

# Nanotehnologija u zaštiti okoliša

---

Šilek, Martina

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:149:590611>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE**  
**SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ**

**Martina Šilek**

**ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, srpanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja **Martina Šilek**

Predala je izrađen završni rad dana: 26. lipnja 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

prof. dr. sc. Vesna Tomašić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Filip Car, viši asistent, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Stanislav Kurajica, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Mirela Leskovic, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 2. srpnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Martina Šilek

**NANOTEHNOLOGIJA U ZAŠTITI OKOLIŠA**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Vesna Tomašić

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Vesna Tomašić

dr. sc. Filip Car

prof. dr. sc. Stanislav Kurajica

Zagreb, srpanj 2024.

## SAŽETAK

Problemi vezani uz onečišćenje okoliša poznati su od davnina. S intenzivnim razvojem industrije i zbog sve većeg utjecaja različitih antropogenih učinaka na okoliš dolazi do sve izraženijeg onečišćenja zraka, vode i tla te do narušavanja kvalitete života i prirodne bioraznolikosti. Zbog toga je važno utjecati na ljudsku svijest i smanjiti neželjene antropogene utjecaje na sve ekosustave, jer u suprotnom svijetu prijeti ekološka katastrofa, čiji smo svjedoci već danas. Trenutno postoje različiti pristupi smanjenju onečišćenja okoliša, koji u manjoj ili većoj mjeri pridonose rješavanju navedenih problema. Svaki takav pristup ima svoje prednosti i nedostatke, a željeni cilj se često pokušava ostvariti i kombinacijom različitih metoda i tehnologija. U novije vrijeme, sve stroži kriteriji zaštite okoliša koji su propisani nacionalnim i europskim zakonodavstvom nameću potrebu za poboljšanjem postojećih i razvojem novih učinkovitijih metoda i tehnologija. Prema mišljenju mnogih znanstvenika i stručnjaka znanost i tehnologija imat će važnu ulogu u razvoju naprednih metoda, alata i tehnika neophodnih za rješavanje specifičnih kvantitativnih i kvalitativnih problema u zaštiti okoliša. Posebno velika očekivanja postavljaju se na razvoj nanotehnologija, čime će se unaprijediti postojeće stanje i omogućiti budući razvoj održivih i ekološki prihvatljivih tehnologija. Trenutno se razvijaju različiti nanomaterijali i na njima utemeljene tehnologije, koji su prikladni za sanaciju onečišćenja u okolišu, najčešće zbog velike specifične površine i visoke reaktivnosti. Primjenom takvih materijala postižu se i bolji rezultati, jer zbog veće interakcije s onečišćujućim tvarima ili onečišćivalima dovode do brzog smanjenja koncentracije neželjenog onečišćenja u okolišu. Međutim, osim pozitivnih, postoje i negativni učinci zbog kojih takvi materijali u nekim situacijama mogu predstavljati rizik za okoliš i ljudsko zdravlje. Zbog toga je, kao i kod tradicionalnih tehnologija, potrebno unaprijed predvidjeti potencijalne opasnosti vezane uz njihovu primjenu te ih na vrijeme spriječiti.

U ovom preglednom radu bit će analizirani specifični primjeri primjene naprednih nanomaterijala i na njima utemeljenih tehnologija, uključujući nano-adsorpciju, nano-filtraciju, nano-fotokatalizu te primjenu magnetskih nanočestica i nanosenzora. Poseban naglasak bit će dan na njihovu primjenu za pročišćavanje voda i otpadnih voda, pročišćavanje zraka i uklanjanje ostalih vrsta onečišćivala/zagađivala iz okoliša. S obzirom na brojne mogućnosti primjene takve tehnologije smatraju se zelenim tehnologijama i učinkovitim alatima za postizanje održivog razvoja. Osim pregleda postojećeg stanja u razvoju navedenih

nanomaterijala, u ovom preglednom radu bit će razmatran i učinak nanotehnologija na zdravlje ljudi te analizirane mogućnosti sprječavanja mogućih rizika vezanih uz ljudsko zdravlje i kvalitetu života ljudi.

***Ključne riječi:*** nanotehnologija, nanočestice, zaštita okoliša, obrada voda, ljudsko zdravlje

## ABSTRACT

Problems related to environmental pollution have been known for a very long time. With the intensive development of industrial production and due to the increasing influence of various anthropogenic impacts on the environment, there is an increasing pollution of air, water, and soil, as well as an impairment of quality of life and natural biodiversity. Therefore, it is important to raise human awareness of the issue and reduce unwanted anthropogenic impacts on all ecosystems, since otherwise the world is threatened by an ecological catastrophe, which we are already witnessing today. There are currently different approaches to reducing environmental pollution, which, to a greater or lesser extent, contribute to solving the problem. Each of these approaches has its advantages and disadvantages, and the desired goal is often tried to be achieved by combining different methods and technologies. More stringent environmental protection criteria recently prescribed by national and European legislation nowadays impose a need to improve the existing and develop new, more efficient methods and technologies. According to many scientists and experts, science and technology will play a significant role in the development of advanced methods, tools and techniques necessary to solve specific quantitative and qualitative problems in environmental protection. Particularly high expectations are placed on the development of nanotechnologies, which will improve the current situation and enable the future development of sustainable and environmentally friendly technologies. Nowadays, various nanomaterials and technologies based on them are being developed, suitable for remediation of environmental pollution, most often due to their large specific surface area and high reactivity. The use of such materials achieves better results, since due to the greater interaction with polluting substances or pollutants they lead to a rapid reduction in the concentration of unwanted pollution in the environment. However, beside these positive effects, there are also negative ones whereby such materials in certain circumstances can pose a risk to the environment and human health. Therefore, as with traditional technologies, it is necessary to anticipate potential hazards related to their application and prevent them in advance.

The present review paper will analyse specific examples of the application of advanced nanomaterials and technologies based on them, including nano-adsorption, nano-filtration, nano-photocatalysis, and the application of magnetic nanoparticles and nanosensors. Special emphasis will be placed on their ability to purify water and wastewater, as well as the air, and

to remove other different types of polluting substances/pollutants from the environment. Given the many possibilities of their application, such technologies are considered to be green and effective tools for achieving sustainable development. In addition to reviewing the current state of development of the said nanomaterials, the present review paper will also consider the impact of nanotechnologies on human health and analyse the possibilities for preventing possible risks related to human health and quality of life.

***Keywords:*** nanotechnology, nanoparticles, environmental protection, water treatment, human health



# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	3
2.1. Nanotehnologija – temeljne definicije i pojmovi .....	4
2.2. Pojave na nano razini.....	5
2.3. Oblici i svojstva nanomaterijala .....	7
2.4. Sinteza nanomaterijala.....	9
2.5. Vrste i karakterizacija nanočestica .....	12
2.6. Rizici vezani uz primjenu nanomaterijala .....	13
3. RASPRAVA I PERSPEKTIVNI DIO .....	15
3.1. Primjena nanomaterijala i nanotehnologija za smanjenje onečišćenja okoliša .....	16
3.1.1. Nano-adsorbensi .....	16
3.1.2. Nano-katalizatori .....	17
3.1.3. Nano-membrane .....	18
3.1.4. Magnetske nanočestice .....	19
3.1.5. Ostale vrste nanomaterijala .....	20
3.2. Primjena nanosenzora u zaštiti okoliša.....	22
3.3. Ostala potencijalna područja primjene .....	23
4. ZAKLJUČAK .....	25
5. LITERATURA .....	26

# 1. UVOD

Tijekom povijesti nije postojala ili je bila relativno slabo razvijena ekološka svijest, što je bilo uvjetovano vjerovanjem da je čovjek gospodar prirode koji prirodu treba podrediti svojim interesima te da je temeljni cilj gospodarstva pojedine države njezin ekonomski razvoj. Istodobno s pojačanim ugrožavanjem okoliša budi se i ekološka svijest koja teži usklađivanju intenzivnog industrijskog i gospodarskog razvoja s nastojanjima za očuvanjem i remedijacijom okoliša. Prema tome, intenzivni razvoj industrije doveo je do pojave ekološke krize, ali u isto vrijeme i do buđenja svijesti o potrebi očuvanja okoliša za buduća pokoljenja. Zbog toga je i rješavanje ekoloških problema nezamislivo bez ekološke svijesti pojedinaca i čitavog društva u cjelini. Samo uz postojanje ekološke svijesti, kao dijela opće društvene svijesti, moguće je postići značajnije iskorake u rješavanju problema vezanih uz zaštitu okoliša [1].

Onečišćenje okoliša prisutno je kako u zemljama u razvoju koje tek počinju razvijati moderne tehnologije, tako i u razvijenim zemljama koje su svojim nedovoljno kontroliranim razvojem u najvećoj mjeri pridonijele postojećem stanju u okolišu. Trenutno postoje brojne metode, postupci i tehnologije za smanjenje/uklanjanje različitih zagađivala/onečišćivala iz okoliša. Takve tehnologije razlikuju se s obzirom na ekosustav na koji se primjenjuju (zrak, voda, tlo), a uglavnom imaju određena ograničenja. Tradicionalne tehnologije, poput adsorpcije, koagulacije, naprednih oksidacijskih procesa koje često dolaze i u kombinaciji s elektrokemijskim i biološkim procesima često su primjenjivane tehnologije, međutim u novije vrijeme sve više ih potiskuju napredne nanotehnologije [2].

Nanotehnologije imaju velike potencijale u razvoju kemijske procesne industrije, a istovremeno mogu značajno utjecati na zaštitu okoliša, jer pridonose razvoju novih „zelenih“ tehnologija koje minimiziraju nastajanje nepoželjnih sporednih produkata i omogućavaju minimiziranje i/ili pročišćavanje otpadnih tokova. Nanotehnologije se zasnivaju na mogućnosti djelovanja na nano razinama prilikom nastajanja većih struktura, s temeljno novim značajkama i visokom molekularnom uređenošću [3].

Nanotehnologija, kao i sve ostale tehnologije koje se primjenjuju u praksi, može imati dva učinka: pozitivni i negativni. Naravno, dominiraju pozitivni učinci, te se zbog toga teži sve većoj primjeni nanotehnologije u postojećim procesima, kako zbog komercijalnih tako i zbog ekoloških čimbenika. Smatra se da će nanotehnologija biti jedna od ključnih tehnologija korištenih u nastojanju da se poboljša globalni okoliš u 21. stoljeću. Pozitivni učinci odnose se na poboljšanje učinkovitosti zaštite okoliša i snižavanje troškova proizvodnje smanjenjem

potrošnje energije i minimiziranjem nastajanja otpada. Kao dobar primjer može se navesti upotreba nanokatalizatora koji zahvaljujući velikoj specifičnoj površini katalizatora zahtijevaju manju koncentraciju skupih plemenitih metala kao aktivnih centara (što rezultira smanjenjem troškova proizvodnje), pri čemu su i čvršće vezani za nosač katalitički aktivne komponente (povećavajući vijek trajanja katalizatora). Pritom se istodobno može povećati selektivnost, odnosno proizvesti više željenog produkta reakcije, umjesto neželjenih sporednih proizvoda [4]. Negativni učinci nanotehnologija očituju se u tome što još uvijek ne postoji dovoljan broj znanstvenih istraživanja provedenih s ciljem procjene rizika za okoliš i ljudsko zdravlje neposredno vezanih uz primjenu nanomaterijala. Nedavna otkrića pokazuju da dimenzije na nanorazini imaju ključnu ulogu u procesima prijenosa takvih čestica u ljudskom tkivu te je stoga izuzetno važno razumijevanje učinaka nanomaterijala na ljudsko zdravlje [3].

