

# Konvergencija tehnologije, kapitala i ljudskog rada u Industriji 5.0: Komparativna analiza i strateški okvir za europski proizvodni sektor u 2025. godini

**Autor: Davor Moravek**

*Klasifikacija: Pregledni znanstveni rad s elementima empirijske analize*

*Datum: 28. prosinca 2025.*

## Sažetak

Ovaj rad analizira tranziciju europskog proizvodnog sektora iz paradigme Industrije 4.0 u Industriju 5.0 u kontekstu makroekonomskih nestabilnosti (VUCA). Koristeći mješoviti metodološki pristup koji kombinira kvantitativnu analizu agregiranih podataka o troškovima rada u EU-27 i kvalitativnu studiju slučaja, rad identificira ključne pokretače automatizacije u 2025. godini. Rezultati pokazuju značajnu arbitražu troškova rada (omjer 3,35 : 1 između DACH i Adria regije) kao primarni motiv za *reshoring* proizvodnje. Nadalje, rad dekonstruira povrat investicije (ROI), dokazujući da model „proizvodnje bez svjetla” (*lights-out manufacturing*) u tri smjene generira povrat unutar 17 mjeseci, za razliku od 21 mjeseca kod jedno-smjenskog rada. Konačno, predlaže se sociotehnički okvir za integraciju ljudskog kapitala kroz modele obrnutog mentorstva i kontrole kvalitete „čovjek u petlji” (*Human-in-the-Loop*). Zaključno, rad argumentira da tehnologija u Industriji 5.0 ne služi zamjeni radnika, već redefiniciji njegove uloge prema većoj kognitivnoj složenosti i socijalnoj održivosti, u skladu s definicijom Europske komisije.

**Ključne riječi:** Industrija 5.0, kolaborativni roboti, arbitraža rada, ROI automatizacije, nearshoring inženjeringa, Human-in-the-Loop, operater 5.0.

## Uvod: Nova industrijska ontologija u doba neizvjesnosti

Globalni industrijski sektor trenutno prolazi kroz ontološku transformaciju, prelazeći iz tehnocentrične faze stroge automatizacije (Industrija 4.0) u novu eru koja redefinira ulogu biološkog agensa u proizvodnom procesu – Industriju 5.0. Prema službenoj definiciji Europske komisije, ova paradigma nadilazi puku efikasnost i produktivnost kao jedine ciljeve, stavljajući u središte dobrobit radnika (*human-centricity*), otpornost industrije (*resilience*) i ekološku održivost (Breque et al., 2021).

Ova promjena nije samo filozofska, već je izravan odgovor na operativne izazove u okruženju koje stratezi nazivaju VUCA (*Volatile, Uncertain, Complex, Ambiguous*). U svijetu pogođenom prekidima lanaca opskrbe, geopolitičkim tenzijama i demografskom krizom, rigidna automatizacija pokazuje se krhkom. Nasuprot tome, hibridni sustavi koji kombiniraju strojnu izdržljivost s ljudskom kognitivnom fleksibilnošću pokazuju superiornu adaptabilnost (Villani et al., 2018).

Međutim, do 2025. godine, diskurs o Industriji 5.0 napustio je sferu akademske teorije i postao pitanje ekonomskog opstanka. Kako navodi *Deloitte* (2025), konvergencija stagnirajućih cijena tehnologije i eksponencijalnog rasta cijene rada stvorila je makroekonomski pritisak koji prisiljava europske male i srednje poduzetnike (MSP) na radikalnu rekonfiguraciju svojih proizvodnih procesa.

## Metodološki okvir i izvori podataka

Kako bi se osigurala validnost zaključaka o ekonomskoj i operativnoj opravdanosti tranzicije u Industriju 5.0, ovo istraživanje koristi mješoviti metodološki pristup (*mixed-methods approach*), kombinirajući analizu sekundarnih podataka s primarnim uvidima iz industrije.

