ELEKTROMAGNETNA POLJA: SEDANJI IN PRIHODNJI IZZIVI ZA VARNOST IN ZDRAVJE PRI DELU

Uvod

So brez vonja, ne slišimo jih in jih ne vidimo: elektromagnetna polja (v nadaljnjem besedilu: EMP), ki nastajajo zaradi uporabe mobilnih telefonov, radijskih anten, usmerjevalnikov Wi-Fi, električnih vodov itd., so v sodobni družbi povsod. Število in raznovrstnost njihovih virov se po domovih, v javnih prostorih in na delovnih mestih le še povečujeta. V zadnjih letih so se pojavile prodorne nove tehnologije, ki temeljijo na EMP, kot so nova generacija tehnologij za mobilne telefone (peta, znana tudi kot 5G), brezžični prenos električne energije in številne zdravstvene aplikacije. Dejansko se napredek na področju brezžične tehnologije šteje za ključno gonilo digitalizacije dela[1] in industrije 5.0 (Evropska komisija, 2022). Ta napredek vpliva na številna področja, pomembna za prihodnost dela[2], kot so internet stvari, hibridno delo in virtualna delovna okolja. Poleg tega ima ključno vlogo pri avtonomni vožnji, brezpilotnih zrakoplovih (dronih), senzorjih in napredni robotiki. Ker so viri EMP prisotni povsod, razprava o njih vse bolj vzbuja zanimanje v znanstvenih krogih in v širši javnosti. Poleg tega je Evropska komisija zaradi njihove hitre širitve in vse večje uporabe v poklicnih okoljih pred kratkim poudarila, da je pomembno analizirati izpostavljenost delavcev EMP in morebitnim škodljivim učinkom te izpostavljenosti na zdravje (Evropska komisija, 2021).

Cilj tega dokumenta je opredeliti nastajajoče uporabe EMP in prihodnje razvojne trende v poklicnem okolju ter njihove morebitne posledice za varnost in zdravje pri delu. Cilj je tudi poudariti pomanjkljivosti v znanju o (varnih) ravneh izpostavljenosti. V dokumentu so navedena tudi priporočila za delavce in delodajalce, strokovnjake na področju varnosti in zdravja ter oblikovalce politik, da bi se čim bolj zmanjšala tveganja, povezana z izpostavljenostjo EMP. Za informacije o posrednih tveganjih in koristih uporabe za varnost in zdravje pri delu, pomembnih za prihodnost dela, ki ga omogočajo EMP, se dokument sklicuje na ustrezne publikacije agencije EU-OSHA[1, 2].

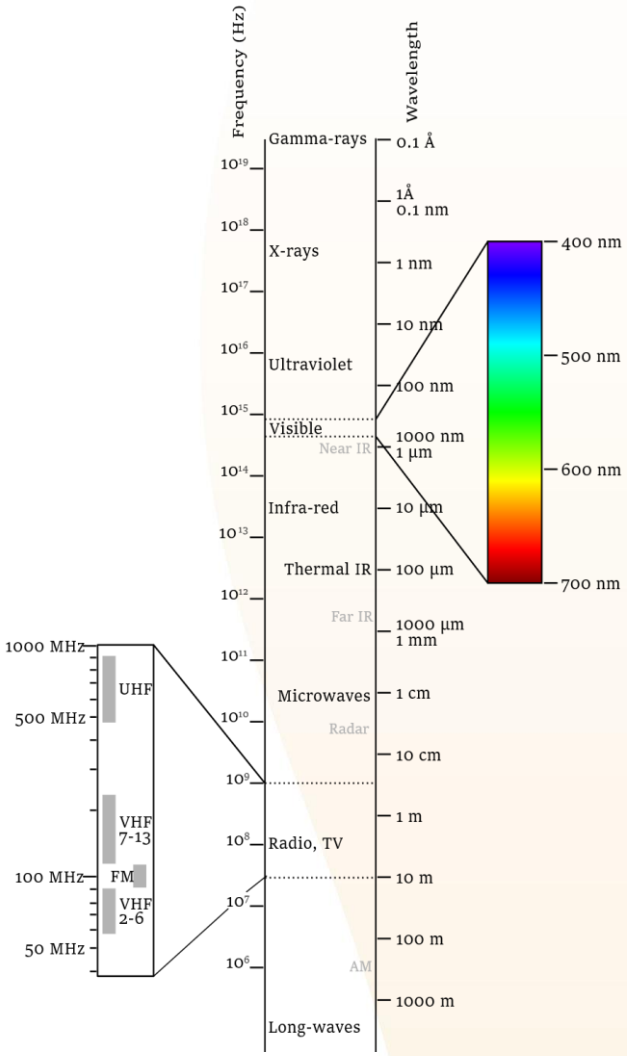
Kaj so elektromagnetna polja?

V bistvu EMP nastanejo zaradi premikajočih se električnih nabojev ter se širijo kot kombinacija nihajočih električnih in magnetnih valov s svetlobno hitrostjo. Električno polje nastane zaradi sil med nabitimi delci, magnetno polje pa ustvarjajo premikajoči se električni naboji (električni tokovi). EMP so opredeljena s frekvenco ali valovno dolžino, značilnostmi signala in jakostjo. Frekvenca, merjena v hercih (Hz), pomeni, kolikšno je število ciklov, ki jih val opravi v eni sekundi. Valovna dolžina, merjena v metrih (m), je razdalja med dvema vrhovoma vala. Značilnosti signala se nanašajo na primer na kontinuirana sinusoidna ali pulzirajoča EMP. Jakost je energija vala, ki je povezana z amplitudo (višino vrha) vala. Raven izpostavljenosti je jakost vpadnega vala na lokaciji telesa, ki je običajno časovno, volumsko in/ali prostorsko utežena (povprečena) v nekem obdobju, površini in/ali volumnu. Ta raven se meri kot gostota moči (v vatih na kvadratni meter) ali jakost električnega polja (v voltih na meter). Frekvenca in valovna dolžina sta obratno sorazmerni (slika 1): valovno dolžino (v metrih) je mogoče izračunati tako, da se hitrost svetlobe (30 milijonov metrov na sekundo v vakuumu) deli s frekvenco (v hercih (Hz)). Upoštevati je treba, da sta električno in magnetno polje običajno povezani na razdaljah več kot 10 valovnih dolžin od vira; to območje se imenuje daljno polje.

