraka, godišnja prosječna relativna vlažnost, prosječna godišnja depozicija klorida, prosječna godišnja depozicija sumprovog dioksida, učestalost i intenzitet kiše. Momber i suradnici navode da se podaci o sljedećim parametrima: temperaturi zraka, relativnoj vlažnosti zraka, UV zračenju, smjeru vjetra, brzini vjetra i količini oborina, mogu integrirati u koncept digitalnog blizanca putem sučelja između virtualnog blizanca i odgovarajućih senzora. [13, 21] Ti parametri praćeni su na vjetroelektranama na visini između 50 i 60 metara. U trenutnu verziju softvera Momber i suradnici su integrirali podatke o sljedećim parametrima: količini oborina, temperaturi zraka, točki rosišta i relativnoj vlažnosti, također su dostupni njihovi dnevni prosjeci, maksimumi i minimumi. Senzorski podaci iz realnog vremena korisni su i iz razloga jer se koriste se za dinamičku rekalkibraciju modela propadanja i održavanja time se dobivaju pouzdaniji i precizniji modeli. Momber i suradnici navode još neke ideje relevantnih podataka koji bi se mogli dobiti putem senzora. Navode senzore vibracija, senzore nagiba, senzore debljine čelika, senzore temperature površine, senzore debljine premaza, senzore za praćenje atmosfere korozije (eng. *Atmospheric Corrosion Monitor*, ACM). Shema ACM senzora prikazana je na slici 10. Korištenjem ACM senzora u kombinaciji sa podacima o temperaturi i vlažnosti moguće je procijeniti ekvivalentne količine taloženja soli što se može dovesti u direktnu korelaciju sa korozijom konstrukcije. U kombinaciji sa već spomenutim senzorskim podacima poboljšale bi se prognoze korozije i stanja premaza te bi se poboljšao model propadanja i preporuke za održavanje. [13]



Slika 10. Shematski prikaz ACM senzora [22]

3.2.1.4 Integracija modela održavanja

Integracija modela održavanja ključna je za primjenu prediktivnih strategija održavanja. Digitalni blizanci služe za procjenu plana održavanja, oni pomoću određenih matematičkih modela mogu procijeniti stanje konstrukcije i po tome napraviti procjenu plana održavanja. Momber i suradnici navode matematički izraz na kojem se bazira plan održavanja sustava za zaštitu od korozije: [13, 21]

$$g(D) = R(t_e) - S > 0 \quad (3)$$

D predstavlja parametar ocjene (eng. *rating parameter*), R je vremenski ovisna funkcija koja predstavlja otpornost (eng. *resistance effect*), a t_e je vrijeme izlaganja konstrukcije korozivnim uvjetima izraženo u godinama. S je vrijednost za zadano konstantno opterećenje (eng. *load effect*). Pri $g = 0$, sustav za zaštitu površine je u graničnom stanju, za $g < 0$, zaštita površine je neuspješna, a za $g > 0$ sustav je u stanju preživljavanja. [13, 21] Parametar ocjene je lokalni stupanj degradacije

$$R(t_e) = D_L(t_e) = \exp [-(\lambda * t_e)^k] \quad (4)$$

D_L predstavlja lokalni stupanj degradacije. Lokalni stupanj degradacije obuhvaća tri uzroka degradacije: propadanje premaza, jednoliku koroziju i jamičastu koroziju. Njegove vrijednosti kreću se od 0 do 1, 0 kad je sustav totalno degradirao, a 1 kad je sustav u potpunosti održavan cjelovitim. Vrijednosti λ i k predstavljaju skalu i oblik funkcije. [13, 21]

Na temelju operativnih parametara i informacija koji utječu na proces degradacije digitalni blizanac može predvidjeti vremenski ovisnu funkciju stupnja degradacije $R(t_e)$. Digitalni blizanac dizajniran je na način da može integrirati podatke iz različitih domena (senzorske podatke, meteorološke podatke, slike). Senzorski podaci već su objašnjeni u paragrafu integracija senzorskih podataka, a meteorološki podaci mogu se dobivati također putem senzora ili se dobivaju preko lokalne meteorološke stanice. Pomoću tih podataka Momber i surandici napravili su određene matematičke modele povezane s korozijom i degradacijom zaštitnih premaza. [13, 21] Vremenski ovisni model za atmosfersku koroziju čelika dan je slijedećim izrazom:

$$h_C = r_{\text{corr}} * t_E^B \quad (5)$$

$$r_{\text{corr}} = f(T, RH, P_d, S_d) \quad (6)$$

U jednadžbi (5), h_C predstavlja dubinu korozije, r_{corr} predstavlja brzinu korozije u prvoj godini, B označava eksponent snage korozije (eng. *corrosion power exponent*), T predstavlja prosječnu godišnju temperaturu zraka u °C, RH predstavlja godišnju prosječnu vlažnost u %, P_d predstavlja prosječnu godišnju stopu taloženja sumporovog dioksida u mg/m^2 , a S_d predstavlja prosječnu godišnju stopu taloženja klorida u mg/m^2 . Također se navodi vremenski ovisni model propadanja premaza. [13, 21]

$$R_i(t_E) = 100 \cdot \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t_E}{A_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

$$A_1 = K_0 \cdot (-a_1 \cdot T + a_2) \cdot (-b_1 \cdot S_d + b_2) \cdot (-c_1 \cdot UV + c_2) \cdot a_i \quad (8)$$

R_i predstavlja postotak propagacije korozije ispod premaza, UV označava izloženost ultraljubičastom zračenju u W/m^2 , A_1 je koeficijent propadanja premaza, K_0 je parametar otpora premaza, a a_1 do a_i su regresijski parametri. Za vjetroelektrane dovoljno udaljene od mora, S_d (stopa taloženja klorida) se može zanemariti. [13, 21]

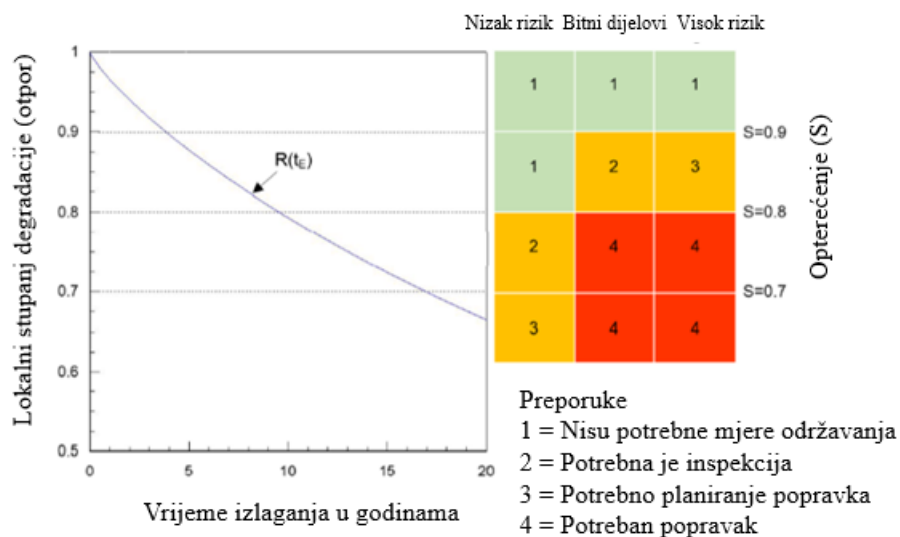
Strukturalno opterećenje integrira se u digitalnog blizanca putem komponente opterećenja, S . Komponenta konstantog opterećenje (eng. *load effect*) povezana je s kritičnim točkama (eng. *hot spots*) konstrukcije. Putem geometrijskih svojstava konstrukcije i svojstva materijala

procjenjuju su točke maksimalnog opterećenja na vjetroelektrana. Jedna od prednosti ovakvog tipa digitalnog blizanca koji se temelji na digitalnim fotografijama visoke rezolucije je mogućnost identifikacije, označavanja i procjene stanja određenih dijelova konstrukcije. Visoka rezolucija omogućuje i pregled manjih dijelova konstrukcije kao na primjer vijaka. Također se može vidjeti detaljno stanje zaštitnih premaza. Putem online alata BIIGLE 2.0 nakon identifikacije i označavanja dijelovi konstrukcije mogu se rangirati u već spomenute tri grupe s obzirom na rizik (niski rizik, bitni dijelovi, visoki rizik). [13]

Nakon svih spomenutih integracija dobiva se digitalni bliznac koji sadrži virtualnog blizanca koji se sastoji od 4 komponente vezane za koroziju: opterećenje dijelova i konstrukcije, model održavanja, otpornosti na koroziju te praćenje stanja konstrukcije, dijelove i zaštinog premaza putem alata BIIGLE 2.0. [13]

3.2.1.5 Prediktivno održavanje pomoću digitalnog blizanca

Prediktivno održavanje objašnjeno je pomoću grafičkog prikaza na slici 11.