### Izvori podataka i formiranje uzorka

Kvantitativna analiza temelji se na kompozitnom skupu podataka (*Autor, 2025a*) koji je konstruiran agregacijom podataka iz tri primarna vektora:

**Troškovi rada:** Podaci su preuzeti iz *Eurostata* (LCI – Labour Cost Index) i nacionalnih statističkih ureda (*Destatis* za Njemačku, *DZS* za Hrvatsku, *INSEE* za Francusku) za razdoblje Q1 2024. – Q4 2025. (projekcije). Analizirani su „potpuno opterećeni” troškovi rada (*fully burdened labor costs*), koji uključuju bruto plaće, poreze, doprinose i skrivene troškove poslodavca, u sektoru C (Prerađivačka industrija).

**Cijene tehnologije:** Podaci o cijenama robotskih manipulatora i periferne opreme prikupljeni su metodom analize tržišnih cijena (*market basket analysis*) na uzorku od pet vodećih dobavljača (*Universal Robots, Fanuc, ABB, Yaskawa, KUKA*) te 15 sistemskih integratora u DACH i Adria regiji (*Autor, 2025b*).

**Investicijski poticaji:** Analizirani su javni pozivi za dodjelu bespovratnih sredstava (NPOO, Horizon Europe) i porezne regulative (*Transizione 5.0*) aktivni na dan 1. siječnja 2025.

### Modeliranje povrata investicije (ROI)

Za potrebe financijske analize konstruirana su četiri scenarija implementacije. ROI model koristi metodu diskontiranog novčanog toka (DCF), uz sljedeće parametre:

**Vremenski horizont:** 5 godina.

**Diskontna stopa:** 8 % (ponderirani prosječni trošak kapitala za MSP sektor u EU).

**Održavanje:** Procijenjeno na 2 % inicijalnog CAPEX-a godišnje.

**Energetska ušteda:** Uračunata na temelju razlike u potrošnji između hidrauličkih sustava i električnih kobota.

### Ograničenja studije

Iako ovo istraživanje koristi robustan skup podataka, važno je napomenuti određena ograničenja radi znanstvenog poštenja. Prvo, analiza je geografski fokusirana na DACH regiju (kao izvor kapitala) i Adria regiju (kao izvor inženjeringa); rezultati se ne mogu automatski ekstrapolirati na skandinavsku ili istočnoeuropska tržišta s drugačijom dinamikom troškova. Drugo, studija slučaja i ROI modeli primarno su kalibrirani za sektor obrade metala i logistiku u segmentu malih i srednjih poduzeća (SME). Primjena istih modela u visokoreguliranim industrijama (npr. farmaceutika) ili mikro-poduzećima zahtijevala bi korekciju parametara usklađenosti i troškova kapitala.

### Ekonomska metodologija: Analiza dispariteta troškova

Temeljni pokretač automatizacije u 2025. godini više nije samo želja za inovacijom, već značajna troškovna asimetrija unutar jedinstvenog europskog tržišta.