Nanotehnologije oslanjaju se na temeljna znanja iz različitih znanstvenih disciplina kao što su fizika, kemija, biologija i inženjerstvo. Proizvodnja nanomaterijala, nanocjevčica, nanokompozita i nanofiltara i ostalih oblika nanočestica primjeri su primjene nanotehnologije sa specifičnim područjima primjene u zaštiti okoliša. Nano-adsorbensi, nano-filtracija, nano-fotokataliza, magnetske nanočestice i nanosenzori samo su neki primjeri nanotehnologija, koje se primjenjuju za obradu voda i otpadnih voda, pročišćavanje zraka i praćenje/monitoring onečišćenja u zraku. Stoga će u nastavku ovog rada biti detaljnije opisani.

## 2. TEORIJSKI DIO

Onečišćenje okoliša nedvojbeno je jedan od glavnih problema s kojima se suočava čovječanstvo. Zbog toga se istražuju nove tehnologije za smanjenje onečišćenja svih segmenata ekosustava, tj. za smanjenje onečišćenja zraka, vode i tla. Lebdeće čestice, teški metali, pesticidi, herbicidi, mineralna gnojiva, izlivanje nafte u okolišu, emisije štetnih plinova, industrijske otpadne vode, komunalne otpadne vode i sl. samo su neki od primjera brojnih onečišćujućih tvari koje dopijevaju u okoliš u nedozvoljenim koncentracijama i izazivaju nesagledive štete u okolišu. Za remedijaciju okoliša i njegovo vraćanje u prvobitno stanje moguće je primijeniti različite vrste materijala, postupaka i tehnologija. S obzirom da uklanjanje i razgradnja onečišćujućih tvari koje dopijevaju u okoliš može biti jako izazovan zadatak, nedavna istraživanja usmjerena su na razvoj i primjenu nanomaterijala, odnosno razvoj novih nanotehnologija za remedijaciju okoliša.

Nanotehnologija je posljednjih desetljeća dobila veliku pozornost zbog jedinstvenih fizičkih značajki nanomaterijala. Nanomaterijali pokazuju znatno bolju reaktivnost, a time i bolju učinkovitost u usporedbi s uobičajenim materijalima, zbog većeg omjera specifične površine i volumena. Osim toga, nanomaterijali pružaju brojne mogućnosti za iskorištavanje specifičnih fenomena na površini takvih materijala te se mogu dodatno funkcionalizirati ili modificirati uvođenjem različitih funkcionalnih skupina, što pridonosi poboljšanju njihove učinkovitosti s obzirom na specifično područje njihove primjene. Nadalje, optimiranje fizičkih značajki nanomaterijala (veličina, morfologija, poroznost) i kemijskog sastava može dovesti do dodatnih prednosti. Kemijska modifikacija površine nanomaterijala u kombinaciji s ugodivim fizičkim značajkama omogućava značajne prednosti u odnosu na uobičajene metode i tehnologije koje se primjenjuju u zaštiti okoliša. Biorazgradivi materijali također su iznimno zanimljivi za primjenu u zaštiti okoliša. Primjena biorazgradivih materijala može dovesti do povećanja povjerenja potrošača i rezultirati boljim prihvaćanjem određene tehnologije, a također može ponuditi zeleniju i sigurniju alternativu za remedijaciju okoliša.

Selektivno uklanjanje ciljanih onečišćujućih tvari, ekonomičnost, olakšana sinteza, primjena načela „zelene“ kemije, netoksičnost, biorazgradivost, mogućnost recikliranja i potencijal za oporabu nakon uporabe (regeneracija i/ili reaktivacija) neki su od ključnih izazova koji se moraju uzeti u obzir pri razvoju naprednih nanomaterijala s potencijalnom primjenom u zaštiti okoliša.

## 2.1. Nanotehnologija – temeljne definicije i pojmovi

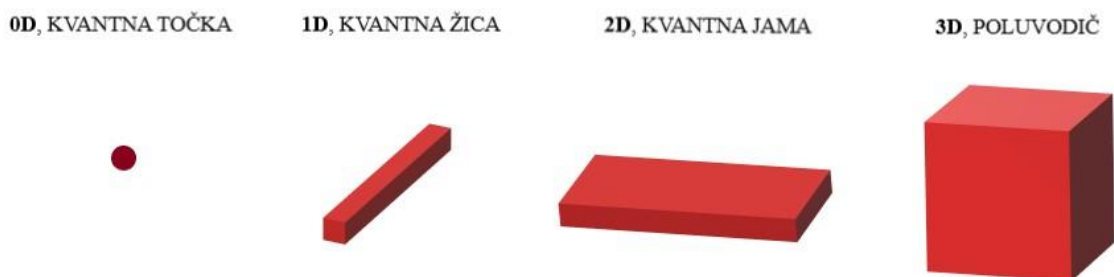
Pojam nanotehnologija teško je definirati zbog kontinuiranog razvoja i novih otkrića u ovom području. Nacionalna Nanotehnološka Inicijativa (NNI) (engl. National Nanotechnology Initiative), tj. inicijativa američke vlade za razvoj i istraživanje nanotehnologije pod pojmom nanotehnologije podrazumijeva razumijevanje i kontrolu materije na nanorazini s karakterističnim dimenzijama od 1 do 100 nanometara [5]. Općenito govoreći, nanotehnologija je interdisciplinarna grana znanosti i inženjerstva koja se bavi kreiranjem naprednih materijala na razini atoma i molekula. Pritom se na nanomaterijale ne primjenjuju uobičajena i opće prihvaćena načela fizikalnih i kemijskih znanosti, jer izgled, žilavost, vodljivost i osjetljivost materijala drastično se mijenjaju od nano- do makro-razine. Na primjer, ugljikove nanocijevi su stotinu puta jače od čelika, ali i šest puta lakše. Prema očekivanjima, primjena nanotehnologije imat će značajan utjecaj na održivi razvoj, uključujući gotovo sve industrijske sektore, promet, energiju, napredne materijale za različite namjene, zdravstvenu djelatnost, poljoprivredu i komunikacijske tehnologije.

Nanotehnologija može pridonijeti uštedi resursa kroz poboljšanje učinkovitosti primjene obnovljivih izvora energije, smanjenu potrošnju materijala i mogućnost zamjene tradicionalnih materijala koji dolaze iz ograničenih resursa s alternativnim nanomaterijalima [6]. Nanotehnologija ima veliki potencijal u poboljšanju kvalitete zraka, vode i tla u okolišu. Također može olakšati detekciju i praćenje/monitoring koncentracije onečišćivala u okolišu te pomoći pri razvoju novih tehnologija za sanaciju/remedijaciju okoliša. Razumijevanje procesa nastajanja i rasta nanočestica (npr. u sustavu izgaranja) također omogućuje razvoj učinkovitijih metoda za smanjenje nastajanja zagađivala, npr. tijekom procesa izgaranja i smanjenja njihovih emisija u okoliš. Iako nanotehnologija ima velike potencijale u zaštiti okoliša, postoji i velika zabrinutost zbog potencijalnog ispuštanja nanomaterijala u okoliš i s tim povezanih opasnosti i rizika za zdravlje ljudi. Međutim, takvi su problemi prisutni kod uvođenja svih novih tehnologija. Sposobnost identificiranja i kvantificiranja prisutnosti toksičnih tvari u okolišu primjenom naprednih nano-senzora jedan je od prvih koraka u zaštiti okoliša. Stoga nanotehnologija može značajno pridonijeti razvoju poboljšanih sustava za praćenje stanja u okolišu s obzirom na kriterije o dozvoljenih emisija propisane zakonodavstvom [6,7].

## 2.2. Pojave na nano razini

Kvantna teorija nam objašnjava odnos između energije elektrona i energije zračenja pri čemu su vrlo značajni znanstvenici postavili teorije ponašanja elementarnih čestica, odnosno kvanata. Max Planck proučavao je promjenu intenziteta zračenja promjenom temperature tijela i valne duljine te utvrdio da svaka molekula ili atom može primiti ili dati bilo koju količinu energije koja je ravnomjerno podijeljena na sve moguće titraje, tj. kretanje molekula ili atoma, pri čemu možemo izračunati energiju svjetlosnog kvanta pomoću Planckove konstante:  $h=6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$  ( $E = h\nu$ ). Teorija za koju je zaslužan Albert Einstein je od velikog značaja zbog tumačenja fotoelektričnog efekta koji govori da kvanti svjetlosti, fotoni cijelu energiju pretvaraju u energiju fotoelektrona, pri čemu se dio energije upotrebljava na izlazni rad elektrona, dok preostali dio energije ostaje kao kinetička energija fotoelektrona. Primjenom Planckove kvantne teorije i Einsteinove teorije fotoelektričnog efekta, Niels Bohr je pretpostavio da kretanjem elektrona oko jezgre, odnosno protona u određenim putanjama (dopuštenim putanjama) elektron ne emitira energiju. Vodikov atom čiji elektron kruži na određenoj putanji oko jezgre može emitirati kvant svjetlosti ( $h\nu$ ) samo kada elektron skoči na određenu putanju bliže jezgri na kojoj ima manju energiju, i to manju upravo za energiju zračenja [8].

Prema [9] ekscitoni su parovi elektronskih šupljina u kojima elektron prelazi iz valentne u vodljivu vrpcu. Bohrov radijus ekscitona, veličine nekoliko nanometara u poluvodičima, predstavlja prosječnu udaljenost elektrona i šupljine koja ovisi o vrsti tvari. Kvantnim ograničenjem su ekscitoni ograničeni u jednoj, dvije ili tri prostorne dimenzije pri čemu takva poluvodička nanočestica naziva kvantnom jamom, kvantnom žicom ili kvantnom točkom. Kvantne točke su nanokristali, odnosno ekscitoni ograničeni u sve tri prostorne dimenzije i imaju energijska stanja poput atoma. Kvantne žice su za razliku od kvantnih točaka su vodiči, ali kvantno ograničenje znatno utječe na prijenos elektrona. Kvantna jama je tanki sloj poluvodiča smješten između dva sloja drugog poluvodiča i ima jednu dimenziju reda veličine Bohrova radijusa ekscitona.