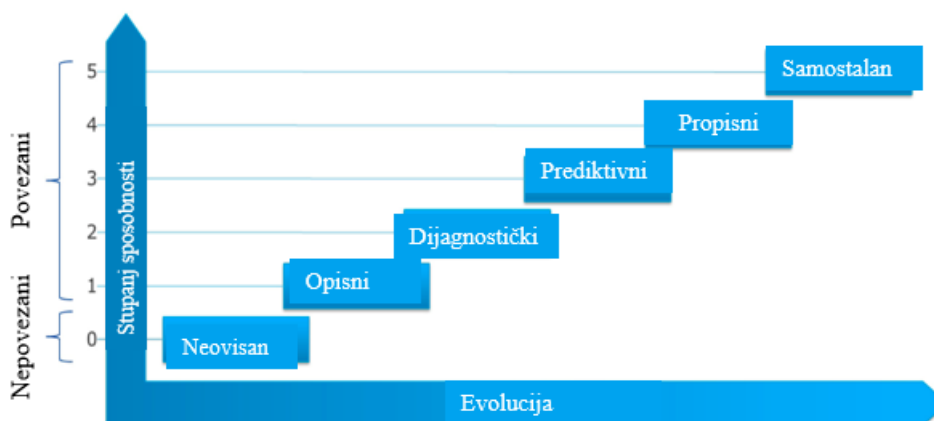
Slika 11. Matematički model održavanja i preporuke za održavanje [13]

Na grafičkom prikazu krivulja $R(t_e)$ predstavlja otpornost sustava, ona se dobiva pomoću jednadžbe (4). Ta krivlju također predstavlja $R(t_e)$ iz jednadžbe (3), točkaste linije predstavljaju vrijednosti S odnosno opterećenje iz jednadžbe (3). Sve točke gdje se sijeku krivulja $R(t_e)$ i točkaste linije sa konstantom vrijednosti S predstavljaju granicu stanja te potrebno je donijeti

odluke vezanu za raspored održavanja. Brojevi prikazani u matrici predstavljaju preporuke održavanja. Broj 1 predstavlja preporuku „Nisu potrebne mjere održavanja“, 2 predstavlja preporuku „potrebna je inspekcija“, broj 3 predstavlja preporuku „potrebno je planiranje popravka“, a broj 4 predstavlja preporuku „potreban popravak“. Na slici 11. također se može vidjeti da broj odnosno preporuka ovisi i o takozvanim kritičnim točkama (eng. *hot spots*). To su određeni dijelovi konstrukcije tornja vjetroelektrane koji predstavljaju manji ili veći rizik. Podijeljeni su u tri grupe: one s niskim rizikom (eng. *low*) koji ne predstavljaju kritičnu, zatim slijede bitni dijelovi (eng. *essential*), kao što je primjerice greda za ojačanje (eng. *stiffener*) i oni sa visokim rizikom (eng. *high*) kao na primjer šavni zavareni (eng. *seam weld*). [13]