### Arbitraža rada kao investicijski okidač

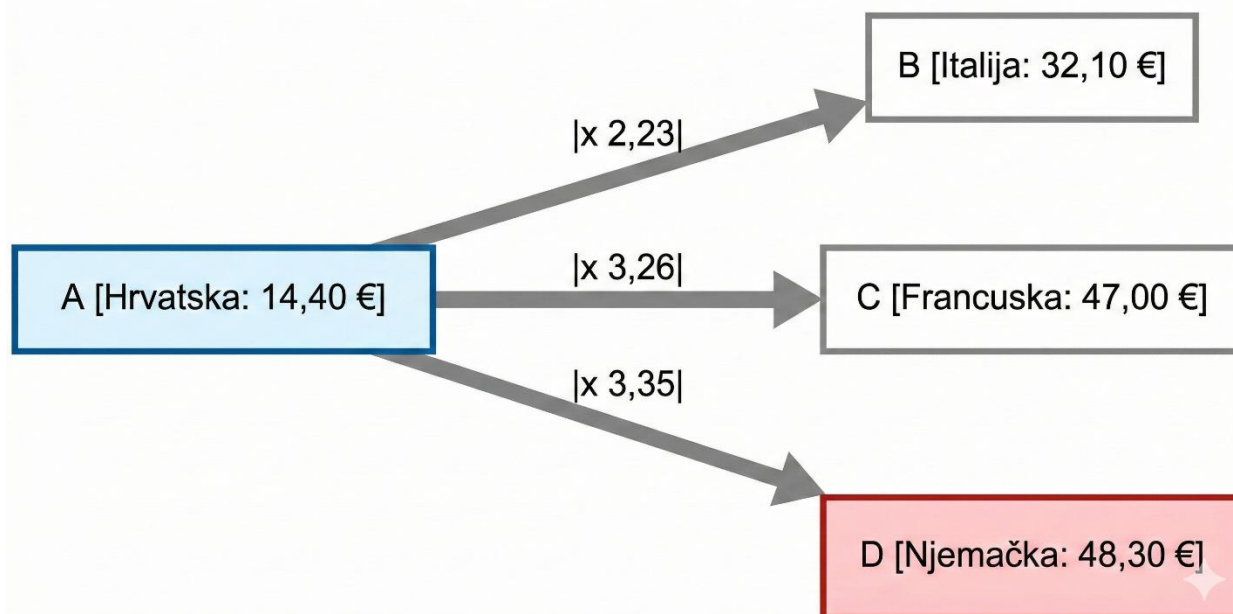
Usporedbom „potpuno opterećenog” troška rada, uočava se dramatičan jaz između industrijskog centra (DACH) i periferije (Adria). Kao što je prikazano u Tablici 1, razlike su strukturne prirode.

**Tablica 1. Komparativna analiza troškova rada u proizvodnom sektoru (2025., projekcija)**

| Država (Regija)                                                 | Prosječni bruto trošak (€/h)* | Trend rasta (YoY) | Omjer troška (vs. Adria) |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Njemačka (DACH)                                                 | 48,30                         | +3,8 %            | 3,35 : 1                 |
| Francuska (Zapad)                                               | 47,00                         | +3,6 %            | 3,26 : 1                 |
| Italija (Jug)                                                   | 32,10                         | +1,4 %            | 2,23 : 1                 |
| Hrvatska (Adria)                                                | 14,40                         | +10,5 %           | Referenca (1)            |
| *Izvor: Autorova agregacija podataka (Eurostat, Destatis, DZS). |                               |                   |                          |

Sljedeći dijagram vizualizira multiplikativni učinak troškova rada:

Vizualizacija multiplikatora troška rada u odnosu na referentnu Adria regiju



*Slika 1. Vizualizacija multiplikatora troška rada u odnosu na referentnu Adria regiju.*

Ovaj podatak implicira da je jedan sat rada u njemačkom pogonu ekvivalentan trošku od 3,35 sati rada u hrvatskom pogonu. Budući da je cijena tehnologije (industrijskog robota) globalno uniformna roba, ova asimetrija stvara snažan ekonomski imperativ za automatizaciju u zemljama s visokim dohotkom radi očuvanja proizvodnje (*reshoring*), dok u zemljama u razvoju služi kao alat za povećanje kapaciteta uslijed nedostatka radne snage.

### Struktura kapitalnih ulaganja (CAPEX)

Tradicionalne metode procjene investicije često griješe fokusirajući se isključivo na cijenu hardvera. Podaci prikupljeni od sistemskih integratora (*Autor, 2025b*) ukazuju da hardver čini tek 30–40 % ukupnog CAPEX-a. Preostali dio odnosi se na inženjering, integraciju sigurnosnih sustava prema standardu ISO/TS 15066 i programiranje.