**Slika 1.** Prikaz ekscitona u prostornim dimenzijama (preuzeto i preuređeno prema [9])

Promjena odnosa površine i volumena čestice iz makrorazine na nanorazinu dovodi do promjene kemijskih i drugih svojstava materijala, pri čemu je omjer između atoma na površini čestice i atoma u unutrašnjosti čestice vrlo velik. Atomi na površini imaju slobodne valencije i veću energiju za razliku od atoma u unutrašnjosti koji ostvaruju sve kemijske veze, a razlog tome je okruženje atoma u kristalnoj rešetci pri čemu imaju mogućnost ostvarivanja kemijskih veza sa susjednim atomima. Svaka kemijska veza pridonosi smanjenju ukupne energije kristala čineći kristal stabilnijim. Veća energija ima značajne posljedice na brojna kemijska i fizikalna svojstva materijala poput kemijske reaktivnosti, katalitičke aktivnosti, korozivnosti, topljivosti, temperature taljenja itd. [9].

Gravitacijska privlačenja nanočestica su zanemariva zbog izuzetno male mase nanočestica. Gravitacijska sila ovisi o udaljenosti tijela i masi prema jednadžbi:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

gdje je  $G$  gravitacijska ili Newtonova konstanta koja je približne vrijednosti  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ,  $r$  je udaljenost dvaju tijela, a  $m_1$  i  $m_2$  su mase tijela. Elektromagnetska sila je funkcija naboja i udaljenosti i ne ovisi o masi, stoga je vrlo značajna na nanorazini:

$$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

gdje je  $k_e$  Columbova konstanta vrijednosti  $8,9876 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ , a  $q_1$  i  $q_2$  su naboji tijela.

Tijela koja imaju manju masu imaju brže mehaničko gibanje stoga tijela nanodimenzija mogu rotirati, oscilirati i sl. vrlo brzo u odnosu na tijela većih dimenzija jer nasumično gibanje na makrorazini ne dolazi do izražaja.

### 2.3. Oblici i svojstva nanomaterijala

Nanočestice su čvrste čestice veličine 1-100 nm, a mogu biti monokristalne ili polikristalne (agregati kiselina). Svojstva vrlo malih nanočestica često se razlikuju od svojstava makromaterijala te svojstava atoma ili molekula. Nanočestice mogu biti kristalinične ili amorfne. Monokristalne čestice veličina do 100 nm nazivaju se nanokristalima. Vrlo male čestice, odnosno skupine atoma (ili molekula) do 50 jedinica nazivaju se nanoskupinama (engl. cluster).

Ograničenje od 50 jedinica često se ne uvažava, pa se često nanoskupinom ponekad nazivaju i znatno veće čestice. Dok nanočestice imaju karakteristične dimenzije manje od 100 nm u sve tri prostorne koordinate, nanovlakna (engl. nanofibers) imaju samo dvije dimenzije na nanorazini. Nanoštapić (engl. nanorod) je kruto nanovlakno, nanocjevčica (engl. nanotube) je šuplje vlakno, a nanožica (engl. nanowire) je električki vodljivo nanovlakno. Nanomaterijalima se smatraju statični objekti poput nanočestica koji imaju jednu ili više dimenzija u području nanoveličina, čija su nova svojstva (različita od makroobjekata istog materijala) rezultat njihove male (nanometarske) veličine.

U nanomaterijale ubrajaju se i materijali koji su nanostrukturirani. **Nanostrukturirani materijali** odnose se na materijale koji se sastoje od elemenata s jednom ili više dimenzija na nanorazini [9]. Najčešće upotrebljavani nanomaterijali su ugljične nanocjevčice, silikon, razni metali i metalni oksidi. Proizvodi koji u sebi mogu sadržavati ugljične nanocjevčice su: baterije, superkondenzatori, fotoćelije i sl. Proizvodi koji u sebi sadrže fini ugljični prah su: automobilske gume, koža, antistatički tekstil i sl. Mikroelektronika, proizvodi za solarnu energiju, bio senzori i ostali biotehnoški proizvodi u sebi sadrže silikone i njihove okside. Metalni oksidi poput:  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  i  $\text{CeO}_2$ , upotrebljavaju se u proizvodima za zaštitu od sunca, proizvodima za osobnu higijenu, procesima katalize, sensorima kisika, prehrambenim dodacima i sl. [10].

Morfologija nanoskupina ovisi o strukturnim i elektronskim brojevima za razliku od materijala promatranih na makrorazini, čija morfologija ovisi o strukturi i brzini rasta pojedinih ploha na kristalu koji je sastavljen od jediničnih ćelija, pri čemu su atomi pravilno raspoređeni unutar trodimenzijske strukture. Kristalna struktura velikih nanoskupina neće imati jednaka svojstva kao struktura malih nanoskupina. Velike nanoskupine imaju jednaku kristalnu strukturu kao makromaterijali, međutim nanoćelije su blago kontrahirane. Atomi vrlo malih nanoskupina pozicionirani su na površini, pri čemu imaju manja ograničenja kretanja i mogu se više udaljavati od ravnotežnih položaja u kristalnoj rešetci, što rezultira promjenom strukture



čestice. Strukturni magični brojevi opisuju količinu atoma koji izgrađuju nanočesticu, odnosno česticu minimalnog volumena, maksimalne gustoće i minimalne površine. Promjenom veličine čestice mijenja se broj atoma u skupini koji ovisi o elektronskoj strukturi. Različitim elektronskim strukturama atoma, niz brojeva atoma u skupini je karakterističan za svaki element. Elektronski magični brojevi određuju stabilnost nanoskupina, pri čemu je utvrđeno masenom spektroskopijom nanočestica natrija da su nanoskupine s brojem atoma u nizu:  $N = 3, 9, 20, 36, 61$  stabilnije i učestalije.

Na vodljivost nanomaterijala i nanostrukture mogu utjecati intrinzični doprinosi, nečistoće, kvantno ograničenje, strukturni defekti, uređenost mikrostrukture i dr. Struktura nanomaterijala može biti različite izvedbe i takve strukture nazivaju se kiralnim, pri čemu posjeduju izuzetna električna svojstva. Ugljikove nanocjevčice mogu imati dvije strukture: cik-cak i struktura naslonjača. Ukoliko je nanocjevčica naslonjačke strukture, bit će dobre vodljivosti, dok su ostale strukture cjevčica poluvodiči.

Nanočestice pokazuju imaju dobru izraženost optičkih svojstava. Nanoefekt, kojim se nanočestice čija je dimenzija manja od valne duljine vidljive svjetlosti, odnosno 400 nm dispergiraju u transparentnom materijalu ne narušavaju njihovu transparentnost, a mogu mijenjati boju materijala i druga fizička svojstva.

Magnetna svojstva nanomaterijala razlikuju se od magnetskih svojstava makromaterijala te ovise o vrsti atoma, kristalnoj strukturi, naprezanju, obliku i veličini zrna i temperaturi. Ukupni magnetski moment predstavlja sumu magnetskih momenata svih elektrona, uključujući međusobna poništavanja, pri čemu se atomi podjeljuju u dvije skupine: paramagnetski (posjeduju nesparene elektrone) i dijamagnetski (bez nesparenih elektrona). Nanomagnetski materijali se upotrebljavaju pri izradi tvrdih diskova.

Temperatura taljenja se opisuje kao temperatura pri kojoj atomi, ioni ili molekule posjeduju dovoljnu količinu energije kojom svladavaju kemijske veze, odnosno privlačne sile unutar kristalne rešetke. Na makrorazini, temperatura taljenja ne ovisi znatno o veličini čestica materijala, dok smanjivanjem veličina čestica u nanopodručje dolazi do sniženja temperature taljenja, a razlog tome je visoka površinska energija nanočestica. S druge strane, toplinski kapacitet nanočestica viši je od toplinskog kapaciteta makromaterijala. Nanomaterijali imaju manju toplinsku vodljivost od makromaterijala, pri čemu povećavaju toplinsku otpornost pa se mogu koristiti kao termo izolatori i smanjiti gubitke energije.

Mehanička svojstva materijala opisuju djelovanje sile na materijal. Osnovno mehaničko svojstvo je čvrstoća. Čvrstoća nanomaterijala može se opisati Hall-Petch učinkom koji definira ovisnost čvrstoće materijala o veličini zrna, pri čemu se sa smanjenjem veličine

zrna čvrstoća materijala povećava. Nanomaterijali mogu imati i povećane čvrstoće pri visokim temperaturama. Ukoliko u materijalu postoji i mali udio nanočestica, može se povećati tvrdoća materijala jer se nanokristali smještaju duž granica zrna makrokristala i onemogućuju propagaciju pukotine.

Nanomaterijali imaju određena kemijska svojstva koja se razlikuju od makromaterijala. U nastavku ovog odlomka bit će opisana reaktivnost, katalitička i korozijska svojstva i toksičnost nanočestica kojima se ukratko dobiva bolji uvid u pozitivne i negativne kemijske učinke nanočestica.

Nanočestice su reaktivnije od makročestica, a razlog tome je promjena termodinamičkog utjecaja i kinetičkih čimbenika, odnosno veća površinska energija uzrokovana većim brojem atoma na površini. Prema [9] oblik nanočestica utječe na katalitičku aktivnost, pa će čestice s više bridova i kutova biti reaktivnije od sferičnih čestica, a oblik čestica također utječe i na selektivnost katalizatora. Katalitički procesi su nam vrlo važni u zaštiti okoliša jer katalizatori ubrzavaju kemijsku reakciju smanjenjem energije aktivacije pri čemu se postiže ravnotežno stanje. Nanočestice su izvrsni katalizatori zbog svoje velike specifične površine, odnosno veće kontaktne površine od makročestica koju ostvaruju s reaktantima, pri čemu pokazuju veliku učinkovitost u katalitičkim procesima. Nanokatalizatori se sve više upotrebljavaju i zbog ekonomske isplativosti. Primjena nanokatalizatora je šarolika, a kao najpoznatiji katalitički procesi pomoću nanočestica je proces poboljšanja tehnologija gorivih ćelija i proizvodnja ugljikovih nanocjevčica CVD metodom. Velika reaktivnost metalnih nanočestica uzrokuje bržu i lakšu koroziju te da bi se spriječilo korodiranje, koriste se stabilizatori koji se kemijski vežu na površinu nanočestica.

Nanostrukturirane slitine posjeduju značajnu korozijsku otpornost, jer posjeduju manje mikro strukturnih defekata i nehomogenosti na kojima korozija započinje pa su manje podložni mehaničkim oštećenjima izazvanim korozijskim procesima. Budući da nanomaterijali imaju uvelike pozitivnih učinaka, važno je napomenuti i negativne. Nanomaterijali u interakciji s organizmom mogu djelovati toksično, pri čemu izazivaju promjene u metabolizmu, replikaciji DNA ili izazivaju promjene na peptidima i proteinima, a poznato je da su takve promjene uzročnici Jakobove, Parkinsonove, Creutzfeldove i Alzheimerove bolesti.