[1] Glejte: https://osha.europa.eu/en/themes/digitalisation-work

[2] Glejte dokumente za razpravo agencije EU-OSHA o temah, pomembnih za prihodnost dela, na spletnem naslovu: https://osha.europa.eu/en/publications?f%5B0%5D=facet_tags%3A51&f%5B1%5D=publication_type%3A9&search_api_fulltext=&search_api_language_1%5B0%5D=en&sort_by=field_publication_date

Slika 1: Elektromagnetni spekter



Območje izjemno nizkih frekvenc in del območja srednjih frekvenc (1 Hz–100 kHz) v tej sliki nista vključena.

Seznam kratic: MHz = megaherc, pri čemer je Hz enota za frekvenco, ki označuje število ciklov/sinusnih valov na sekundo; UHF = ultra visoka frekvenca, VHF = zelo visoka frekvenca; AM = amplitudna modulacija; FM = frekvenčna modulacija; IR = infrardeča; m = meter, cm = centimeter; mm = milimeter; µm = mikrometer, nm = nanometer, Å = angstrom = 0,1 nm.

Vir: Wikimedia Commons (Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.5 Generic license).

Obstajajo naravni in umetni viri EMP. Na splošno viri, ki jih je ustvaril človek, oddajajo elektromagnetno sevanje, ki je prirejeno za prenos informacij ali energije. Vendar so vrste praktične uporabe tako različne kot njihova frekvenca: od izjemno nizkih frekvenc (tj. frekvenc v razponu od 1 Hz do 300 Hz), ki se pojavljajo pri proizvodnji električne energije, do srednjih frekvenc (tj. frekvenc med 300 Hz in 10 MHz, pri čemer je 1 MHz = 10^6 Hz; slika 1) do radiofrekvenc (tj. frekvenc v razponu od 10 MHz do 300 GHz, pri čemer je 1 GHz = 10^9 Hz; slika 1), ki se uporabljajo v radarskih in mobilnih komunikacijah.

Opozoriti je treba, da so v tem dokumentu obravnavana le EMP s frekvencami do nekaj terahercev (pri čemer je 1 THz = 10^{12} Hz, slika 1), t. i. radijski valovi (ITU, 2020), ki so pod območjem vidne svetlobe in v delu spektra, ki velja za neionizirajočega, na primer tista, ki nimajo energije, ki bi lahko odstranila tesno povezane elektrone iz atomov ali molekul (kar lahko povzroči molekularne poškodbe in učinkuje na zdravje). To pomeni, da razen infrardeče in vidne svetlobe drugi znani deli elektromagnetnega spektra, kot so UV-sevanje, rentgenski žarki in gama žarki, v tem dokumentu niso obravnavani.

Najnovejši razvoj v zvezi z EMP na delovnem mestu

Mobilna komunikacijska omrežja

Peta generacija telekomunikacijskih omrežij (5G) deluje na frekvencah, ki pred tem niso bile uporabljene in od katerih so nekatere znatno višje od tistih, uporabljenih v prejšnjih generacijah (do 71 GHz (pri čemer je 1 GHz = 10^9 Hz), slika 1). Z njo se uvaja tehnološki napredek, zaradi katerega je mogoče, da ista bazna postaja hkrati oskrbuje več uporabnikov. To se doseže tako, da se prenesena energija v prostoru deli in usmeri na uporabnike, kot da bi se nanje usmeril svetlobni žarek. V večini evropskih držav so regulativni organi že dodelili in na dražbi prodali nove frekvence.

Javnost spremlja uvajanje omrežij 5G po vsem svetu z zaskrbljenostjo zaradi domnevnih tveganj za zdravje, ki naj bi jih povzročala predvideno povečanje splošne izpostavljenosti EMP in uporaba višjih frekvenc (katerih možni biološki učinki še niso bili temeljito proučeni), pojavljajo se tudi napačne informacije in celo vandalizem nad infrastrukturo (ITU, 2021). Čeprav bi dodajanje omrežij 5G dejansko lahko povečalo skupno izpostavljenost EMP, se pričakuje, da bo ta izpostavljenost trajala, dokler se bodo uporabljala tudi omrežja prejšnje generacije (SCHEER, 2023a). Da bi se odpravili pomisleki javnosti glede 5G in spremljal dejanski vpliv skupne izpostavljenosti radiofrekvenčnim EMP, so bile v okviru programa EU Obzorje financirane štiri mednarodne študije, katerih cilj je oceniti vpliv uvedbe 5G na zdravje in okolje tudi v poklicnih okoljih[3]. Ti projekti so se začeli izvajati leta 2022 in se bodo končali med letoma 2025 in 2027.

Pri višjih frekvencah je za ohranjanje visokokakovostnih brezžičnih povezav potrebnih vse več baznih postaj. Zato se uporabljajo bazne postaje z malimi celicami, nameščene na drevesih, uličnih svetilkah ali stavbah na medsebojni razdalji le nekaj sto metrov (SCHEER, 2023a). Male celice se vse pogosteje uporabljajo tudi v zasebnih/podjetniških omrežjih[4] ter v velikih tovarnah, proizvodnih halah, na letališčih in v pristaniščih, v študentskih naseljih itd.

V primeru tehnologije 5G kombinacija tehnologij prenosa, višjih frekvenc in sočasnega zgoščevanja omrežja omogoča brezžično komunikacijo z (zelo) visokim prenosom podatkov in (ultra) nizko zakasnitvijo, zaradi česar je ta tehnologija ključni dejavnik za digitalizacijo dela in številne vrste uporabe pri delu v prihodnje. Pri tem pa se pričakuje, da se bodo tehnološke inovacije, ki jih uvaja 5G, v celoti uresničile šele v naslednji generaciji 6G, katere uvedba je predvidena za leto 2030. V okviru vodilnega projekta EU Hexa-X[5] je predvideno celo, da bo tehnologija 6G postala tehnologija za splošno rabo, ne le omogočitvena tehnologija, ki zagotavlja prisotnost (v katero se popolnoma poglobiš) na daljavo, kot je metaverzum, obsežno ustvarjanje digitalnih dvojnikov (tj. nadzorne plošče v realnem času ter virtualni modeli naprav in (proizvodnih) objektov), e-zdravje za vse, kobote (tj. sodelovalne robote, ki podpirajo ljudi pri njihovih nalogah) in popolno integracijo interneta stvari s številnimi senzorji na telesu in zunaj njega. To pomeni, da bo tehnologija 6G daljnosežno vplivala na družbeno in industrijsko preobrazbo (industrija 5.0). Za to bo tehnologija 6G uporabljala dele radijskega spektra, ki so visoko nad tistimi, ki jih uporablja ali jih bo uporabljala tehnologija 5G (>100 GHz), kar ne bo omogočalo le izjemno visokega prenosa, ampak tudi lokalizacijo in zaznavanje na centimetrski ravni.