3.3 Primjer primjene digitalnih blizanaca u podvodnim cjevovodima

Podvodni cjevovodi su složeni sustavi cijevi koji se nalaze na dnu mora kako bi se učinkovito prenosili sirovi materijali, poput nafte i plina, s morskih platformi na obalu. Da bi se osiguralo dugoročno i sigurno korištenje ovih cjevovoda u zahtjevnim morskim uvjetima, nužno je pažljivo projektiranje i održavanje. S obzirom na troškove nepredviđenih popravaka, istražuju se alternativne strategije operativnog održavanja kako bi se smanjili operativni troškovi (OPEX). Pri projektiranju infrastrukture poput podvodnih cjevovoda, moraju se uzeti u obzir različiti čimbenici. Temperaturne promjene na dnu mora mogu uzrokovati kontrakciju cjevovoda, dok toplina koja se oslobađa iz fluida unutar cjevovoda uzrokuje rastezanje materijala. Promjene temperature, tlaka, korozija i erozija uzrokovane morskim okolišem i strujanjima fluida predstavljaju dodatne izazove. Pravilna instalacija cjevovoda ključna je kako bi se izbjegli nepotrebna naprezanja, puknuća i deformacije. Stoga je važno odabrati odgovarajući materijal, debljinu cjevovoda, sustave zaštite, uzeti u obzir lokalne okolišne uvjete te pažljivo planirati budžet projekta. Napredak u informacijskim i komunikacijskim tehnologijama omogućio je bolja digitalna rješenja za upravljanje podvodnim sustavima. To rezultira povećanom efikasnošću, optimizacijom, smanjenjem troškova i većom sigurnošću podvodnih cjevovoda. Digitalizacija omogućuje smanjenje troškova kroz upotrebu senzora, računalne snage i pohranu podataka u oblak. DNV (Det Norske Veritas) definira šest razina digitalnih blizanaca (Slika 12.), pri čemu svaka razina omogućuje naprednije dijagnostičke i prediktivne sposobnosti za upravljanje podvodnim sustavima. [16]



Slika 12. Šest razina digitalnih blizanaca [16]

3.3.1. Automatizirano stvaranje digitalnog blizanca tijekom izgradnje

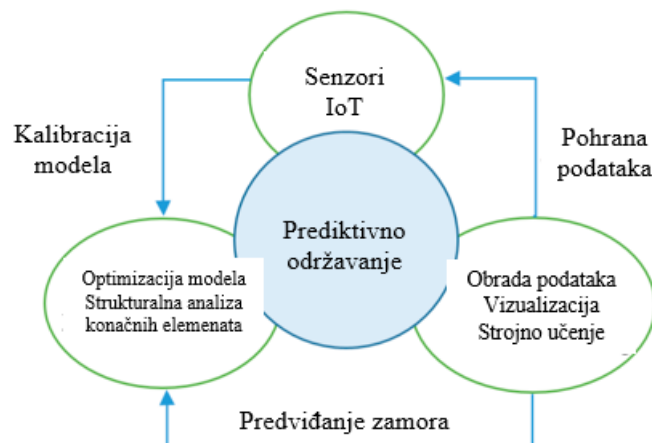
Budući da su podvodni cjevovodi jedinstvena infrastrukturna forma koja se postavlja tijekom izgradnje i služi za prijevoz opasnih i eksplozivnih tvari pod visokim tlakovima, njihova sigurnost mora biti ključna tijekom izgradnje, operativne uporabe i dugoročnog održavanja. Izrada digitalnog blizanca tijekom fizičke izgradnje cjevovoda omogućuje potpuno razumijevanje životnog vijeka konstrukcije. Na temelju ovog razumijevanja mogu se usmjeriti upravljanje izgradnjom, kontrola kvalitete, inženjering i očuvanje integriteta. Nakon završetka postupaka zavarivanja, spuštanja i polaganja cjevovoda, cijela konstrukcija zajedno s otvorom skenira se u konačnom položaju. Osim daljinskog snimanja, koriste se i druge tehnike praćenja konstrukcije, kao što su detekcija magnetskog protoka i akustična emisija, što pomaže u otkrivanju pukotina ili oštećenja na podvodnom cjevovodu. Automatizacija cjevovoda ostvaruje se pomoću digitalnog blizanca SubseaXD u oblaku tvrtke McDermott. SubseaXD koristi platformu 3D Experience i web-bazirano grafičko sučelje koje omogućuje stvaranje trodimenzionalnih digitalnih modela terena. Također, se integrira s platformom za upravljanje životnim ciklusom proizvoda (eng. *Product lifecycle management*, PLM), što pomaže u učinkovitom upravljanju svim resursima potrebnim za dizajniranje, pokretanje, testiranje, marketing i administraciju proizvoda. Automatizirani cjevovodi omogućuju značajne uštede u vremenu i smanjenje pogrešaka, čime se postiže i smanjenje troškova. [16]