## 2.4. Sinteza nanomaterijala

### *Biološke metode*

Zelena sinteza ili bio sinteza značajna je za istraživanje i razvoj nanomaterijala. Pripada zelenoj kemiji kojoj je primarni cilj smanjiti onečišćenja/zagađenja u okolišu i upotrebu toksičnih materijala štetnih za okoliš. Zelena sinteza smatra se vrlo pouzdanom i ekološki prihvatljivom budući da se ne koriste toksične kemikalije i zahtjeva manje energije za stvaranje produkata. Zelena sinteza nanomaterijala uključuje redoks procese, pri čemu metalni organizmi reduciraju metalne ione u stabilne nanomaterijale koristeći svoje enzime redukcije ovisne o NADPH (nikotinamidadeninukleotid fosfat hidrogen). Nanomaterijali sintetizirani biološkom sintezom uz korištenje različitih komponenti sinteze poput mikroorganizama (bakterije, virusi, gljivice, kvasci) i biljnih ekstrakata poznati su kao biogeni nanomaterijali. Biogeni nanomaterijali imaju visoku biokompatibilnost i osjetljivost te stoga imaju raznoliku primjenu u biomedicini, poljoprivredi, elektronici i remedijaciji okoliša [11].

### *Fizikalne metode*

Postoji više vrsta fizikalnih metoda za sintezu nanočestica. Jedna od tih metoda je **toplinska razgradnja** za koju se smatra da je najjednostavnija i najekonomičnija u usporedbi s drugim konvencionalnim metodama. Toplinska razgradnja endotermni je proces koji uključuje korištenje topline za kemijsku razgradnju spoja, pri čemu dolazi do sintetiziranja nanočestica. Sinteza nanočestica toplinskom razgradnjom postaje sve važnija jer je jednostavno kontrolirati uvjete reakcije, kao i veličinu čestica te strukturu i čistoću.

Druga fizikalna metoda sinteze nanočestica je **laserska ablacija** pomoću koje se mogu sintetizirati različite vrste nanomaterijala (nanotočke, nanocijevi). Ova metoda ne uključuje rad pri visokim temperaturama ni kemijske reagense, pa se smatra ekološki prihvatljivom. Prednost ove metode je proizvodnja nanomaterijala sa željenim svojstvima kao što su veličina, oblik, struktura i sastav nanočestica jer ovise o parametrima laserske zrake (energija pulsa, brzina ponavljanja). Veličina čestica koje se mogu dobiti laserskom ablacijom je 10 nm [12].

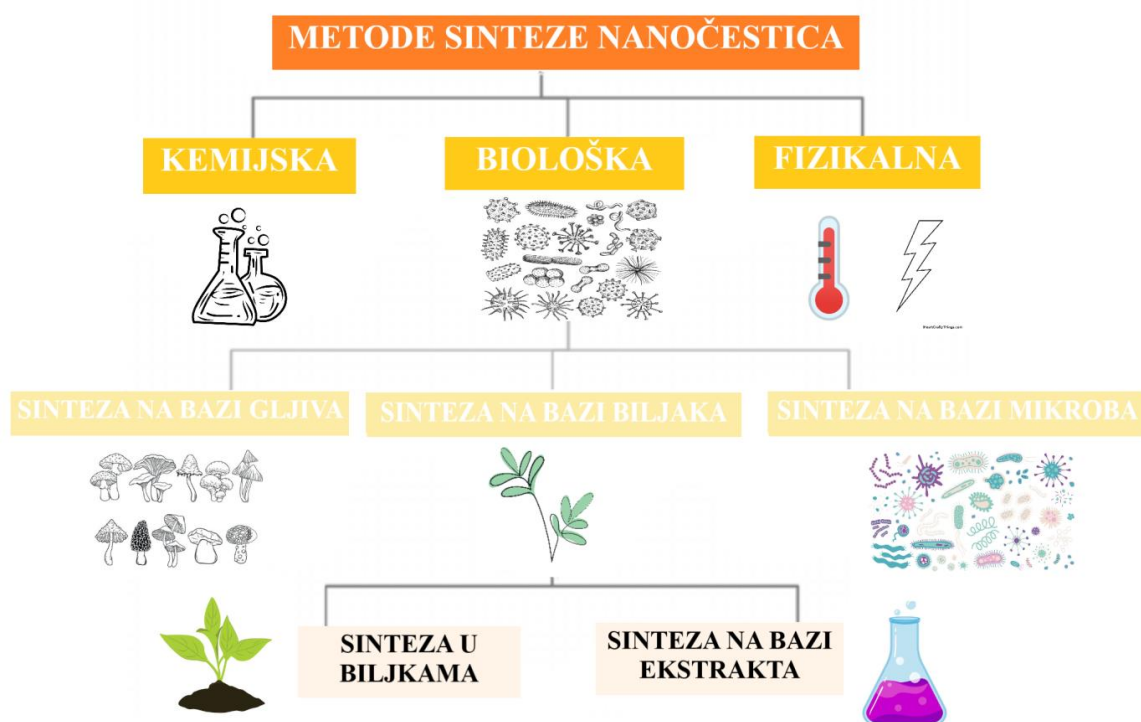
**Metoda radiofrekvencijske toplinske plazme sinteze** nanočestica smatra se korisnom metodom, posebno za biomedicinski materijal koji nije kompatibilan s određenim vrstama kemikalija. Metoda se provodi pri atmosferskom tlaku. Korisna je zbog visoke reaktivnosti uzrokovane visokom temperaturom, sposobnosti stvaranja nanočestica iste veličine i visokog

stupnja proizvodnje. Prethodnim spoznajama utvrđeno je da se čestice zlata ne mogu sintetizirati ovom metodom.

### *Kemijske metode*

**Sol-gel metoda** uključuje toplinsku razgradnju, kondenzaciju i hidrolizu prekursora metala ili alkoksida, pri čemu nastaje stabilna otopina nazvana sol. Takva otopina nakon kondenzacije ili hidrolize stvara gel koji povećava viskoznost. Veličina čestica u gelu može se promatrati promjenom pH vrijednosti prekursora, temperature i koncentracije [14].

**Metode potpomognute mikrovalovima** koriste se za sintezu oksida, sulfida i hidroksida nanočestica. Metoda je jednostavna i ekološki prihvatljiva. Sonokemijska metoda služi za pretvorbu metalnih soli u metalne okside pomoću paladija i vode uz korištenje ultrazvučne energije.



**Slika 2.** Putevi sinteze nanočestica (preuzeto i prilagođeno prema [13])

## 2.5. Vrste i karakterizacija nanočestica

Nanočestice se prema vrsti materijala, dimenzijama ili 3D strukturama i podrijetlu mogu podijeliti u nekoliko kategorija zavisno o podrijetlu, strukturi i kemijskom sastavu [2].

### *a) Podjela prema podrijetlu*

Nanočestice mogu biti prirodnog ili sintetičkog podrijetla. Prirode nanočestice nastaju u prirodi biološkim procesima i organizmima ili su rezultat ljudske aktivnosti. Sintetičke ili projektirane nanočestice su nanomaterijali proizvedeni mehaničkim procesima ili kemijskim, fizikalnim i biološkim procesima pojedinačno ili u kombinaciji.

### *b) Podjela prema strukturi*

S obzirom na osnovnu strukturu nanočestice mogu se svrstati u tri skupine: jednodimenzijske (1D), dvodimenzijske (2D) i trodimenzijske (3D). Jednodimenzijske nanočestice su tanki filmovi u rasponu veličina od 1 do 100 nm. Dvodimenzijske nanočestice općenito uključuju nanocijevi, npr. ugljikove nanocijevi. Trodimenzijske nanočestice sastoje se od dendrimera, kvantnih točaka i fulerena.

### *c) Podjela prema kemijskom sastavu*

Nanomaterijali se nadalje mogu klasificirati prema kemijskom sastavu materijala od kojeg su izrađeni na: anorganske tvari, organske tvari, tvari koje sadrže ugljik i kompozitne tvari. Nanomaterijali izrađeni iz anorganskog materijala sadrže metal ili metalni oksid, npr. zlato, srebro, titanijev dioksid, cinkov oksid ili spojevi na bazi silicija. Organski nanomaterijali dobivaju se iz organske tvari, a prisutni su u različitim oblicima, poput micela, liposoma i polimernih čestica. Nanočestice na bazi ugljika sastoje se od fulerena, nanocijevi i nanovlakana, a najčešće dolaze u dvodimenzijskim morfološkim oblicima [2]. Kompozitne čestice po svojoj prirodi su heterogene, odnosno višekomponentne, pri čemu se jedna komponenta kombinira s drugima što dovodi do nastajanja složenih struktura (npr. nanočestice zlata u kombinaciji s keramičkim ili polimernim materijalom).

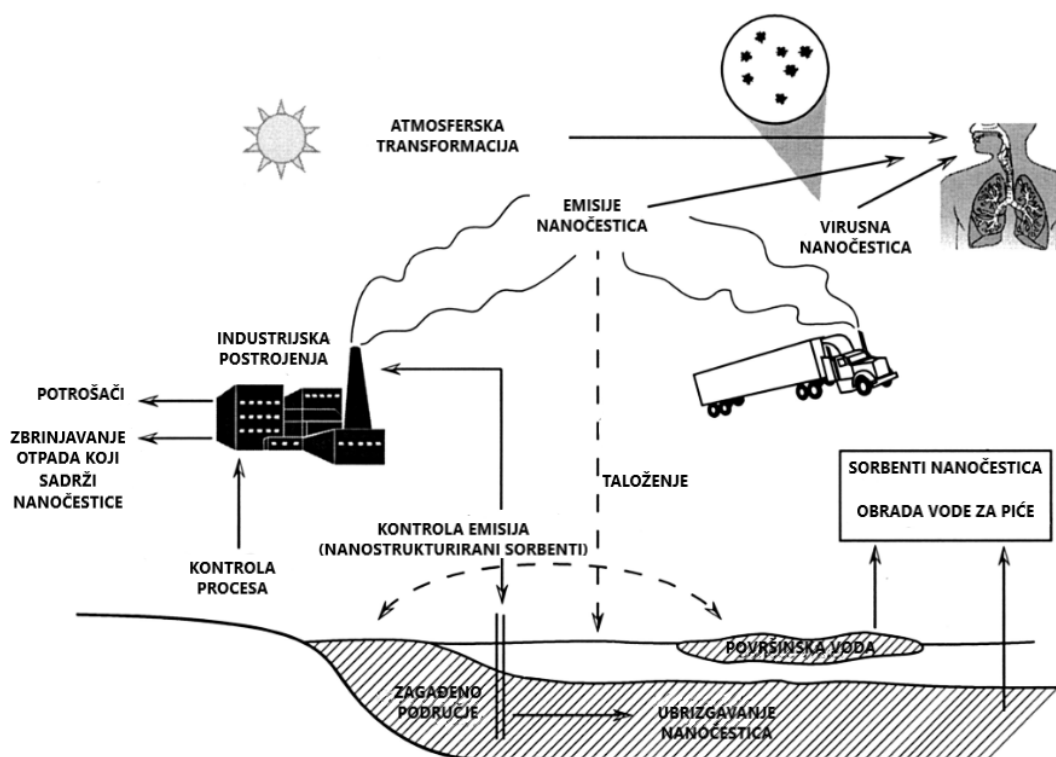
## 2.6. Rizici vezani uz primjenu nanomaterijala