Energetski prehod

Za prehod na obnovljive vire energije, ki poteka, so potrebne razširitve in nadgradnje električnega omrežja (npr. uvedba visokonapetostnih vodov in razsmerniških central) ter boljše spremljanje trenutne porabe energije na individualni ravni (npr. prek brezžičnega omrežja senzorjev, imenovanih pametni števci). Tveganja zaradi izpostavljenosti za delavce (npr. zidarje, električarje in vzdrževalce) in delavce, ki sodelujejo pri razvoju in vzdrževanju nove (energetske) infrastrukture – kar vključuje morebitno visoko izpostavljenost zaradi visokega toka –, so dobro znana in se delavci v elektrarnah očitno dobro zavedajo tveganj in tega, kako se zaščititi (Stege in drugi, 2020), pri čemer se morda podizvajalci v elektrarnah ne zavedajo povsem, da jim bodo lahko inženirji za zdravje, varnost in okolje svetovali. Poleg tega pametni števci – zaradi redkih prenosov in posebnih mest, kjer so nameščeni – na splošno malo prispevajo k skupni izpostavljenosti radiofrekvenčnim EMP (Aerts in drugi, 2019). Nazadnje, pri (industrijski) uporabi za ogrevanje se vse pogosteje prehaja z ogljikovodikovih goriv na električno

[3] Glejte: https://www.emf-health-cluster.eu/
[4] Zasebna/podjetniška omrežja 5G niso javno dostopna in so zelo varna.
[5] Glejte: https://hexa-x.eu/. Evropska komisija je uvedla razne vodilne projekte za reševanje pomembnih znanstvenih in tehnoloških izzivov ter spodbujanje inovativnosti v EU: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/flagships

indukcijo, kar vodi do več nizkofrekvenčnih virov magnetnih polj, ta so lahko morda zelo intenzivna, vendar so lahko precej pod mejnimi vrednostmi izpostavljenosti (Evropska komisija, 2015a, 2015b).

Brezžični prenos električne energije

Brezžični prenos električne energije se je uveljavil kot vodilna tehnologija za polnjenje osebnih naprav (npr. pametnih telefonov in prenosnih računalnikov, pa tudi električnih orodij), njegova uporaba pa se preiskuje ali razširja tudi na medicinske pripomočke (npr. srčne spodbujevalnike), električna vozila, brezpilotne zrakoplove in druga industrijska avtonomna vozila/robote. Uporablja ga bodisi usmerjena radiofrekvenčna EMP (žarke) ali induktivne ali resonančne tehnologije, ki oddajajo EMP v frekvencah med 10 kHz in 50 MHz (ETSI, 2019). V prvem primeru energija, ki teče po zraku, omogoča neprekinjeno delovanje naprav in strojev, robotov in brezpilotnih zrakoplovov. V poklicnih okoljih se brezžični prenos električne energije pojavlja predvsem v sektorju vzdrževanja in popravil, predelovalni industriji, sektorjih prevoza in logistike ter vseh sektorjih z delovnimi mesti, ki uporabljajo (mobilno) robotiko. Brezžično polnjenje vozil bo v večjem obsegu uvedeno tudi z vključitvijo v (cestno) infrastrukturo. Raznovrstna vozila, kot so avtomobili, avtobusi in tovornjaki, se na primer že polnijo prek zank[6] na parkiriščih in avtobusnih postajališčih. Poleg tega bodo v (bližnji) prihodnosti v ceste vgrajene polnilne zanke, ki bodo neprekinjeno polnile vozila med vožnjo. Iz nedavnih študij – čeprav niso bile izvedene v poklicnih okoljih – je razvidno, da je izpostavljenost sistemom brezžičnega prenosa električne energije nižja od mejnih vrednosti izpostavljenosti (Stam, 2022). Vendar bi lahko prihodnje povečanje moči sistemov, na primer za polnjenje velikih električnih vozil, pripeljalo do večje izpostavljenosti, in to zlasti v poklicnih okoljih.

Zdravstvo

V zdravstvu so za uporabo EMP značilne vse natančnejše in vse bolj tehtne metode, pri katerih se pogosto uporabljajo višje frekvence, usmerjeni žarki in/ali višja (lokalizirana) moč. Novi razvojni dosežki na področju diagnostičnih orodij so slikanje z magnetnimi delci (5–50 kHz) (Billings in drugi, 2021), kar bi lahko znatno povečalo izpostavljenost zdravstvenih delavcev, radar za površinsko slikanje (1–60 GHz) (de Waard-Schalkx in drugi, 2015) in za spremljanje vitalnih znakov (do 120 GHz) (Cardillo in Caddemi, 2020) ter teraherčne frekvence za slikanje, spektroskopijo in zdravljenje (Amini in drugi, 2021). Poleg tega bi lahko tudi novi kozmetični posegi z uporabo pulzirajočih nizkofrekvenčnih impulzov (15 Hz) ali radiofrekvenčnih elektromagnetnih polj (27 MHz–5.8 GHz) pomenili tveganje za zdravstvene delavce (Stam, 2022).

Varnost

Teraherčne in milimetrske valovne frekvence so prisotne tudi pri varnostni uporabi in skeniranju, npr. kot telesni skenerji na letališčih, poštni skenerji in pri neuničujočih preiskavah. Te vrste uporabe se lahko med seboj znatno razlikujejo po jakosti: ravni polja v varnostnih skenerjih so, ker jim je izpostavljena splošna javnost, omejene na jakosti pod mejnimi vrednostmi, v medicini in industriji pa se lahko uporabljajo višje jakosti, ki jih morajo uporabljati dobro usposobljeni delavci.