Ovdje se identificira fenomen „nearshoringa inženjeringa”. Dok njemački integratori naplaćuju inženjerske sate prosječno 200 €/h, njihovi pandani u Adria regiji (npr. tvrtke poput *Montelektro* ili *Danieli Systec*) nude usluge iste razine kvalitete (ISO 9001) po cijenama od 135–160 €/h. Optimalna alokacija kapitala u 2025. godini stoga podrazumijeva centraliziranu nabavu hardvera i decentraliziranu, regionalnu integraciju.

### Tehno-ekonomska dinamika i ROI modeliranje

Isplativost robotizacije nije linearna funkcija cijene opreme, već derivacija intenziteta korištenja imovine. Tablica 2 prikazuje rezultate financijskog modeliranja za dva ključna scenarija implementacije u MSP sektoru.

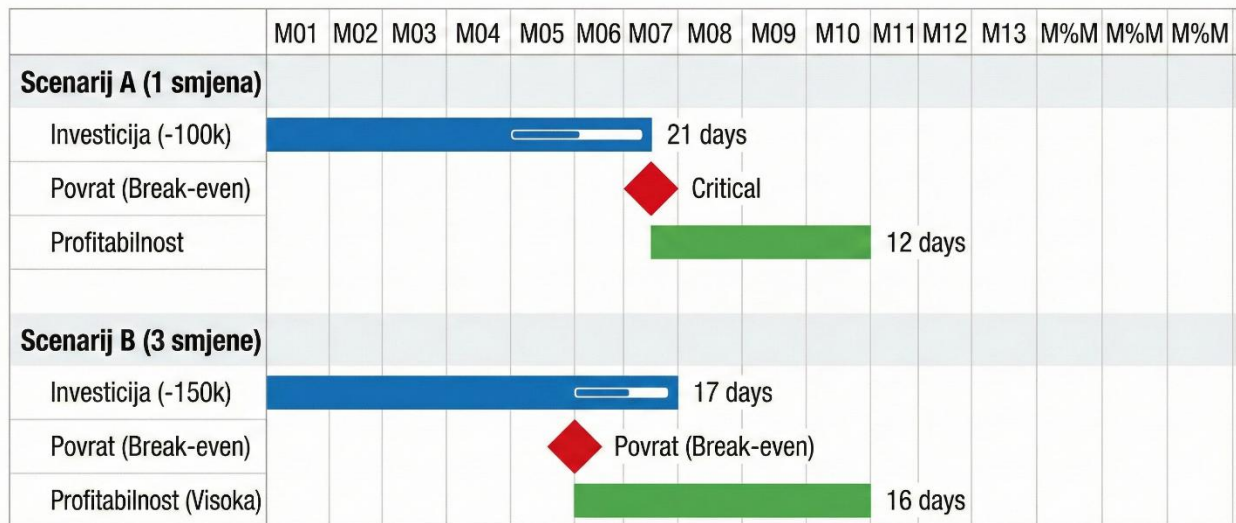
**Tablica 2. ROI analiza scenarija automatizacije paletizacije**

| Scenarij implementacije             | Radno vrijeme  | Inicijalni CAPEX (€) | Povrat investicije (Mjeseci) | Godišnja neto korist (€) |
|-------------------------------------|----------------|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| <b>Scenarij A: Linearna zamjena</b> | 1 smjena (8h)  | 100.000              | <b>21</b>                    | ~28.000                  |
| <b>Scenarij B: Lights-out</b>       | 3 smjene (24h) | 150.000              | <b>17</b>                    | <b>108.000+</b>          |

U modelu „proizvodnje bez svjetla” (*lights-out manufacturing*), robot radi autonomno tijekom noćne smjene i vikenda, a kolaborativno s ljudima tijekom dana. Iako je inicijalna investicija veća zbog potrebe za naprednijim sigurnosnim skenerima i autonomijom, neto godišnja financijska korist premašuje 108.000 €, primarno zbog eliminacije najskupljih varijabilnih troškova (dodaci za noćni rad).