Odlučujući čimbenik pri procjeni rizika izloženosti nanočesticama je način na koji nanočestice dolaze u dodir s ljudima i okolišem. Ključne informacije odnose se na to kako se nanočestice oslobođene iz materijala ponašaju u okolišu, koliko su takvi oblici stabilni i dugotrajni, raspadaju li se ili aglomeriraju, jesu li topljivi u vodi i tjelesnim tekućinama, stupaju li u interakciju s drugim nanočesticama, kemikalijama, površinama ili se razgrađuju i kako se njihova svojstva mijenjaju u procesima. Činjenicom da je veličina nanočestica vrlo malena, lako se mogu širiti zrakom. U tlu, zbog svojih velikih aktivnih površina, nanočestice mogu vezati i mobilizirati zagađivača poput teških metala i organskih tvari i stoga predstavljati prijetnju podzemnim vodama [13]. Teško je predvidjeti kako i gdje će se nanomaterijali ispustiti u okoliš zbog široke primjene nanomaterijala i načina na koje mogu dospjeti u okoliš. Određeni industrijski procesi tijekom proizvodnje nanomaterijala, kao što su odlaganje ili habanje suhih prahova, često može biti povezano s njihovim oslobađanjem. Nanočestice metalnog oksida sastavni su dio industrijskih materijala koji se koriste kao aditivi u kremi za sunčanje, kozmetici, lijekovima i bojilima za hranu, pri čemu se izravno nanose na kožu ili u organizam te ispiranjem kože ili njihovim konzumiranjem nanočestice mogu završiti u vodenim ekosustavima putem otpadnih voda. Brojnim eksperimentima utvrđeno je da količina veća od dopuštene količine nanomaterijala prisutnih u vodenom ekosustavu može smanjiti rast, reprodukciju, kretanje i hranjenje vodenim bićima. Koža je obično jako izložena krutim nanočesticama primjenom losiona ili kreme koje sadrže  $\text{TiO}_2$  ili  $\text{ZnO}$  kao komponentu za zaštitu od sunca ili vlaknastih materijala obloženih tvarima na nano razini [14, 15]. Nanomaterijali koji predstavljaju moguće rizike na ljudsko zdravlje prikazani su u tablici 1.

**Tablica 1.** Mogući rizici od nanomaterijala na zdravlje (preuzeto i prilagođeno prema [15])

Nanomaterijali	Mogući rizici
Ugljični nanomaterijali, nanočestice silicija	Plućna upala, granulomi i fibroza
Nanomaterijali ugljika, srebra i zlata	Distribucija u organe, uključujući središnji živčani sustav
Kvantne točke, nanočestice ugljika i TiO <sub>2</sub>	Prodiranje u kožu
MnO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , nanočestice ugljika	Mogu prodrijeti do mozga preko olfaktornih neurona nazalnog epitela
TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , nanočestice čađe, kobalta i nikla	Mogu biti otrovniji od mikronskih čestica

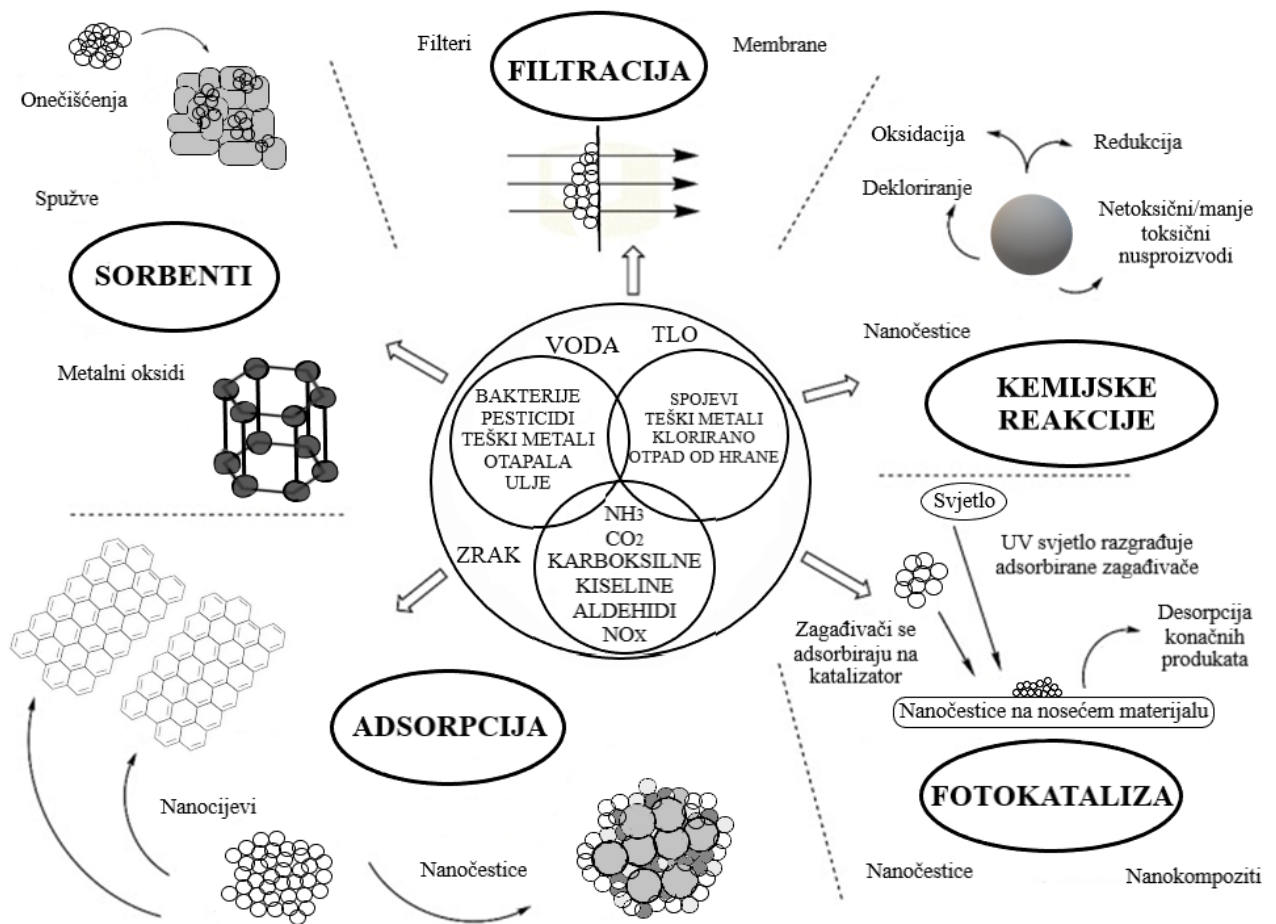
Općenito velika zabrinutost zbog rizika na ljudsko zdravlje proizlazi iz udisanja ultrafinih čestica i aerosola koji nastaju izgaranjem. Znanstvenici su istraživanjima utvrdili kako nanočestice iz zraka mogu izazvati kronične bolesti, odnosno karcinome. Čestice koje su u rasponu od 500 nm do 25 μm pokazuju tendenciju taloženja u dišnim putevima, dok neke prodiru duboko u pluća [16].



**Slika 3.** Shematski dijagram koji prikazuje nanočestice u okolišu (preuzeto i preuređeno prema [7])

### 3. RASPRAVA I PERSPEKTIVNI DIO

Postojeće tehnologije za pročišćavanje voda i otpadnih voda postigle su svoj limit u smislu dobivanja vode odgovarajuće kvalitete za zadovoljavanje ljudskih i ekoloških potreba te ne mogu ispuniti sve strožije ekološke zahtjeve, jer su često nedovoljno učinkovite. Neki od mogućih pristupa koji se primjenjuju u zaštiti okoliša prikazani su na slici 4.



**Slika 4.** Različiti pristupi remedijaciji okoliša

Dva su glavna područja primjene nanotehnologija u zaštiti okoliša, a uključuju:

- primjenu nanomaterijala za smanjenje onečišćenja okoliša, tj. za uklanjanje onečišćivala iz voda i otpadnih voda, zraka i tla i
- primjenu nanosenzora za praćenje/monitoring kvalitete okoliša.



### **3.1. Primjena nanomaterijala i nanotehnologija za smanjenje onečišćenja okoliša**

Nanotehnologija pokazala se kao jedna od naprednih i djelotvornih metoda obrade voda i otpadnih voda, a uglavnom se zasniva na uklanjanju raznih onečišćenja primjenom različitih nanomaterijala. Nanomaterijali koji se primjenjuju za obradu voda i otpadnih voda mogu se podijeliti u tri glavne skupine: nano-adsorbenti, nano-katalizatori i nano-membrane. Svi prethodno spomenuti nanomaterijali koriste se za uklanjanje organskih i neorganskih onečišćivala iz vodenog i/ili plinovitog medija, kao i za uklanjanje iona teških metala, za obezbojavanje otpadnih voda i sl.

#### **3.1.1. Nano-adsorbensi**

Obrada voda i otpadnih voda adsorpcijom zahtjeva primjenu nanostrukturiranih metalnih oksida i nano-vlakna te ugljičnih nano-cijevi. Osnovna značajka takvih materijala je velika specifična površina, što rezultira povećanom adsorpcijom, ali njihov velik nedostatak su visoki troškovi proizvodnje. Takvi materijali primjenjuju se za uklanjanje organskih čestica, teških metala i bakterija. U odnosu na druge tehnologije obrade otpadnih voda, adsorpcija ima prednost zbog bolje učinkovitosti, jednostavnog rada i mogućnosti uklanjanja svih vrsta onečišćenja. Također, primjenom nano-adsorbensa mogu se eliminirati otrovni plinovi u okolišu. Pokazalo se da nano-cijevi imaju dobar potencijal kao adsorbenti za uklanjanje raznih vrsta organskih i anorganskih zagađivača, kako u vodenom sustavu, tako i u zraku. CNT ili ugljične nano-cijevi se sastoje od heksagonalnog rasporeda atoma ugljika u sloju grafena koji okružuje os cijevi. Mogućnost adsorpcije pomoću CNT posljedica je porozne strukture i prisutnosti širokog raspona površinskih funkcionalnih skupina nanocijevi, što se postiže kemijskim ili toplinskim procesima radi željene izvedbe nano-cijevi.

Industrije koje proizvode veliku količinu toksičnih plinova predstavljaju najveće zagađivače zraka. Dioksini su poznati kao dugotrajni zagađivači okoliša te mogu ostati u okolišu dugi niz godina. Dioksini utječu na imunološki i endokrini sustav te ostavljaju negativne posljedice u ljudskom organizmu. Takvi spojevi nastaju izgaranjem organskih spojeva u spalionicama. Koncentracija spojeva nastalih izgaranjem je 15-555 ngm<sup>2</sup> [17]. Zbog visoke toksičnosti dioksina, korištenje aktivnog ugljena kao adsorbensa nije dovoljno učinkovito, iako je učinkovitije nego uklanjanje dioksina zeolitima i pomoću adsorbenta Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Stoga se javlja potreba za boljom metodom kojom će se smanjiti proizvodnja dioksidnih emisija na nižu razinu.