3.3.2. Ažuriranje digitalnog blizanca sa informacijama dobivenim u inspekciji

Okoliš u kojem se nalaze podvodni cjevovodi predstavlja mnoge potencijalne opasnosti tijekom njihova životnog vijeka. Kako bi se iskoristila korist digitalnih blizanaca za konstrukcije koje nisu na kopnu, model digitalnog blizanca mora se redovito ažurirati s informacijama o koroziji i drugim problemima koji se mogu pojaviti tijekom vremena. Jedan od načina zaštite od korozije je primjena zaštitnih premaza na određene dijelove cjevovoda, a ti premazi se po potrebi mogu obnavljati. Ministarstvo prometa SAD-a kategorizira oštećenja na cjevovodima u pet kategorija: mehanička, operativna, korozijska, prirodne opasnosti i oštećenja treće strane. Inspekcija podvodnih cjevovoda često predstavlja izazov zbog velike dubine na kojoj se nalaze, što zahtijeva skupe procedure i opremu. Jedna od metoda inspekcije je tehnika ILI (In-line inspection), u kojoj se uređaji postavljaju unutar cijevi kako bi obavili inspekciju. Napredak u području satelitske tehnologije, računalstva u oblaku i algoritama dubokog učenja omogućava inženjerima preciznije praćenje stanja konstrukcija u stvarnom vremenu. Daljnji razvoj tehnologije satelitske komunikacije pruža nove mogućnosti za prijenos podataka s konstrukcija u stvarnom vremenu. Redovito ažuriranje digitalnog blizanca omogućava brzu procjenu sigurnosti imovine i pruža točnije informacije. [16]

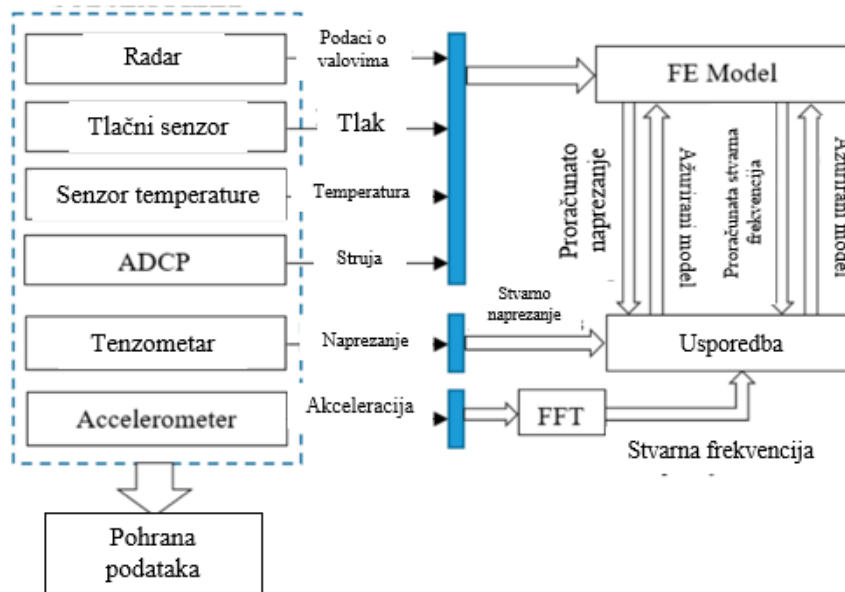
3.3.3. Planiranje održavanja temeljno na digitalnom blizancu

Digitalni blizanci imaju vrlo bitnu ulogu u današnjem dobu u različitim industrijskim sektorima, uključujući dizajn, proizvodnju i održavanje podvodnih konstrukcija. Održavanje je jedno od ključnih područja primjene digitalnih blizanaca jer značajno utječe na poslovne operacije. Shema sustava digitalnog blizanca za održavanje prikazana je na Slici 13. [16]