Vplivi EMP na varnost in zdravje pri delu

Škodljivi učinki na zdravje ter predpisi in zakonodaja o izpostavljenosti EMP

Raziskave o vplivih EMP na zdravje so bile obsežne, vendar so smernice za izpostavljenost osredotočene predvsem na akutne, kratkoročne učinke. Ti učinki so odvisni od frekvence EMP, njihove jakosti in trajanja izpostavljenosti. Na primer, med učinki izpostavljenosti nizkofrekvenčnemu EMP, ki presega mejne vrednosti izpostavljenosti za varnost in zdravje pri delu, so zaznavanje površinskega električnega naboja, neposredna stimulacija živčnega in mišičnega tkiva ter indukcija fosfenov v mrežnici (tj. lažno svetlikanje pred očmi). Pri višjih frekvencah (100 kHz do 300 GHz, slika 1) se učinki stimulacije živcev in spremembe prepustnosti celičnih membran (pri zelo visokih ravneh izpostavljenosti) zmanjšajo, pri čemer se lahko temperatura lokalno zviša, zviša se tudi telesna temperatura, kar povzroči tako imenovane termične vplive. Poleg tega je znano, da imajo lahko EMP

[6] Polnilne zanke prenašajo energijo brezžično prek elektromagnetne indukcije. Ta metoda se pogosto uporablja tudi pri gospodinjskih aparatih, kot so električne zobne ščetke in brezžične polnilne ploščice za pametne telefone.

tudi posredne učinke, ki lahko povzročijo varnostna tveganja, kot so kontaktni tokovi, iskre pri razelektritvah in elektromagnetne motnje pri medicinskih vsadkih ali njihovo segrevanje.

Vsi ti učinki so dobro znani in so podlaga za sedanje smernice o izpostavljenosti, ki so jih določili mednarodni organi, kot je Mednarodna komisija za zaščito pred neionizirajočimi sevanji (ICNIRP), ki je zbrala znanstvene dokaze o škodljivih učinkih na zdravje zaradi izpostavljenosti EMP v treh publikacijah: eni za statična magnetna polja (ICNIRP, 2009), drugi za nizkofrekvenčno območje (tj. od 1 Hz do 10 MHz) (ICNIRP, 2010), v katerem bi bilo treba magnetno in električno polje obravnavati ločeno, saj nista povezani v enem samem elektromagnetnem polju kot v daljnem polju, saj delavci virov EMP večinoma ne uporabljajo v polju, ki še ni daljno polje, ter tretji za območje med 100 kHz in 300 GHz (ICNIRP, 2020). Na podlagi teh znanstvenih dokazov je ICNIRP določila mejne vrednosti izpostavljenosti, ki so znane kot osnovne omejitve in referenčne vrednosti. Referenčne vrednosti izhajajo iz osnovnih omejitev in zagotavljajo enakovredne ravni varstva, na delovnih mestih pa jih je veliko lažje oceniti. Upoštevati je treba, da so mejne vrednosti izpostavljenosti določene za posamezno frekvenco (pas), ICNIRP pa določa metodo tehtanja za sočasno izpostavljenost več virom na neki lokaciji v istem frekvenčnem pasu ali drugih frekvenčnih pasovih. Da bi upoštevali znanstveno negotovost (vključno z razlikami v toplotni fiziologiji med prebivalstvom ter v ravneh telesne aktivnosti in okoljskih pogojih), so bili najprej uporabljeni dodatni redukcijski faktorji za osnovne omejitve, ki so (petkrat) manjši za poklicno izpostavljenost kot za splošno javnost, saj se za zadnjenavedeno šteje, da je bolj spremenljiva, kar zadeva starost in zdravstveno stanje, ter se ne zaveda morebitnih tveganj ali jih ne more nadzorovati (ICNIRP, 2020). Šteje se, da skladnost z referenčnimi vrednostmi ICNIRP in/ali osnovnimi omejitvami pomeni zadostno zaščito pred ugotovljenimi škodljivimi učinki na zdravje.

Poleg tega se smernice in zakonodaja EU o izpostavljenosti EMP opirajo na smernice ICNIRP ter obsegajo Priporočilo Evropskega sveta 1999/519/ES za izpostavljenost splošne javnosti EMP ter Direktivo 2013/35/EU iz leta 2013 o poklicni izpostavljenosti, ki se z nekaterimi nacionalnimi razlikami od leta 2017 izvaja v vseh državah članicah.

V več študijah (npr. Rijs in Stam, 2019) se je raziskovalo možne povezave med dolgotrajno izpostavljenostjo EMP in različnimi zdravstvenimi težavami, vključno z rakom, reproduktivnimi težavami, zaostanki v razvoju in nevrodegenerativnimi motnjami. Kljub obsežnim raziskavam znanstveni dokazi niso dokončni, saj nekatere študije kažejo, da obstaja korelacija (vendar brez znanstveno dokazanih vzročnih povezav, kot so odzivi na odmerke), v drugih študijah pa pomembna povezava ni bila ugotovljena (ICNIRP, 2020).

Izpostavljenost EMP na delovnem mestu

Evropska komisija je v treh nezavezujočih priročnikih (Evropska komisija, 2015a; 2015b; 2015c) zagotovila obsežne informacije, da bi delodajalci lahko razumeli, kaj storiti, da bi izpolnili zahteve Direktive 2013/35/EU; priročniki so osredotočeni na delovna okolja z morebitnimi visoko intenzivnimi EMP. Poleg tega obstaja več referenčnih matrik izpostavljenosti pri viru in na delovnem mestu (Vila in drugi, 2017; Migault in drugi, 2019). Spremembe glede uporabe EMP, navedene zgoraj, pa bi lahko povzročile dodatno, povečano ali spremenjeno izpostavljenost EMP v poklicnih okoljih, kot je navedeno v nadaljevanju.

- Zaradi zgoščevanja omrežij mobilne telefonije (tj. več anten baznih postaj na površino) se povečuje število ljudi, ki delajo bližje telekomunikacijskim antenam kot prej, zlasti če se uporabljajo bazne postaje z malimi celicami. To velja na splošno (npr. za krovce in električarje), še posebej pa za delovna mesta z lastnimi brezžičnimi omrežji (tj. zasebnimi/podjetniškimi omrežji mobilne telefonije, omrežji Wi-Fi in/ali senzorskimi omrežji), zlasti kadar se število (osebnih) brezžičnih naprav in senzorjev na teh delovnih mestih povečuje. Predvsem senzorji na telesu (npr. za spremljanje osebnega zdravja ali izpostavljenosti) bi lahko povečali izpostavljenost delavca EMP, vendar le lokalno (tj. omejeno na območje na telesu, na katerem je senzor nameščen). Pričakuje se, da bodo te tehnološke inovacije vsesplošne, ne pa povezane z nekim posebnim sektorjem.
- Vse večja prisotnost (velikih) sistemov za brezžični prenos električne energije bi lahko povečala izpostavljenost EMP pri frekvencah, odvisnih od tehnologije (glej oddelek 3), v prometnem in logističnem sektorju (npr. pogoni avtobusov in tovornjakov). To velja tudi za delovna mesta, na katerih se osebna orodja in roboti/brezpilotni zrakoplovi brezžično polnijo na postajah, ki so podobne tistim, ki se uporabljajo za mobilne telefone (vendar so od njih večje), ne pa s polnilci z nožicami.