Istraživanjima je dokazano da su CNT oko tri puta učinkovitije nego aktivni ugljen. Smatra se da je za takvo poboljšanje zaslužna zakrivljena površina nanocijevi u usporedbi s glatkom površinom dioksina, što dovodi do jačih sila i većih interakcija.

Sa sve većom upotrebom automobila i elektrana poraslo je i nastojanje za razvojem tehnologija koje će smanjiti emisije  $\text{NO}_x$  i  $\text{CO}_2$  koji nastaju kao posljedica izgaranja fosilnih goriva. Uobičajeni adsorbenti koji se koriste za uklanjanje  $\text{NO}_x$  pri niskim temperaturama uključuju ionsku izmjenu zeolita, aktivni ugljen i  $\text{FeOOH}$  u vlaknima aktivnog ugljena. S obzirom da je adsorbirana količina  $\text{NO}_x$  u navedenim adsorbentima bila vrlo niska, razvila se težnja za boljom metodom. Rezultati su pokazali da CNT ima visoku mogućnost adsorpcije  $\text{NO}_x$ -a [17].

### 3.1.2. Nano-katalizatori

U fotokatalitičkim postupcima najčešće se primjenjuju razni poluvodički materijali, modificirani nano-titanijevi oksidi (nano- $\text{TiO}_2$ ) i fulereni (alotropna modifikacija ugljika). Prednosti fotokatalizatora su u tome što ne djeluju toksično na ljude, visoke su stabilnosti, imaju dobru selektivnost i fotokatalitičku aktivnost u širokom spektru elektromagnetskog zračenja uključujući i sunčevu svjetlost, a ujedno su pristupačni zbog niske cijene. Koristeći princip poluvodiča, organske molekule mogu se oksidirati svjetlom. Pri određenoj svjetlosti, proces prijenosa naboja će se dogoditi iz valentnog pojasa u vodljivi pojas uzrokujući oksidaciju okolne tvari. Sa razvojem nanotehnologije, poluvodički fotokatalizatori modificiraju se u cilju povećanja reaktivnosti i selektivnosti.

Fotokatalizatori se uglavnom primjenjuju za uklanjanje organskih zagađivala koje oksidacijom pretvaraju u netoksične materijale [18,19]. Razgradnja organskih onečišćujućih tvari u otpadnoj vodi fotokatalizom posredovana je fotokatalitičkim reakcijama između metalnih nanočestica i svjetlosne energije. Utvrđeno je da su nanocijevčice  $\text{TiO}_2$  učinkovitije od nanočestica  $\text{TiO}_2$  u razgradnji organskih spojeva [20]. Fotokatalizatori poput  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i  $\text{WO}_3$  imaju mnoge namjene: daju bijeli pigment papiru (zaslužni su za boju), služe kao materijal za apsorpciju ultraljubičastog svjetla pri zaštiti od sunca, koriste se kao zaštitna antimikrobna sredstva i primjenjuju se u sredstvima za čišćenje [19]. Upotreba nanomaterijala  $\text{TiO}_2$  kao fotokatalizatora poželjna je zbog visoke kemijske reaktivnosti te se koristi za uklanjanje patogenih bakterija iz otpadnih voda. Stoga se takvi nanokatalizatori smatraju snažnim antimikrobnim sredstvima. Općenito, upotreba  $\text{TiO}_2$  u naprednim metodama

fotokemijske oksidacije za remedijaciju vode opravdana je zbog njegove niske razine toksičnosti, visoke fotovodljivosti, visoke fotostabilnosti i činjenice da je lako dostupan i jeftin materijal. Uz upotrebu  $\text{TiO}_2$  koji se uobičajeno koristi u industriji, trenutno se razvijaju i  $\text{ZnO}$  katalizatori za koje se očekuje da će imati dvije funkcije: otkrivanje i uklanjanje onečišćenja [19, 21].

### 3.1.3. Nano-membrane

Nanofiltracija (NF) je membranski proces koji se provodi pri povišenom tlaku, a po svojim osnovnim značajkama i prednostima nalazi se između reverzne osmoze (RO) i ultrafiltracije (UF). NF membrane uglavnom se izrađuju iz polimera. Za filtraciju se koriste keramičke NF membrane i kombinirane polimerne keramičke membrane te se mogu podijeliti u dvije opće kategorije ovisno o materijalu i metodi sinteze, tj. na krute i savitljive NF membrane [22].

Filtri imaju poroznu strukturu koja omogućuje prolaz plina, dok čestice plina ostaju nakupljene na filtru. Membrana uklanja čestice primjenom tri mehanizma, uključujući izravan kontakt čestice sa strukturom filtra, primjenu inercijske sile pri promjeni smjera plina i učinak električnog naboja čestice i strukture filtra [23]. Nanofiltracija, kao membranski proces obrade voda i uklanjanja zagađivala (boja, mikroba) smatra se pouzdanim procesom, međutim nedostatak tog procesa je velika potrošnja energije [18]. Nanofiltri mogu ukloniti razne bakterije, pesticide, viruse, zagađivala, teške metale i organske tvari iz vode. U procesu nanofiltracije ne koriste se kemikalije koje služe omekšavanju vode, stoga su procesi nanofiltracije manje štetni u odnosu na konvencionalne kemijske metode pri pročišćavanju voda i otpadnih voda [23]. Nanofiltri imaju veću učinkovitost od konvencionalnih filtara. Veličina njihovih pora je između 1 i 10 nm, što rezultira učinkovitim uklanjanjem različitih vrsta bakterija, virusa i organskih zagađivala. Filtri, osim što imaju veliku primjenu u obradi voda, mogu se primjenjivati i kao izvrsna metoda pročišćavanja zraka.

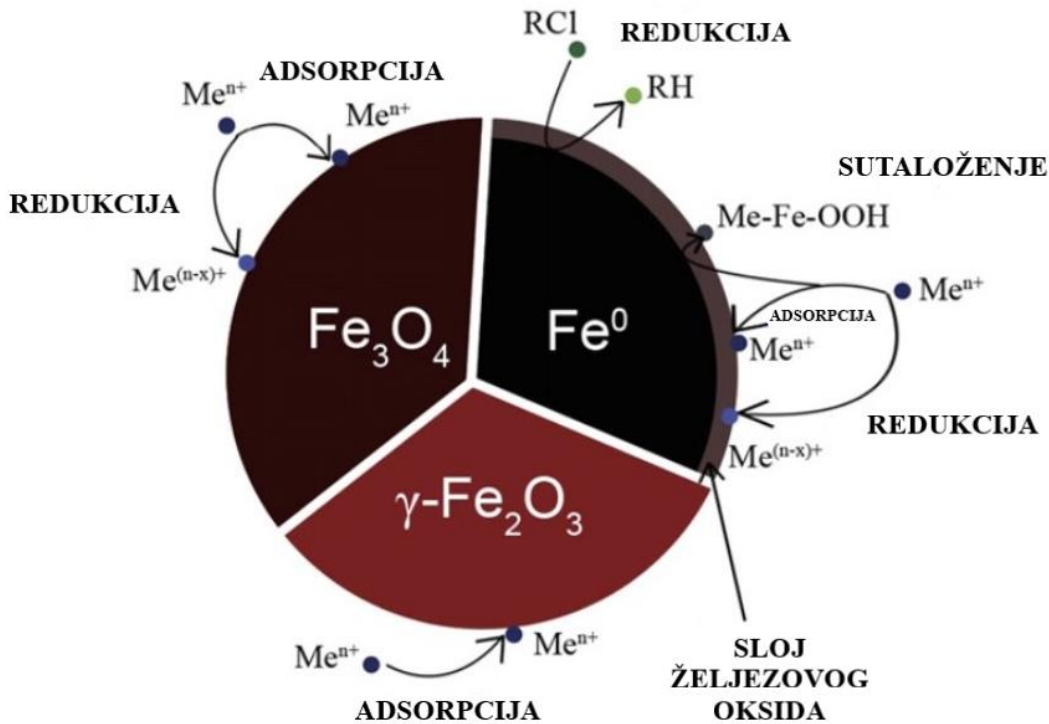
Membrane sastavljene od ugljikovih nanocjevčica imaju veliku sposobnost separacije/razdvajanja ugljičnog dioksida od ostalih plinova, pri čemu se smatra da su učinkovitije čak 100 puta u odnosu na ostale tehnologije koje se koriste za uklanjanje, odnosno smanjivanje ostalih toksičnih plinova iz zraka [23]. Nanomembranske tehnologije imaju široki raspon primjene za separaciju i pročišćavanje plinova i para te onečišćujućih tvari uzrokovanih industrijama, kao i pri sprječavanju njihovog ispuštanja u okoliš.

### 3.1.4. Magnetske nanočestice

Od najčešće korištenih nanočestica, velik interes u istraživanjima koja se odnose na obradu zagađene vode odnosi se na magnetske nanočestice, uglavnom nanočestice multivalentnog željeza (nZVI), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) i maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) [19]. Magnetske nanočestice (MN) su vrsta nanočestica dimenzija od 1 do 100 nm koje se sastoje od oko 70 elemenata, poput željeza, nikla i kobalta [24]. Metoda koja se zasniva na primjeni multivalentnog željeza pokazala se kao vrlo učinkovita tehnologija za uklanjanje različitih organskih i anorganskih onečišćenja, uključujući klorirana otapala, pesticide, nitroamine i nitroaromatike, organofosfate, anorganske anione, arsen, uranij te brojne metale [25]. Magnetske nanočestice smatraju se vrlo učinkovitim, ne samo u području zaštite okoliša, već i za medicinske svrhe, poput liječenja raznih bolesti (karcinomi, Alzheimerova bolest) [24].

Magnetske nanočestice (MNP) lako se skupljaju magnetima i koriste za desorpciju zagađivala. Njihova prednost je mogućnost ponovne uporabe bez obzira na prethodnu primjenu, što ih izdvaja kao vrlo isplativu metodu zbog povoljnih kemikalija i magneta te njihove uporabe i mogućnosti kontinuiranog korištenja [26]. Primjena multivalentnog željeza rezultira i mogućim nedostaci s obzirom na učinkovitost uklanjanja zagađivala zbog visoke reaktivnosti nZVI. Razlog tome je što nZVI može reagirati ili se oksidirati u vodi s otopljenim zrakom, što rezultira niskim vijekom trajanja. Kada je prisutan kisik ili se primjena provodi u kiselim medijima, nZVI oksidira  $\text{Fe}^{2+}$  i/ili  $\text{Fe}^{3+}$  ione, što će dovesti do proizvodnje vodika. Radi uspješne provedbe metode pomoću nZVI, voda treba biti pročišćena inertnim plinom, obično dušikom [27]. Uklanjanje onečišćenja pomoću nanočestica  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  rezultat je elektrostatskih interakcija. Učinak uklanjanja  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  i  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ovisi o pH vrijednosti. Kemijski sastav vode mijenja se ovisno o lokaciji te se primjenom magnetskih nanočestica pri pročišćavanju otpadnih voda moraju uzeti u obzir i parametri kao što su visoka ionska jakost i ekstremna pH vrijednost kako bi metoda bila učinkovita [27].