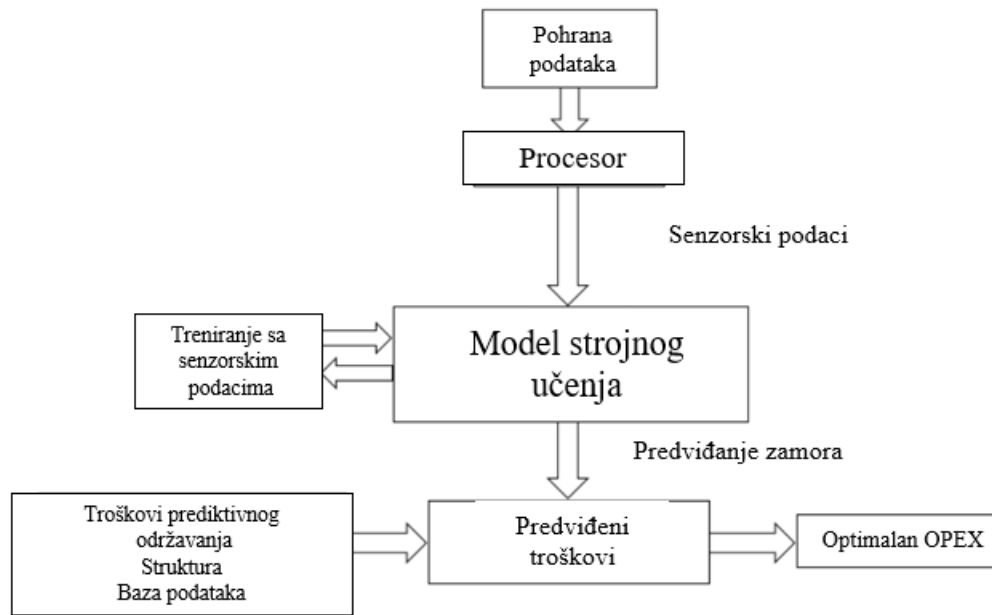
Slika 13. Shema sustava digitalnog blizanca za održavanje [16]

Postoji nekoliko metoda održavanja, pri čemu se posebno ističe prediktivno održavanje zbog njegove sposobnosti unaprjeđenja ekonomske učinkovitosti i raspoloživosti sustava. Ova metoda može smanjiti nepredviđene prekide jer je u stanju odrediti optimalno vrijeme za održavanje temeljem stvarnih uvjeta. Senzori na terenu, prikazani na Slici 14., ažuriraju model digitalnog blizanca kako bi sustav prediktivnog održavanja radio još učinkovitije. [16]



Slika 14. Senzori za ažuriranje digitalnog blizanca [16]

U sustavu koji se oslanja na podatke dobivene iz senzora, nalazi se i model konačnih elemenata (eng. *Finite Element*, FE), koji zajedno omogućuje predviđanje preostalog vijeka trajanja zbog zamora materijala (eng. *Remaining Fatigue Life*, RFL) cjevovoda. Poznavanje RFL-a dalje se koristi u procesu donošenja odluka o planiranju održavanja i izbjegavanju nepredviđenih prekida rada. Još jedna komponenta sustava digitalnog blizanca je IoT/senzorski sustav koji povezuje senzore s računalstvom u oblaku i analizom velikih količina podataka. Treća komponenta sustava je obrada podataka, u kojoj se koristi strojno učenje (eng. *machine learning*) kako bi se obradili podaci prikupljeni sensorima i pronašao RFL. Shema prediktivnog održavanja, koja se temelji na strojnom učenju i obradi podataka senzora, prikazana je na Slici 15. [16]



Slika 15. Shema prediktivnog održavanja, koja se temelji na strojnom učenju i obradi podataka senzora [16]

Kao što je već spomenuto, podvodni cjevovodi su izloženi raznim rizicima i potencijalnim oštećenjima u morskom okolišu, što može rezultirati značajnim ekonomskim i ekološkim posljedicama. Valovi i morske struje mogu uzrokovati pomicanje tla ispod cjevovoda, što može rezultirati deformacijama konstrukcije i nepotrebnim naprezanjima. Erozija unutar cjevovoda, uzrokovana visokim brzinama strujanja fluida, zajedno s korozijom i naprezanjem, može dovesti do puknuća i propuštanja. Digitalni blizanci koriste tehnologije strojnog učenja, dubokog učenja i umjetne inteligencije kako bi identificirali i rješavali navedene probleme. Oni pružaju visoko precizne modele koji se kontinuirano ažuriraju tijekom životnog vijeka cjevovoda putem senzora i inspekcija te omogućuju virtualno prikazivanje cjevovoda. Koraci koji se poduzimaju u planiranju održavanja cjevovoda uključuju:

- 1) Prikupljanje podataka
- 2) Razvoj kriterija rizika
- 3) Procjenu vjerojatnosti kvara i njegovih posljedica
- 4) Izračunavanje rizika i usavršavanje strategije inspekcije

Ovo je ključno za očuvanje sigurnosti i funkcionalnosti podvodnih cjevovoda u zahtjevnom morskom okruženju. [16]