- Z elektrifikacijo bi se lahko povečala izpostavljenost nizkofrekvenčnim magnetnim poljem (iz visokonapetostnih daljnovodov, pretvornikov in industrijskih procesov ogrevanja, kakršno je indukcijsko ogrevanje) (SCHEER, 2023b).
- Uporaba EMP v zdravstvenem sektorju se povečuje, zato bi lahko bilo več medicinskega osebja (vključno z netehničnim osebjem) izpostavljenega EMP z zelo različnimi frekvencami (Stam in Yamaguchi-Sekino, 2017; Turuban, 2023).
- Uporaba vse višjih frekvenc (ne le v omrežjih mobilne telefonije, ampak tudi v medicinskih in varnostnih aplikacijah za skeniranje) bi lahko povzročila povečanje lokalizirane, vendar površinske izpostavljenosti, katere tveganja še niso jasna.

Preprečevanje tveganj za varnost in zdravje pri delu, povezanih z EMP

V skladu z Direktivo 2013/35/EU so delodajalci dolžni oceniti vsa tveganja zaradi izpostavljenosti EMP na delovnem mestu in uvesti ustrezne preventivne ukrepe. Med drugim morajo zagotoviti skladnost z mejnimi vrednostmi iz Direktive. To morajo opraviti na podlagi zlahka dostopnih informacij: specifikacij, ki jih predloži proizvajalec (npr. o tem, ali posebna uporaba izpolnjuje zahteve ustreznega prava EU o proizvodih, ki lahko določa strožje ravni varovanja od zahtev iz Direktive 2013/35/EU), matrik vira in/ali izpostavljenosti na delovnem mestu (Vila in drugi, 2017; Migault in drugi, 2019), študij pregledov in/ali praktičnih vodnikov/priročnikov, ki so jih objavili EU, nacionalne institucije in organi za standardizacijo. Dokumenti (Evropska komisija, 2015a; 2015b) na primer vsebujejo sezname opreme in delovnih mest, za katere bi lahko bile potrebne **posebne ocene tveganja**. V njih so zagotovljene tudi smernice glede potrebe po oceni tveganj, povezanih z EMP, za delavce, ki so izpostavljeni posebnemu tveganju, kot so delavci z aktivnimi medicinskimi pripomočki, vključno s srčnimi spodbujevalniki (Modenese in Gobba, 2021). Te informacije pa morda še ne zadostujejo za oceno, ali bodo izpolnjene zahteve glede skladnosti z mejnimi vrednostmi izpostavljenosti za nastajajoče aplikacije EMP ter s tem povezanimi tveganji za varnost in zdravje pri delu. V tem primeru je treba opraviti meritve *in situ* ali dozimetrične izračune in jih primerjati z mejnimi vrednostmi, določenimi v pravu, pri čemer morajo biti upoštevani vsi dvomi, ki so z njimi povezani.

Če so mejne vrednosti presežene, je treba sprejeti zaščitne in preventivne ukrepe (primere je mogoče najti v (Evropska komisija, 2015a; 2015b)). Ker se jakost EMP z naraščajočo oddaljenostjo od vira hitro zmanjšuje, je najučinkovitejši ukrep za zmanjšanje izpostavljenosti povečanje razdalje med virom in delavcem. To je mogoče doseči s tehničnimi in organizacijskimi ukrepi, kot so ovire, oznake in navodila za delo. Ob tem so zasloni učinkoviti pri vseh oblikah EMP razen pri nizkofrekvenčnih magnetnih poljih. Informacije o zmanjšanju izpostavljenosti EMP so na voljo tudi v smernicah Evropske komisije (Evropska komisija, 2015a), ki vključujejo tudi ukrepe za načrtovanje delovnih mest ter določbe v zvezi z delovno opremo in metodami. Tako morajo biti na primer tuljave, transformatorji in postaje za brezžično polnjenje varni že po svoji zasnovi, če so nameščeni stran od delovnih postaj. Ne bi smelo biti mogoče stati neposredno pred oddajnimi antenami.

Vrzeli, potrebe, prednostne naloge in priporočila v zvezi z EMP ter varnostjo in zdravjem pri delu

Znanstvene raziskave

Na splošno ni veliko študij o učinkih EMP na zdravje in o intenzivnosti izpostavljenosti EMP pri:

1. frekvencah, ki se uporabljajo v nastajajočih tehnologijah za mobilne komunikacije (tj. med 6 in 300 GHz);
2. srednjih frekvencah, ki se uporabljajo pri brezžičnem prenosu električne energije;
3. frekvencah, nižjih od THz, ki se uporabljajo v novih tehnologijah slikanja in skeniranja (in za katere se pričakuje, da se bodo uporabljale v tehnologiji 6G). Največje vrzeli v raziskavah so na teh področjih:
    a. ravni izpostavljenosti, zlasti v poklicih, v katerih se uporablja oprema, ki ustvarja morebitna močna magnetna, električna ali elektromagnetna polja (Turuban, 2023);

b. morebitni učinki na zdravje (in zaradi njih morebitni mehanizmi biološkega medsebojnega vpliva) (Jeschke, 2022);

c. dolgoročna kumulativna izpostavljenost EMP na delovnem mestu (Hansson Mild, 2023) in

d. najpomembnejša metrika izpostavljenosti (Turuban, 2023).

Poleg tega se lahko zdravstveni in senzorični učinki zaradi izpostavljenosti EMP med delavci bistveno razlikujejo. Na izpostavljenost EMP vplivajo razni osebni in okoljski dejavniki, med drugim:

- osebne značilnosti: anatomija, telesne značilnosti, kar vključuje vsadke ali pirsinge in uporabo zdravil;
- drža pri delu: položaj in gibanje telesa med delom;
- delovno okolje:
  - gradbeni materiali: beton lahko z železnimi tkanimi mrežami ublaži izpostavljenost radiofrekvenčnim EMP in delno zaščiti pred njimi, les pa zagotavlja zaščito;
  - uporaba orodij: ravnanje z orodji ali uporaba orodij (Jeschke, 2023) lahko vpliva na raven izpostavljenosti.