Slika 5 prikazuje način na koji nZVI u jezgri osigurava redukciju onečišćenja. Oksidni sloj predstavlja mjesto za sorpciju, dok se adsorpcija provodi na površini željezovih oksida ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  i  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), pri čemu  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  omogućava redukciju.



**Slika 5.** Shematski model magnetskih nanočestica (nZVI,  $Fe_3O_4$  i  $\gamma-Fe_2O_3$ ) (slika preuzeta i preuređena prema [27])

### 3.1.5. Ostale vrste nanomaterijala

#### *Nano-biomaterijali*

Nanočestice biomaterijala su veličine 100-10000 nm i imaju oblik nanokapsule ili nanosfere. Nanosfere su matični sustavi, dok su nanokapsule vezikularni sustavi. Nanokapsule se sastoje od ljuske i praznog prostora koji služi za „nošenje“ željenog materijala. Za izradu nanokapsula koriste se polimeri poput lipida i proteina. Dendimeri su pravilne, razgranate makromolekule koje pokazuju najveći potencijal u atomskoj preciznosti u odnosu na nanokapsule i nanopore. Kohleati su stabilni fosfolipidni bivalentni prirodnih materijala koji su otporni na čimbenike okoliša. Njihova slojevitost ih štiti od razgradnje krhkim molekulama, čak i ako su izloženi teškim uvjetima okoliša ili djelovanju enzima.

Nanostrukture poput biopolimera mogu se koristiti za izradu elektroničkih čipova. Korištenjem nano-procesa, konvencionalna metoda proizvodnje poluvodičkih čipova može se znatno poboljšati. Npr. monitori su izrađeni od katodnih cijevi (koje sadrže otrovne tvari) i

imaju veću učinkovitost, no kada bi se zamijenile katodne cijevi s ugljikovim nanocijevima, u računalnim monitorima bi se smanjila potrošnja teških metala, čime se smanjuje šteta za okoliš, što je još jedan primjer kako nanotehnologija ima pozitivan učinak i dovodi do proizvodnje sigurnih tvari [17].

### ***Porozni nanopolimeri***

Porozni nanopolimeri sličnog su sastava kao molekule zagađivala, što ih čini prikladnima za uklanjanje organskih vrsta zagađivala iz vode i tla. Prednosti poroznih materijala su niski troškovi obrade i mogućnost primjene u raznim situacijama te njihova velika učinkovitost uklanjanja zagađivala iz okoliša. Kada hidrofobna organska zagađivala uđu u tlo putem vode, čvrste čestice koje su netopljive u vodi lako ih apsorbiraju i uklanjaju iz vode. Adsorpcija takvih tvari ovisi i nekoliko čimbenika: topljivost u vodi, sadržaju vode u tlu te utjecaju komponenti tla na adsorpciju čestica. Ukoliko postoji više od jedne hidrofobne molekule u okolišu, onečišćujuće molekule vežu se za onu koja im je kemijski najbližnja. Ekološke primjene poroznih nanopolimera su: uklanjanje organskih zagađivala iz pitke vode, obrada otpadnih voda iz nuklearnih elektrana, čišćenje vode zagađene naftnim derivatima, čišćenje resursa podzemnih voda od organskih zagađivala i dr. [17].

### ***Nano-premazi***

Prednosti korištenja nano-premaza su brojne. Imaju veliku mogućnost prijanjanja na različite površine kao što su keramika, plastika, staklo ili metal i visoki stupanj antikorozijske zaštite, što dovodi do povećanja otpornosti na koroziju lakih metala kao što su aluminij i magnezij. Premazi su načinjeni od tankog sloja, debljine svega nekoliko mikrona i vrlo su otporni na toplinu te mogu izdržati temperature do 700°C [17]. Nano-premazi koriste se u obliku vrlo tankog sloja za oblaganje površina stakla automobila, što rezultira brzim uklanjanjem kapljica sa stakla i njegovim brzim sušenjem. Pozitivni rezultat toga je manja potrošnja deterdženata, čime se smanjuje i zagađenje okoliša.

### ***Ekološki prihvatljivi materijali***

Povećana industrijalizacija dovela je do velikog zagađenja okoliša. Kako bi se pomoću raznih metoda, uključujući nanotehnologiju spriječila zagađenja u okolišu i reducirala potrošnja energije, potrebno je pronaći materijale koji su ekološki prihvatljivi za okoliš. Takvi materijali zamjenjuju otrovne tvari i pomoću njih se smanjuju negativni utjecaji na okoliš. Na

primjer, LCD zaslon, računalni zaslon s tekućim kristalima (manje otrovan) zamijenio je katodne cijevi, CRT, koje su sadržavale vrlo otrovne tvari [17]. Primjenom nanotehnologije mogu se proizvesti strukture koje su manje i lakše, a pritom se neće mijenjati kvaliteta produkta. Primjeri ekološki prihvatljivih materijala koji se mogu proizvesti pomoću nanotehnologije su: neotrovni nanokristalni kompoziti koji se koriste umjesto litij grafitnih elektroda u punjivim baterijama, samočišćeće staklo, biorazgradiva plastika izrađena od polimera s molekularnom strukturom koja se lako razgrađuje i sl. [17].

### **3.2. Primjena nanosenzora u zaštiti okoliša**

Nanosenzori su brzi, precizni senzori koji mogu detektirati zagađivala zraka na molekularnoj razini, uključujući različite onečišćujuće tvari i specifične patogene u okolišu. Takvi senzori koriste se za praćenje koncentracije onečišćivala u okolišu s ciljem otkrivanja procesa u kojima nastaju te minimiziranja njihovog nastajanja kao i njihovog utjecaja na okoliš [4]. Prednost korištenja nanosenzora je detekcija štetnih onečišćivala u okolišu pri vrlo niskim koncentracijama, pri čemu je moguće postizanje znatno nižih granica detekcije, velik omjer površine i volumena te postizanje visoke osjetljivosti senzora na temperaturi okoline.

Vrste nanomaterijala koji se koriste kao receptori u nanosenzorima uključuju anorganske (ugljik i metali), organske (polimeri, biomolekule i dr.) i hibridne nanomaterijale [28]. Nanosenzori funkcioniraju na način da zagađivala iz okoliša stupaju u interakciju s receptorom koju bilježi pretvornik. Zatim se signal pretvara u mjernu varijablu. Osnovni dijelovi senzora su elementi koji reagiraju na promjene kemijskih ili fizikalnih svojstava, a pretvornici ih pretvaraju iz kemijske reakcije u mjerive električne signale (promjena otpora, frekvencije, struje ili napona). Senzori detektiraju plinove reakcijom između senzornog materijala i plinova [28, 29]. Primjenom nanosenzora sastavljenih od ugljikovih nanocijevi (CNT) i grafena postiže se izvrsna električna i toplinska vodljivost te dobra mehanička čvrstoća, pri čemu se ujedno postiže i visoka učinkovitost za detekciju različitih plinova iz zraka, poput dušikovog dioksida ( $\text{NO}_2$ ), amonijaka ( $\text{NH}_3$ ), vodika ( $\text{H}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), ugljikovog monoksida ( $\text{CO}$ ), sumporovodika ( $\text{H}_2\text{S}$ ) i sumpornog dioksida ( $\text{SO}_2$ ) [28]. Kvantne točke (QD) svrstavamo u skupinu optičkih pretvornika. Prednost korištenja kvantnih točaka sastoji se u širokom apsorpcijskom spektru i mogućnosti pobude jednim izvorom energije. Najčešći QD koji se primjenjuju u sensorima su: CdSe, CdSe/ZnS, CdTe, CdTe/CdS, ZnS i kvantni grafen [28].

### 3.3. Ostala potencijalna područja primjene

Smatra se da će najnovija otkrića u području nanotehnologija dati važan doprinos razvoju znanosti i inženjerstva u sljedećem desetljeću te da će omogućiti poboljšanje postojećih i razvoj održivih tehnologija za 21. stoljeće.

#### *Primjena nanotehnologije u energetici*

Sve većom globalizacijom dolazi se do veće potrošnje energije, pa tako i do velikih promjena u okolišu. Problem s postojećim metodama pretvorbe, skladištenja i distribucije energije i dalje postoji, stoga se teži za pronalaskom alternativnih metoda koje će biti učinkovitije od dosadašnjih. Primjena nanočestica i nanomaterijala u energetici i okolišu poboljšava te pojednostavljuje procese proizvodnje električne energije, praćenja/monitoringa okoliša, kontrole emisija i gubitaka energije. Nanotehnologija je prihvatljiviji proces od drugih alternativnih metoda zbog visoke ekonomičnosti i ekološke prihvatljivosti.

Primjena nanotehnologije ima važnu ulogu u raznim procesima pretvorbe energije te u industrijama kao što su proizvodnja kondenzatora, dioda, gorivih ćelija i solarna industrija. Troškovi uštede energije mogu se smanjiti od 70% do 75% korištenjem ugljikovih nanocijevi (CNT) jer posjeduju visoku električnu vodljivost što rezultira manjim gubitkom energije pri prijenosu struje [30, 31]. Energija koju generiraju elektrane mogla bi smanjiti potrebe za fosilnim gorivima čija je zaliha ograničena i neobnovljiva. S obzirom da je snaga vjetroelektrana manja od potrebne snage, povećana je potreba za pronalaskom druge alternativne metode koja će biti učinkovitija u pretvorbi i skladištenju energije. Jedna od takvih metoda su solarne ćelije kojima se sunčeva svjetlost pretvara u električnu energiju. Nanostrukturne solarne ćelije su jeftinije za proizvodnju i jednostavnije za ugradnju, budući da su fleksibilnijeg dizajna od dosadašnjih. Istraživanja su pokazala da je gorivim ćelijama moguće povećati izlaznu energiju pomoću nanostrukturiranih elektroda, katalizatora i membrana, što rezultira dobrim ekonomskim mogućnostima za primjenu u automobilima, zgradama i elektronici [31]. Razvojem nanomaterijala mogli bi se zamijeniti trenutni dijelovi sastavljeni od platine, koji su ekonomski neisplativi, s nanocijevima koje bi služile kao sustav za isporuku vodika koji se smatra kao ekološki prihvatljiv opskrbljivač energijom [32]. No problem predstavljaju materijali za kemijsko skladištenje vodika koji ne zadovoljavaju zahtjeve automobilske industrije.



Iako se sve prethodno spomenute metode smatraju jako učinkovitim, potrebno je još vremena kako bi se daljnjim istraživanjima unaprijedile što će značajno utjecati na očuvanje energije i poboljšanje energetske učinkovitosti.