3.4. Primjer primjene digitalnih blizanaca na cjevovodima u tlu

Procjena integriteta cjevovoda u vezi s korozijom temelji se na godišnjim nadzemnim pregledima i pregledima unutar cijevi, što je često skupo i neučinkovito. Nadzemni pregledi temelje se na očitanjima potencijala cijevi u tlu i daju indirektnu informaciju o riziku od korozije, ali ne i o brzini korozije. Alati za pregled unutar cijevi (eng. *in line inspection*, ILI) mogu otkriti znakove korozije, ali samo ako je ona dovoljno duboka (<10% debljine stijenke). Iako tada integritet cjevovoda još nije kompromitiran, korozija nije pravilno otkrivena i kontrolirana nadzemnim pregledima, te će u slučaju lošeg održavanja dalje napredovati i uzrokovati skupe iskope i popravke. Primjenom digitalnih blizanaca praćenje brzine korozije u cjevovodima postalo bi u potpunosti automatizirano te bi se mogli predvidjeti uzroci koji povećavaju brzinu korozije prije nego što se korozija otkrije prilikom slijedećeg ILI pregleda. Potrebna kalibracija modela digitalnog blizanca se provodi unosom podataka kao što su očitavanja potencijala, izlazi ispravljača, svojstva cjevovoda stanje premaza i podaci o tlu. Nakon provedene kalibracije digitalni blizanac se koristi za izračun gustoće struje i brzine korozije na oštećenjima premaza koje nije moguće dobiti tehnikama nadzemnih pregleda. [19]

3.5. Primjena digitalnih blizanaca u održavanju betonskih mostova

Pri održavanju betonskih mostova često se provode numerička modeliranja kojima se procjenjuje postojeće stanje mosta, ali to obično ne uključuje simulaciju stvarnog ponašanja pod utjecajima okoline. Digitalni blizanci mogu se koristiti za procjene sigurnosti, trajnosti i pouzdanosti konstrukcije mosta, te se njihovim korištenjem uzimaju u obzir svi stvarni uvjeti uključujući koroziju armature. U armiranobetonskim konstrukcijama korozija armature zbog klorida ili karbonatizacije je vrlo značajan mehanizam koji uvelike može smanjiti životni vijek betonske konstrukcije. J. Cervenka i suradnici su uz pomoć kemijsko-mehaničkog modela

digitalnog blizanca pratili inicijaciju i propagaciju klorida ili karbonatizacije. Spomenuti model primijenili su na most u Esslingenu u Njemačkoj (Slika 16.) u sklopu projekta Eurostars-2 E!10925 "cyberBridge". [20]



Slika 16. Fotografija mosta u Esslingenu [20]

Primjenom digitalnog blizanca razvili su kalibrirani numerički model postojeće mostne konstrukcije koji je korišten za procjenu vijeka trajanja istraživanog mosta uzimajući u obzir propadanje konstrukcije zbog korozije. Dokazali su produljenje vijeka trajanja za dodatnih 30 do 45 godina u odnosu na početno očekivano razdoblje. [20]

4. Zaključak

Primjena digitalnih blizanaca unaprijedila je razne industrije. Našla je i primjenu u praćenju korozijskih procesa i održavanju zaštitnih premaza i različitih konstrukcija. Iako se digitalni blizanci mogu koristiti već u fazi projektiranja, posebno se ističe njihov značaj u prediktivnom korozijskom održavanju. Prediktivnim održavanjem postižu se velike financijske uštede, a i sprječavaju havarije. Još jedna velika prednost primjene digitalnih blizanaca u korozijskom održavanju je virtualan prikaz i online praćenje konstrukcija koje se nalaze na nepristupačnim lokacijama. Kao primjeri takvih objekata, u radu su prikazane odobalne vjetroelektrane i

podmorski cjevovodi. Općenito, pa tako i u koroziji, ključan dio u razvoju digitalnog blizanaca je razvoj što točnijih matematičkih modela i njihova integracija u digitalnog blizanca kako bi on bio što preciznija replika fizičkog uređaja, procesa ili sustava. Također su bitni podaci dobiveni sensorima putem kojih digitalni blizanac dobiva podatke o raznim bitnim parametrima, a zatim putem matematičkih modela radi predikcije i replike. Stoga je razvoj digitalnih blizanaca tehnički i ekonomski zahtjevan. Iz obrađenih primjera zaključuje se da bi digitalni blizanci mogli biti vrlo koristan alat u predviđanju korozije i održavanju raznih objekata koji je unatoč zahtjevnoj izvedbi, dugoročno je isplativ.