Ta variabilnost že pri enem samem delavcu in med njimi je vzrok za precejšnjo negotovost v sedanjih študijah o oceni izpostavljenosti in matrikah izpostavljenosti, v katerih se uporabljajo ti podatki (Turuban, 2023).

Zato so potrebne študije, v katerih bodo uporabljeni realistični scenariji izpostavljenosti na delovnem mestu (npr. visoke najvišje izpostavljenosti, ki jim sledijo obdobja brez izpostavljenosti (Hansson Mild, 2023) ali izpostavljenosti blizu mejnih vrednosti v trajanju osem ur ali več (Jeschke, 2022)) in/ali v katerih se zbirajo podrobni, opisni podatki o:

(a) tipičnih poklicnih merilih, kot so delavčeva anatomija, položaji pri delu in drža, telesna dejavnost, neugodno okolje in uporaba orodij, zlasti tistih, ki oddajajo elektromagnetno sevanje (Jeschke, 2022);

(b) značilnostih emisij EMP (npr. pogostost in modulacija poklicnih virov (Jeschke, 2022));

(c) morebitnih izpostavljenostih v celotnem delovnem življenju (Hansson Mild, 2023) in

(d) rezultatih na področju zdravja, razen tistih, ki so že znani (npr. zaradi termalnih učinkov zaradi radiofrekvenčnih EMP) (Jeschke, 2022).

Tovrstne študije bi znatno izboljšale znanstveno razumevanje ravni in trajanja izpostavljenosti EMP v različnih poklicnih okoljih ter bi se lahko uporabile kot natančnejše izhodišče za epidemiološke študije o učinkih na zdravje zaradi izpostavljenosti EMP, pri katerih se trenutno komajda upošteva poklicna izpostavljenost. Vendar so potrebni dolgoročni, individualni podatki o ravneh poklicne izpostavljenosti v povezavi z drugimi (ustreznimi) okoljskimi/poklicnimi izpostavljenostmi (npr. prek omrežij senzorjev interneta stvari), da bi se poiskali dejavniki, ki obstajajo hkrati, ali determinante (Stam in Rijs, 2019; Hansson Mild in drugi, 2023). Na žalost ustrezne, poceni merilne naprave za pridobivanje teh podatkov (pogosto) še niso na voljo in jih bo treba razviti in razdeliti zlasti med (zelo) izpostavljene posameznike.

Politika EU

Ker je ICNIPP leta 2020 izdala nove smernice, na katere se že sklicuje več tehničnih standardov (npr. IEC 62232:2023 in IEC TR 63377:2022), Direktiva 2013/35/EU pa še vedno temelji na smernicah iz let 1998, 2009 in 2010, je pravni položaj postal zapleten. Znanstveni odbor za zdravstvena, okoljska in nastajajoča tveganja (SCHEER) je zato nedavno „podal pozitivno mnenje o potrebi po tehnični reviziji prilog k Priporočilu Sveta 1999/519/ES in Direktive 2013/35/EU v zvezi z radiofrekvenčnimi EMP (100 kHz do 300 GHz)“ (SCHEER, 2023a). V smernicah iz leta 2020 so v primerjavi s smernicami iz leta 1998 dejansko vsebovane tudi prilagoditve, pomembne za izpostavljenost nastajajočim virom EMP, kot so telekomunikacije 5G, ki temeljijo na kratkih lokaliziranih izpostavljenostih pri višjih frekvencah (do 300 GHz). Jasno je, da je z uvedbo novih tehnologij EMP vse bolj zapleteno oceniti izpostavljenosti EMP na delovnem mestu, kar od inženirjev za zdravje, varnost in okolje zahteva vse podrobnejše znanje o metodah merjenja in modeliranja (Jeschke, 2022; Stam, 2022).

Zato so za zanesljivo prakso ocene tveganja za varnost in zdravje pri delu bistvene praktične ugotovitve, ki so pomembne za oceno izpostavljenosti EMP na delovnem mestu v zvezi s trajanjem izpostavljenosti med delovnim časom v obdobju več desetletij (Jeschke in drugi, 2022). Te ugotovitve je treba še pripraviti, tako kot tudi razviti ustrezne merilne naprave, in jih je mogoče obravnavati v posodobljenih različicah literature Evropske komisije (Evropska komisija, 2015a; 2015b; 2015c) ali vključiti v ustrezne tehnične standarde.

Nazadnje je pomembno opozoriti, da čeprav ICNIRP (2020) poudarja pomen senzoričnih in vedenjskih sposobnosti delavcev, da se zavedajo morebitnih tveganj v zvezi z radiofrekvenčnimi EMP in uporabljajo ustrezne ukrepe za zmanjšanje škode, Jeschke in drugi (2022) pravilno ugotavljajo, da okvirna direktiva EU iz leta 1989 (89/391/EGS) daje prednost kolektivnim tehničnim in organizacijskim zaščitnim ukrepom pred osebnimi (individualnimi) zaščitnimi ukrepi. Vendar je za varnost in zdravje pri delu obvezno izvajanje (individualnih) ocen tveganja za delavce, ki so izpostavljeni posebnemu tveganju. Zato so potrebne ustrezne smernice, ki bi jih bilo mogoče brez težav razširiti na vse delavce.

Delodajalci, delavci in strokovnjaki za varnost in zdravje pri delu

Čeprav so na voljo matrike izpostavljenosti in praktični vodniki/priročniki o izpostavljenosti EMP v poklicnih okoljih (vključno z ukrepi za zmanjšanje izpostavljenosti), je znanje delavcev o virih EMP na delovnem mestu in izpostavljenosti tem poljem običajno nizko (Turuban, 2023). Poleg tega jih delavci morda ne dojemajo kot nevarnih in zato morda ne namenjajo potrebne pozornosti preprečevanju, preventivne ukrepe pa morda celo dojemajo kot neprijetne (Stege, 2022). Za učinkovitejše obveščanje delodajalcev, delavcev ter strokovnjakov za varnost in zdravje pri delu bi lahko delodajalci zagotovili senzorje za merjenje izpostavljenosti EMP (Bhatt in drugi, 2022), ki bi jih delavci nosili ali pa bi bili nameščeni v visoko intenzivnih okoljih EMP. Te nosljive naprave bodo zagotavljale zgodnje opozarjanje ter podatke, potrebne za znanstvene študije o poklicni izpostavljenosti EMP in morebitnih učinkih na zdravje (glej 5.1). V posebnih ciljnih skupinah za spremljanje z nosljivimi senzorji bi bili delavci, ki aktivno uporabljajo vire EMP (npr. fizioterapevti in varnostno osebje), ali tisti, ki delajo v njihovi bližini, npr. električarji. Še pomembneje pa je, da bi bili vključeni delavci, ki se lahko nevede znajdejo v bližini aktivnih virov EMP, ne da bi se zavedali morebitnih tveganj, kot so medicinske sestre ali osebje za vzdrževanje in čiščenje. Ta zadnja skupina postaja z uvedbo zasebnih omrežij 5G in sistemov brezžičnega prenosa električne energije vse pomembnejša.