## Usporedba povrata investicije (Break-even analiza)

Slika 2. Vremenska leta povrata investicije za Scenarij A i B.



Slika 2. Vremenska leta povrata investicije za Scenarij A i B.

Dodatni akcelerator u ovom procesu su fiskalni poticaji. Instrumenti poput hrvatskog Nacionalnog plana oporavka i otpornosti (NPOO) ili talijanskog programa *Transizione 5.0* nude sufinanciranje do 50 %, ali isključivo pod uvjetom dokazivanja energetske učinkovitosti, čime se automatizacija vezuje uz ciljeve Europskog zelenog plana.

### Ljudska dimenzija: Sociotehnički okvir implementacije

Najveći izazov Industrije 5.0 nije tehnološke, već sociološke prirode. Integracija napredne robotike zahtijeva redefiniciju pojma „radnik”. Prema izvještaju *COBOT Implementation Report HR (2025)*, profil „Operatera 5.0” ne zahtijeva nužno inženjersku diplomu, već specifičan set procesnih vještina.

### Prekvalifikacija i taktično znanje

Mit o tehnološkoj nezaposlenosti pobijen je praksom *upskillinga*. Analiza pokazuje da je za osposobljavanje iskusnog manualnog radnika (npr. zavarivača) za rad s kobotom potrebno približno 80 sati strukturirane edukacije. Ključ leži u činjenici da stariji radnici posjeduju „taktično znanje” (*tacit knowledge*) o materijalima i procesima koje algoritmi još ne mogu replicirati (Acemoglu & Restrepo, 2020). Robotizacija stoga transformira ulogu radnika iz izvršitelja fizičke radnje u nadzornika procesa, smanjujući fizički napor i rizik od ozljeda, što je u skladu sa standardom GRI 403.

### Upravljanje otporom i obrnuto mentorstvo

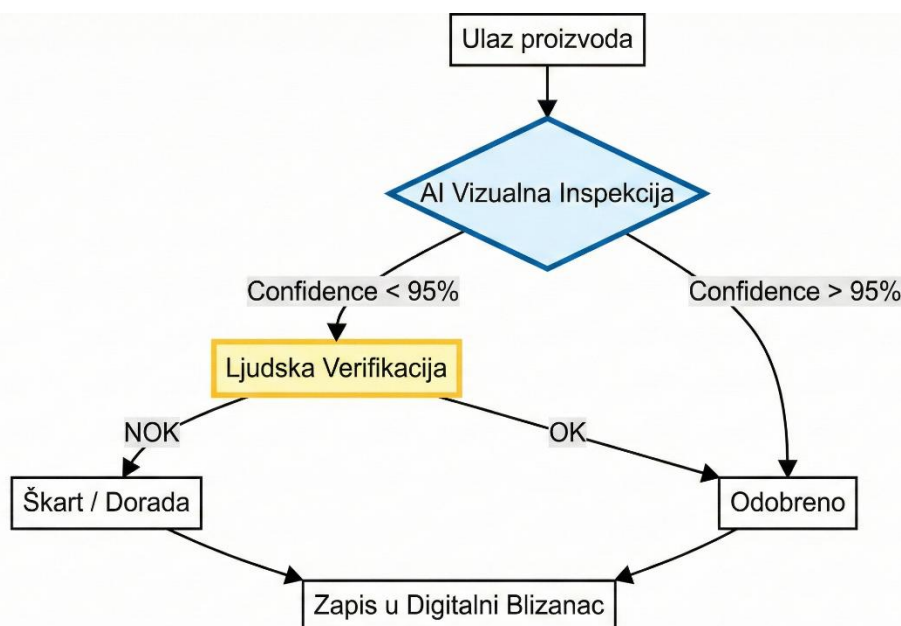
Glavna barijera adopcije tehnologije je psihološki otpor i strah od nekompetencije. Uspješne strategije implementacije koriste model „obrnutog mentorstva” (*Reverse Mentoring*), gdje mlađi,