5. Literatura

- [1] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C., Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, 2020.
- [2] Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., Calinescu, A., Digital Twins: State of the art theory and practice, Challenges, and Open Research Questions, 2022.
- [3] Agnusdei, G.P., Elia, V., Gnoni, M.G., Is Digital Twin Technology Supporting Safety Management? A Bibliometric and Systematic Review, 2021.
- [4] Grieves, M., Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, LLC, 2014.
- [5] Parrott, A., Warshaw, L., Industry 4.0 and the digital twin - Manufacturing meets its match, Deloitte university press, 2017.
- [6] URL: <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/digital-twin> (pristup 3.9..2023.)
- [7] Grübel J., Thrash T., L. Aguilar, M. Gath-Morad, J. Chatain, R.W. Sumner, C. Hölscher, V. R. Schinazi, The Hitchhiker's Guide to Fused Twins: A Review of Access to Digital Twins in situ in Smart Cities, 2022.
- [8] URL: <https://www.tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins> (pristup 3.9.2023.)
- [9] Martinez, S., prezentacija kolegija Metalni materijali, korozija i zaštita, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2023.
- [10] Stupnišek-Lisac, E., Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2007.
- [11] Otmačić Ćurković, H., prezentacija kolegija Elektrokemijsko i korozijsko inženjerstvo, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2023.
- [12] Travassosa, S.J., Almeida, M.B., Tomachuk dos Santos Catuognoc, C.R., de Melo, H.G., Non-destructive thickness measurement as a tool to evaluate the evolution of patina layer formed on weathering steel exposed to the atmosphere
- [13] A.W. Momber, T. Moller, D. Langenkamper, T.W. Nattkemper and D. Bruen

A Digital Twin concept for the prescriptive maintenance of protective coating systems on wind turbine structures, *Wind Engineering* (2021) 1-23.

[14] URL: <https://www.beasy.com/digital-twin.html> (pristup 5.9.2023.)

[15] Tellez-Schmill R., Vicent E., Mitigating corrosion with a digital twin, 2020 URL: <https://www.digitalrefining.com/article/1002512/mitigating-corrosion-with-a-digital-twin> (pristup 5.9.2023)

[16] Chen B.Q., Videiro P.M., Soares C. G., Opportunities and Challenges to Develop Digital Twins for Subsea Pipelines, 2022. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (2022)

[17] URL: https://www.google.com/search?q=off+shore+wind+turbine+pitting+corrosion&scas_esv=566055515&rlz=1C1GCEA_enHR851HR851&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwjZirmvt7GBAxVJhf0HHcYhDokQ_AUoAXoECAQQAaw&biw=1920&bih=934&dp=1#imgrc=XXW6bxjzVbCrWM&imgdii=W6U2GR4jk_vhZM (pristup 17.9.2023.)

[18] URL: <https://bil-ibs.be/en/project/fatcor-towards-longer-lifetime-offshore-wind-turbine-monopile-structures-better> (pristup 17.9.2023.)

[19] Baete C., Parker K., Pipeline Technology Conference 2023, Digital Twin model for proactive pipeline maintenance - An external corrosion case study <https://www.iecm.org/PTC%20Conference%20Paper%20Berlin%202023.pdf> (pristup 17.9.2023)

[20] Cervenka J., Jendele L., Zalsky J., Pukl R., Novak D., Digital twin approach for durability and reliability assessment of bridges, Conference paper, fib 2020 Symposium https://www.academia.edu/46631122/DIGITAL_TWIN_APPROACH_FOR_DURABILITY_AND_RELIABILITY_ASSESSMENT_OF_BRIDGES (pristup 18.9.2023.)

[21] Momber A.W., A data-based model for condition monitoring and maintenance planning for protective coating systems for wind tower structures; *Renewable energy* 186, (2022), 957 - 973

[22] URL: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/about/rd/acmsensor-e.html> (pristup 17.9.2022.)

[23] Brijder R., Review of corrosion monitoring and prognostics in offshore wind turbine structures: Current status and feasible approaches, *Front. Energy Res.* Volume 10, (2022)

[24] Stupnišek-Lisac E., Otmačić Ćurković H., Interna skripta kolegija Korozija i okoliš, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2015.