Čeprav se pri presoji EMP glede varnosti in zdravja pri delu obsežno uporabljajo meritve *in situ*, sta – če obstaja razlog za domnevo, da so mejne vrednosti presežene –, za določitev skladnosti z mejnimi vrednostmi izpostavljenosti potrebni simulacija in numerična določitev, ki sta se izkazali za zelo zahtevni za delavce na področju varnosti in zdravja pri delu zaradi stroškov, ki jih prinašata, in potrebnega strokovnega znanja (Jeschke, 2022). Zato obstaja potreba po splošnih pravilih, s katerimi bi bil omogočen hiter izračun za zagotovitev skladnosti z vrednostmi. Nekatere države so že pripravile take smernice, glejte na primer Bolte in Pruppers (2006).

Sklepne ugotovitve

Ta dokument vsebuje celovit pregled posledic nastajajočih uporab EMP za varnost in zdravje pri delu, pri čemer je poudarjena vseprisotnost EMP v sodobnih delovnih okoljih zaradi tehnološkega napredka, zaradi katerega so ključna gonilna sila digitalizacije dela in industrije 5.0 (vključno z napredno avtomatizacijo, robotiko, virtualizacijo, delom na daljavo, nadzornimi sobami itd.).

Ocenjevanje tveganj zaradi izpostavljenosti EMP je zelo zapleteno zaradi raznovrstnosti virov v smislu frekvence, jakosti in uporabe, zlasti v poklicnih okoljih, ter zaradi različnosti s tem povezanih škodljivih učinkov na zdravje. Akutni učinki visoke ravni izpostavljenosti EMP pri trenutno uporabljenih frekvencah so dobro razumljeni, vendar so še vedno polemike in vrzeli v zvezi z dolgoročnimi učinki izpostavljenosti na nizki ravni in prihodnjo uporabo vse višjih frekvenc. Zato je treba regulativne standarde in (praktične) smernice, ki so namenjeni zaščiti delavcev, nenehno posodabljati na podlagi najnovejših raziskav. Za to je zelo priporočljivo dolgoročno spremljanje ravni izpostavljenosti EMP na delovnem mestu v ustreznih frekvenčnih pasovih z uporabo fiksnih in nosljivih senzorjev ter v kombinaciji s parametri zdravja delavcev.

Skratka, potreben je multidisciplinarni pristop k ocenjevanju izpostavljenosti EMP in preprečevanju tveganj, kar vključuje raziskave, specifične za posamezne poklice, stalno prilagajanje politik in učinkovito komunikacijo med deležniki na področju varnosti in zdravja pri delu, da se zagotovita zdravje in varnost delavcev v vse bolj brezžično povezanem in napajanem okolju.

Zahvala

Zahvaljujemo se Rianne Stam (Nizozemski nacionalni inštitut za javno zdravje in okolje – RIVM), Stefanii Marassi (pravo, THUAS) ter Emanuelle Brun in Annick Starren (EU-OSHA) za kritičen pregled in plodne razprave.

Viri

Amini, T., Jahangiri, F., Ameri, Z. in Hemmatian, M. A. (2021). A review of feasible applications of THz waves in medical diagnostics and treatments. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, *12*, e92.

Bhatt, C. R., Henderson, S., Brzozek, C. in Benke, G. (2022). Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: An update. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 45(3), str. 687–704. https://link.springer.com/article/10.1007/s13246-022-01146-y

Bolte, J. F. B. in Pruppers, M. J. M. (2006). Electromagnetic fields in the working environment (junij 2006). *SZW-report RIVM-nr 610015001*, Ministrstvo za socialne zadeve in zaposlovanje (SZW)/Nizozemski nacionalni inštitut za javno zdravje in okolje (RIVM). https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/610015001.pdf

Billings, C., Langley, M., Warrington, G., Mashali, F. in Johnson, J. A. (2021). Magnetic particle imaging: Current and future applications, magnetic nanoparticle synthesis methods and safety measures. *International Journal of Molecular Sciences, 22*.

Cardillo, E. in Caddemi, A. (2020). A review on biomedical MIMO radars for vital sign detection and human localization. *Electronics, 9(9)*, članek št. 9.

De Waard-Schalkx, I., Stam, R., van der Schaaf, M. in Bijwaard, H. (2015). Recent developments in medical techniques involving ionising or non-ionising radiation: Update 2014. *RIVM Report 2014-0070*, Bilthoven, Nizozemski nacionalni inštitut za javno zdravje in okolje.

EU-OSHA – Evropska agencija za varnost in zdravje pri delu. (2023). *Poročilo o politiki:Pametni digitalni sistemi za spremljanje varnosti in zdravja pri delu: priložnosti in izzivi.* https://osha.europa.eu/en/publications/smart-digital-monitoring-systems-occupational-safety-and-health-opportunities-and-challenges

Evropska komisija (2021). *Sporočilo Komisije Evropskemu parlamentu, Svetu, Evropskemu ekonomsko-socialnemu odboru in Odboru regij – Strateški okvir EU za varnost in zdravje pri delu za obdobje 2021–2027 – Varnost in zdravje pri delu v spreminjajočem se svetu dela.* COM(2021) 323 final. Pridobljeno s spletnega naslova https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52021DC0323

Evropska komisija, Generalni direktorat za zaposlovanje, socialne zadeve in vključevanje (2015a). *Nezavezujoč priročnik o dobri praksi za izvajanje Direktive 2013/35/EU o elektromagnetnih poljih. Zvezek 1, Praktični vodnik.* Bruselj, Belgija.