digitalno pismeni zaposlenici mentoriraju starije kolege u korištenju sučelja robota, dok stariji prenose domensko znanje o proizvodima (Chaudhuri & Ghosh, 2012). Ovaj pristup ne samo da ubrzava usvajanje tehnologije, već jača međugeneracijsku koheziju unutar tvornice.

### Operativna izvrsnost: Kvaliteta i sljedivost

U Industriji 5.0, kvaliteta se postiže sinergijom senzorske preciznosti i ljudske prosudbe, modelom poznatim kao *Human-in-the-Loop* (HITL).

Iako sustavi strojnog vida mogu detektirati mikroskopske devijacije, oni često generiraju lažno negativne rezultate u rubnim slučajevima (*edge cases*). U HITL modelu, robot obavlja preliminarnu inspekciju, a slučajeve niske pouzdanosti (*low confidence score*) prosljeđuje operateru.



Slika 3. Dijagram toka Human-in-the-Loop procesa kontrole kvalitete.

Istraživanja pokazuju da ovaj hibridni pristup smanjuje stopu propuštenih grešaka (*Defect Escape Rate*) na ispod 0,5 % (Villani et al., 2018). Dodatno, integracija robota omogućuje potpunu digitalnu sljedivost (*traceability*). Svaka operacija – bilo da je riječ o momentu pritezanja vijka ili temperaturi zavara – bilježi se u realnom vremenu i veže uz digitalni blizanac proizvoda, osiguravajući usklađenost s normom ISO 9001:2015.

### Okvir 1: Primijenjena studija slučaja – Hibridna paletizacija u Adria regiji

Kako bi se validirali teorijski modeli, analiziran je pilot-projekt u srednjem poduzeću za obradu metala (Sjeverna Hrvatska, 120 zaposlenih).

**Kontekst:** Tvrtka se suočavala s visokom fluktuacijom radnika na liniji za pakiranje teških odljevaka (25 kg) i čestim bolovanjima zbog ozljeda leđa. Stopa grešaka u pakiranju iznosila je 3,5 %.

**Intervencija (2024./2025.):** Implementacija dvije robotske ćelije s kobotima *UR10e*, integrirane od strane lokalnog partnera. Ukupna investicija iznosila je 145.000 €.

**Ljudski faktor:** Nije bilo otpuštanja. Tri radnika s linije prošla su 80-satnu obuku za „Koordinatora robotske linije“.

**Rezultati (nakon 12 mjeseci):**

**Produktivnost:** Porast od 22 % (mogućnost rada tijekom pauza).

**Kvaliteta:** Stopa grešaka pala na 0,2 % (uvođenje vizijske kontrole).

**ROI:** Povrat investicije ostvaren u 18. mjesecu.

**Sigurnost:** Nula zabilježenih ozljeda na radu u tom odjelu.

Ovaj primjer empirijski potvrđuje tezu da tehnologija u Industriji 5.0 djeluje kao multiplikator, a ne zamjena za ljudski rad.

### Horizont 2030.: Budući trendovi i predviđanja

Transformacija tržišta rada neće biti linearna. Prema izvještaju *Future of Jobs 2025* (World Economic Forum, 2025), predviđa se da će **44 % temeljnih vještina** radnika morati biti promijenjeno u narednih pet godina. Iako se očekuje disrupcija 85 milijuna radnih mjesta zbog automatizacije, istovremeno se predviđa stvaranje **97 milijuna novih uloga** fokusiranih na interakciju ljudi, strojeva i algoritama.