## 4. ZAKLJUČAK

Sve veća industrijalizacija i antropogeni učinci na okoliš dovode do neželjenih negativnih promjena u okolišu. Povećanim ljudskim aktivnostima povećava se koncentracija onečišćujućih tvari u zraku, vodi i tlu, što dovodi do velike zabrinutosti zbog brojnih posljedica kontinuiranog zagađenja. Takve posljedice mogu biti opasne za ljudsko zdravlje i ukupno stanje okoliša, stoga je potrebno razviti nove metode uz već postojeće, koje će značajno utjecati na poboljšanje procesa obrade i uklanjanja onečišćujućih tvari iz okoliša i omogućiti njihovo uklanjanje iz okoliša. U ovom radu navedene su mnoge prednosti primjene nanotehnologija koje poboljšavaju praćenje i omogućavaju smanjenje emisija onečišćujućih tvari u okoliš, pridonose poboljšanju učinkovitosti njihovog uklanjanja, a pritom istovremeno i smanjuju utjecaj nanočestica na procese u okolišu.

Materijali na nanorazini u odnosu na makromaterijale potpuno su drugačijih svojstava. Za to je zaslužan velik omjer volumena i specifične površine koja je značajna za mnoge procese obrade i uklanjanja onečišćujućih tvari. Nanočestice doprinose promjenama koje dovode do značajnih ušteda zbog povećanja učinkovitosti i olakšane primjene. Nanocijevi (CNT) pokazuju veliku selektivnosti i omogućavaju apsorpciju plinova, kao i uklanjanje opasnih plinova i zagađivala iz okoliša. Obrada voda nanočesticama osigurava ekološki i ekonomski prihvatljiv pristup te visoku učinkovitost u odnosu na konvencionalne metode za obradu voda. Nanostrukture su izuzetno učinkovite za sanaciju toksičnih tvari, odnosno za uklanjanje organskih i anorganskih zagađivala i teških metala iz vode. Primjena nanotehnologija može značajno smanjiti potrebu za primjenom fosilnih goriva. Pomoću nanočestica postiže se veća učinkovitost pri skladištenju i uštedi energije. Nanočestice pronalaze primjenu u svim industrijama i granama znanosti, te se smatra da će njihova primjena u budućnosti biti značajno veća nego što je danas.

Učestalijom primjenom nanotehnologija moguće je postići učinkovitiju zaštitu okoliša. S obzirom da postoje i negativni učinci nanotehnologije, potrebno je provesti daljnja istraživanja radi unaprjeđenja i smanjenja štetnih utjecaja nanomaterijala i na njima utemeljenih nanotehnologija na ljudsko zdravlje i okoliš. Usprkos tome, nanotehnologija se smatra velikom prekretnicom u primjeni naprednih tehnologija u nastojanju da se poboljša globalni okoliš u 21. stoljeću.

## 5. LITERATURA

- [1] Črnjar M., Črnjar K. (2009). Menadžment održivoga razvoja: ekonomija-ekologija-zaštita okoliša. Opatija, Rijeka: Fakultet za menadžment u turizmu i ugostiteljstvu u Opatiji Sveučilišta u Rijeci (Autorska knjiga-stručna knjiga-udžbenik za visokoškolsko obrazovanje), 46-47.; Dostupno na linku: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:191:231542> (pristup: 11.02.2024.)
- [2] Roy A., Sharma A., Yadav S., TesfayeJule L., Krishnaraj R., (Review Article), Nanomaterials for Remediation of Environmental Pollutants, 2021.; Dostupno na linku: [www.https://doi.org/10.1155/2021/1764647](http://www.https://doi.org/10.1155/2021/1764647) (pristup: 11.02.2024.)
- [3] Nanotechnology and the Environment, Report of National Nanotechnology Initiative Workshop, May 8-9, 2003., 1-15.
- [4] Theodore L., G. Kunz R., Wiley & Sons J., Inc., Hoboken, Nanotechnology: environmental implications and solutions, Environmental Consultant Hillsborough, NC, New Jersey, 2005., 1-17., 110., 116-118.
- [5] National Nanotechnology Initiative, About Nanotechnology; Dostupno na linku: <https://www.nano.gov/about-nanotechnology> (pristup: 28.02.2024.)
- [6] Rickerby, D. G., & Morrison, M. Nanotechnology and the environment: A European perspective. Science and Technology of Advanced Materials, 8(1-2), 19., 2007.; Dostupno na linku: <https://iopscience.iop.org/article/10.1016/j.stam.2006.10.002/pdf> (pristup: 01.03.2024.)
- [7] Biswas, P., & Wu, C. Y., Nanoparticles and the environment. Journal of the Air & Waste Management Association, 55 (6), 2005., 708-709.; Dostupno na linku: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/10473289.2005.10464656?needAccess=true> (pristup: 01.03.2024.)
- [8] Filipović I., Lipanović S., Opća i anorganska kemija, 1. dio, IX. Izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1995., str. 123-133.
- [9] Kurajica S., Lučić Blagojević S., Uvod u nanotehnologiju, Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Zagreb, 2017.; str. 6-7., 31-95, 322-324.
- [10] Mijović B., Nano – mnoštvo rizika i koristi, Sigurnost: časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini, Vol. 57 No.3, Tekstilno – tehnološki fakultet, Zagreb, 2015., str. 207; Dostupno na linku: <https://hrcak.srce.hr/file/216042>(pristup: 04.03.2024.)

- [11] Ahmed S. F., Mofijur M., Rada N., Chowdhury A., Chowdhury S., Nahrin M., Saiful Islam A.B.M., Chyuan Ong H. Green approaches in synthesis in nanomaterials for environmental nanobioremediation: Technological advancements, applications, benefits and challenges, *Environmental Research*, Volume 204, Part A, March 2022.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111967> (pristup: 17.5.2024.)
- [12] Siddiqa A., Ikram M., Zohra E., Raja N. I., Rahman Mushwani Z., H.Mohamed A., M.Zahedi S., Abbas A., Omar A., Overview of Nanomaterials and their Synthesis, 1st Edition, *Biotic Stress Management of Crop Plants using Nanomaterials*, 2023.; Dostupno na linku: [https://www.researchgate.net/publication/369467834\\_Overview\\_of\\_Nanomaterials\\_and\\_their\\_Synthesis](https://www.researchgate.net/publication/369467834_Overview_of_Nanomaterials_and_their_Synthesis) (pristup: 18.5.2024.)
- [13] Orthen Baua B., *Nanotechnology: Health and environmental risks of nanomaterials*, *Research Strategy*, December (2007), 24.
- [14] Feitshans I., Risk Assessment of Nanomaterials, *International Journal of Women's Health*, November 2017.; Dostupno na linku: [https://www.researchgate.net/publication/321183127\\_Risk\\_Assessment\\_of\\_Nanomaterials](https://www.researchgate.net/publication/321183127_Risk_Assessment_of_Nanomaterials) (pristup: 23.5.2024.)
- [15] Ray P. C., Yu H., Fu P. P. (2009). Toxicity and Environmental Risks of Nanomaterials: Challenges and Future Needs. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 27 (1), 1-35.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1080/10590500802708267> (pristup 23.5.2024.)
- [16] Sellers K., Mackay C., Bergeson L. L., Clough S. R., Hyot M., Chen J., Henry K., Hamblen J., *Nanotechnology and the Environment* (2009), Taylor & Francis Group, 201-220.
- [17] Beni A. A., Jabbari H., *Nanomaterials for Environmental Applications*, Volume 15, 2022.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100467> (pristup: 29.5.2024.)
- [18] Aleksic, N.; Sustersic, V. (2021). Mogućnost primjene nanotehnologije u tretmanu voda i otpadnih voda. *Tractors and power machines (Traktori i pogonske mašine)*; Dostupno na linku: <https://scidar.kg.ac.rs/handle/123456789/15533> (pristup: 11.02.2024.)
- [19] Yunus I.S., Harwin, Kurniawan A., Adityawarman D., Indarto A., *Nanotechnologies in water and air pollution treatment*, 2012.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.733966> (pristup 29.5.2024.)

- [20] Qu X., J.J. Alvarez P., Li Q., Applications of nanotechnology in water and waste water treatment, Department of Civil and Environmental Engineering, Rice University, Houston, TX 77005, USA, 2012.; Dostupno na linku: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.058> (pristup: 29.5.2024.)
- [21] Yadav N., Garg V.K., Chhillar A.K., Rana J.S., Detection and remediation of pollutants to maintain ecosustainability employing nanotechnology: A review, Volume 280, October 2021.; Dostupno na linku: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521012637> (pristup 29.5.2024.)
- [22] Van derBruggen B., Nanofiltration, Membrane Processes, 2013., Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1002/9781118522318.emst077> (pristup: 11.02.2024.)
- [23] Taran M., Safaei M., Karimi N., Almasi A., Benefits and Application of Nanotechnology in Environmental Science: an Overview, Volume 11, Issue 1, 2021, 7860 – 7870, 2020.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.33263/BRIAC111.78607870> (pristup 29.5.2024.)
- [24] Patanjali P., Singh R., Kumar A., Chaudhary P., Nanotechnology for water treatment: A green approach. Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles, 485–512., 2019.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102579-6.00021-6> (pristup: 30.5.2024.)
- [25] Zekić E., Vuković Ž., Halkijević I., Primjena nanotehnologije u pročišćavanju otpadnih voda, 2017.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.14256/JCE.2165.2017> (pristup: 11.02.2024.)
- [26] Alonso J., Barandiaran J. M., Barquin L. B., Garcia-Arribas A., Magnetic Nanoparticles, Synthesis, Properties, and Applications. Magnetic Nanostructured Materials, 1-40, 2018.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813904-2.00001-2> (pristup: 30.5.2024.)
- [27] C.N. Tang S., Lo I., Magnetic nanoparticles: Essential factors for sustainable environmental applications, 2013.; Dostupno na linku: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.039> (pristup: 11.02.2024.)

- [28] Elham F.M., Gamal A., Development of nano-sensor and biosensor as an air pollution detection technique for the foreseeable future, National Library of Medicine, 2022.; Dostupno na linku: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9906420/> (pristup: 31.5.2024.)
- [29] Nazemi H., Aashish J., Jaewoo P., Arezoo E., Advanced Micro- and Nano-Gas Sensor Technology: A Review, 2019.; Dostupno na linku: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1285> (pristup 1.6.2024.)
- [30] Kiran Manam V., Kumari Nakkella A., Gujarathi J. R, Nanotechnology in Energy and Environment, Frontiers in Nanotechnology, New Delhi (India), 2022.; Dostupno na linku: [https://www.researchgate.net/publication/363885798\\_Nanotechnology\\_in\\_Energy\\_and\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/363885798_Nanotechnology_in_Energy_and_Environment) (pristup: 1.6.2024.)
- [31] URL: <https://www.nanowerk.com/nanotechnology-in-energy.php> (pristup: 1.6.2024.)
- [32] International Institute for Nanotechnology, <https://www.iinano.org/energy/> (pristup 1.6.2024.)