Evropska komisija, Generalni direktorat za zaposlovanje, socialne zadeve in vključevanje (2015b). *Nezavezujoč priročnik o dobri praksi za izvajanje Direktive 2013/35/EU o elektromagnetnih poljih. Zvezek 2, Študije primerov.* Bruselj, Belgija.

Evropska komisija, Generalni direktorat za zaposlovanje, socialne zadeve in vključevanje (2015c). *Nezavezujoč priročnik o dobri praksi za izvajanje Direktive 2013/35/EU o elektromagnetnih poljih. Zvezek 3, Vodnik za mala in srednja podjetja.* Bruselj, Belgija.

Evropska komisija (2022). Industrija 5.0: Vizija preobrazbe za Evropo – Poročilo ESIR št. 3 o politiki. Urad za publikacije Evropske unije, ISBN 978-92-76-43352-1.

Evropski inštitut za telekomunikacijske standarde (ETSI) (2019). *ETSI TR 103 493 V1.1.1.: System Reference document (SRdoc); Wireless Power Transmission (WPT) systems operating below 30 MHz.* Sophia Antipolis Cedex, Francija.

Hansson Mild, K., Mattsson, M. O., Jeschke, P., Israel, M., Ivanova, M. in Shalamanova, T. (2023). *Occupational exposure to electromagnetic fields–Different from general public exposure and laboratory studies. International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20(16), 6552.

International Telecommunication Union (ITU) (2020). *Radio Regulations Articles: Edition of 2020.*

International Telecommunication Union (ITU) (2021). *Executive report ITU regional assessment for Europe on EMF exposure limits and risk communication challenges.*

Jeschke, P., Alteköster, C., Hansson Mild, K., Israel, M., Ivanova, M., Schiessl, K., Shalamanova, T., Soyka, F., Stam, R. in Wilén, J. (2022). Protection of workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields: A perspective on open questions in the context of the new ICNIRP 2020 guidelines. *Frontiers in Public Health*, 10.

Migault, L., Bowman, J. D., Kromhout, H., Figuerola, J., Baldi, I., Bouvier, G., Turner, M. C., Cardis, E. in Vila, J. (2019). Development of a job-exposure matrix for assessment of occupational exposure to high-frequency electromagnetic fields (3 kHz–300 GHz). *Annals of Work Exposures and Health*, 63(9), str. 1013–1028.

Modenese, A. in Gobba, F. (2021). Occupational exposure to electromagnetic fields and health surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730.

Rijs, K. J. in Stam, R. (2019). Onderzoek naar mogelijke langetermijneffecten van elektromagnetische velden op de gezondheid van werknemers – update 2019 [Research into possible long-term effects of electromagnetic fields on the health of workers – update 2019]. *RIVM Report* 2019-0010. Bilthoven: RIVM.

Znanstveni odbor za zdravstvena, okoljska in nastajajoča tveganja (SCHEER) (2023a). *Mnenje o potrebi po reviziji prilog k Priporočilu Sveta 1999/519/ES in Direktivi 2013/35/EU ob upoštevanju najnovejših dostopnih znanstvenih dokazov v zvezi z radiofrekvenco (100 kHz–300 GHz)*.

Znanstveni odbor za zdravstvena, okoljska in nastajajoča tveganja (SCHEER) (2023b). *Potencialni učinki izpostavljenosti elektromagnetnim poljem (EMP) na zdravje: 14. posodobitev glede frekvenc med 1 Hz in 100 kHz.*

Stam, R. in Yamaguchi-Sekino, S. (2018). Occupational exposure to electromagnetic fields from medical sources. *Industrial Health*, *56*(2), st. 96–105. https://doi.org/10/g8hwgs

Stam, R. (2021). Occupational exposure to radiofrequency electromagnetic fields. *Industrial Health*, *60*(3), str. 201–215.

Stam, R. (2022) Bronnen van blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden: Nieuwe ontwikkelingen [Sources of worker exposure to electromagnetic fields: New developments]. *RIVM-briefrapport 2022-0109*. Bilthoven: RIVM.

Stege, T. A. M., Bolte, J. F. B., Claassen, L. in Timmermans, D. R. M. (2020). Electromagnetic field exposure in power plants: A qualitative assessment of work safety perceptions among employees. *Journal of Risk Research, 23*(12), str. 1650–1660.

Stege, T. A. M. (2022). *Development of risk communication tools for occupational exposures.* Doktorska disertacija. Svobodna univerza v Amsterdamu (VU) in Nizozemski nacionalni inštitut za javno zdravje in okolje (RIVM), Nizozemska. Svetovalca Timmermans, D. R. M. in Bolte, J. F. B., ISBN 978-94-6421-796-4. Pridobljeno s spletnega naslova: https://research.vu.nl/en/publications/development-of-risk-communication-tools-for-occupational-exposure

Turuban, M., Kromhout, H., Vila, J., Vallbona-Vistós, M., Baldi, I. in Turner, M. C. (2023). Personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields in various occupations in Spain and France. *Environment International, 180*, 108156.

Vila, J., Bowman, J. D., Figuerola, J., Moriña, D., Kincl, L., Richardson, L. in Cardis, E. (2017). Development of a source-exposure matrix for occupational exposure assessment of electromagnetic fields in the INTEROCC study. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 27*(4), str. 398–408.

Avtorja: Sam Aerts in John Bolte.

Raziskovalna skupina Smart Sensor Systems, Fakulteta za tehnologijo, inovacije in družbo Univerze uporabnih znanosti v Haagu (THUAS), Nizozemska.

Vodji projekta: Annick Starren, Emmanuelle Brun - Evropska agencija za varnost in zdravje pri delu (EU-OSHA).

Ta dokument za razpravo je naročila agencija EU-OSHA. Njegovo vsebino, vključno z vsemi izraženimi mnenji in/ali ugotovitvami, so prispevali samo avtorji in ne odraža nujno stališč agencije EU-OSHA.

Niti Evropska agencija za varnost in zdravje pri delu niti osebe, ki delujejo v njenem imenu, niso odgovorne za morebitno uporabo informacij iz te publikacije

© Evropska agencija za varnost in zdravje pri delu, 2026

Reprodukcija je dovoljena z navedbo vira.

Za dovoljenje za uporabo ali reprodukcijo fotografij ali drugega gradiva, za katere agencija EU-OSHA nima avtorskih pravic, je treba zaprositi neposredno imetnike avtorskih pravic.