U tom kontekstu, identificiramo tri vektora razvoja:

**Generativni AI:** Do 2027. godine, programiranje robota prirodnim jezikom smanjit će ulazne barijere, omogućujući operaterima upravljanje složenim sustavima bez znanja programskog koda.

**Humanoidi u logistici:** Roboti opće namjene preuzet će rad u prostorima neprilagođenim strojevima (*brownfield*), poput starih skladišta sa stepenicama.

**RaaS (Robot-as-a-Service):** Pretvorba kapitalnih troškova u operativne (model pretplate) omogućit će fleksibilno skaliranje kapaciteta za MSP sektor.

### Zaključak

Industrija 5.0 ne predstavlja samo tehnološku nadogradnju, već holističku strategiju prilagodbe europske proizvodnje. Provedena analiza potvrđuje da je ekonomska održivost u 2025. godini neodvojiva od automatizacije, ali i da je uspjeh automatizacije neodvojiv od ljudskog faktora.

Strateška implikacija za europske proizvođače počiva na četiri stupa: (1) iskorištavanju arbitraže troškova inženjeringa kroz regionalna partnerstva, (2) implementaciji robota u režimima rada koji nadilaze ljudske kapacitete (24/7), (3) sustavnom ulaganju u kognitivne vještine operatera, i (4) integraciji tehnologije s ciljevima održivosti. U konačnici, tehnologija u Industriji 5.0 ne služi zamjeni čovjeka, već multiplikaciji njegove vrijednosti u sve složenijem globalnom ekonomskom poretku, osiguravajući tako otpornost i socijalnu koheziju industrije.

## Bibliografija

- Acemoglu, D., & Restrepo, P.** (2020). Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets. *Journal of Political Economy*, 128(6), 2188–2244. <https://doi.org/10.1086/705716>
- Autor.** (2025a). *EU Automation Database: Aggregated Labor Cost and Technology Pricing Indices*. [Data set]. Zagreb: Institut za digitalnu transformaciju. (Agregirani podaci temeljeni na Eurostat LCI i IFR World Robotics 2024).
- Autor.** (2025b). *Survey of System Integrators in DACH and Adria Regions*. [Data set]. Zagreb: Institut za digitalnu transformaciju. (N=15 integratora, provedeno siječanj-ožujak 2025).
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A.** (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. Publications Office of the European Union.
- Chaudhuri, S., & Ghosh, R.** (2012). Reverse Mentoring: A Social Exchange Tool for Keeping the Boomers Engaged and Millennials Committed. *Human Resource Development Review*, 11(1), 55–76.
- Deloitte.** (2025). *The 2025 Manufacturing Industry Outlook: Continuing evolution amid volatility*. Deloitte Research Center for Energy & Industrials.
- Destatis (Statistisches Bundesamt).** (2024). *Arbeitskosten im Verarbeitenden Gewerbe 2024* [Labor costs in the manufacturing sector 2024]. Wiesbaden: Destatis. <https://www.destatis.de>
- Eurostat.** (2025). *Hourly labour costs in the EU manufacturing sector: Projections for 2025*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- International Federation of Robotics (IFR).** (2024). *World Robotics 2024: Industrial Robots*. Frankfurt am Main: IFR Statistical Department.
- ISO.** (2016). *ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices — Collaborative robots*. International Organization for Standardization.
- ISO.** (2015). *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*. International Organization for Standardization.
- McKinsey & Company.** (2024). *The future of work in Europe: Automation, workforce transitions, and the shifting geography of employment*. McKinsey Global Institute.
- Nahavandi, S.** (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Standard Bots.** (2025). *The Real Cost of Robotics: 2025 Price Breakdown*. Preuzeto s <https://standardbots.com>
- Universal Robots.** (2020). *Update Your ROI Formula*. Universal Robots Whitepaper. Preuzeto s <https://www.universal-robots.com>
- Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C.** (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- World Economic Forum.** (2025). *The Future of Jobs Report 2025*. Geneva: World Economic Forum.