



Data di ricezione: 11.08.25 / Data accettazione: 03.11.25 / Data di pubblicazione: 18.11.25
doi: 10.82015/NNR.2025.100102

La transizione intelligente: la produzione industriale e il settore sanitario nel XXI secolo

The Smart Transition: Industrial Manufacturing and Healthcare in the 21st Century

Luigi Di Cataldo¹

Sintesi

La rapida evoluzione della tecnologia e delle sue interconnessioni ha prodotto le formazioni dell'Industria 4.0 e della Medicina/Salute 4.0 in cui l'intelligenza artificiale (IA) interviene con finalità di monitoraggio, remotizzazione, automazione e potenziamento.

In queste pagine, la progressiva integrazione delle tecnologie intelligenti nelle strutture organizzative viene ricondotta entro il concetto scientifico di transizione socio-tecnica, presentata come una sotto-transizione della digitalizzazione e se ne discute lo stato di avanzamento. Il contributo, inoltre, fornisce un'ampia e dettagliata analisi della ricerca condotta su questi due domini e delle principali sfide emergenti con l'obiettivo di favorire il trasferimento tecnologico e la diffusione delle buone pratiche oltre le classiche compartimentazioni settoriali.

Parole Chiave: Intelligenza Artificiale; Industria, Innovazione; Competitività; Digitalizzazione.

¹ Vice-direttore di Neural Nexus Review di E.N.I.A. (Ente Nazionale per l'Intelligenza Artificiale); Professore a contratto, Dipartimento di Scienze Politiche e Sociali, Università di Catania; Post-doc researcher, Dipartimento di Scienze Sociali e Politiche, Università di Milano; Componente del comitato scientifico-legale dell'Ente Nazionale per l'Intelligenza Artificiale; Consigliere nazionale della Società Italiana del Dottorato di Ricerca.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4304-5562> – E-mail: luigi.dicataldo@unimi.it.



Abstract

The rapid evolution of technology and its interconnections has led to the emergence of Industry 4.0 and Medicine/Health 4.0, in which artificial intelligence (AI) is used for monitoring, remote access, automation, and enhancement purposes.

In these pages, the progressive integration of intelligent technologies into organizational structures is brought within the scientific concept of socio-technical transition, presented as a sub-transition of digitalization, and its progress is discussed. The paper also provides a broad and detailed analysis of the research conducted in these two domains and of the main emerging challenges, with the aim of promoting technology transfer and the dissemination of best practices beyond traditional sectoral compartmentalization.

Keywords: Artificial Intelligence; Industry; Innovation; Competitiveness; Digitalization.



1. Introduzione

La rapida evoluzione della tecnologia e delle sue interconnessioni ha prodotto lo scenario della quarta rivoluzione industriale (Lee e Lim 2021; Skilton e Hovsepan 2018; Schwab 2016). Abilitando il collegamento tra persone, hardware e software, e aprendo nuove frontiere nella gestione della conoscenza, le tecnologie di ultima generazione stanno rivoluzionando le articolazioni della società spingendo verso la formazione di strutture socio-economiche e modelli organizzativi di nuova concezione.

L'Intelligenza Artificiale (d'ora in avanti IA), sostenuta dalla datificazione crescente delle attività umane, rappresenta uno dei pilastri portanti dei sistemi cyber-fisici che sono ormai alla base dei processi in molti settori (manifatturiero, finanziario, dei trasporti, sanitario e scientifico) (Rikalovic et al. 2022; Jan e Verma 2020).

I processi basati su strumenti computazionali avanzati hanno registrato una rapida crescita negli ultimi due decenni portando alle formazioni dell'Industria 4.0 (Devezas e Sarygulov 2017; Carvalho et al. 2020) e della Medicina/Salute 4.0 (Haleem e Javaid 2020; Al-Jaroodi et al. 2020) in cui la tecnologia interviene con finalità di monitoraggio, remotizzazione, automazione e potenziamento.

Le crescenti applicazioni dell'IA in ambito industriale e sanitario hanno suscitato previsioni discordanti e atteggiamenti tecno-deterministi contrapposti circa gli esiti di questa profonda trasformazione: da una parte, i tecno-ottimisti prefigurano scenari entusiasmanti rispetto al potenziamento delle capacità umane, agli incrementi di produttività attesi e alle nuove frontiere della medicina; dall'altra, i tecno-pessimisti mettono in evidenza un consistente elenco di preoccupazioni sociali, etiche e politiche.

In queste pagine, la progressiva integrazione delle tecnologie intelligenti nelle organizzazioni viene ricondotta entro il concetto scientifico di transizione socio-tecnica, presentata come una sotto-transizione della digitalizzazione e se ne discute lo stato di avanzamento. Inoltre, si fornisce un'analisi della ricerca condotta su questi due domini e delle principali sfide emergenti con l'obiettivo di favorire il trasferimento tecnologico e la diffusione di buone pratiche oltre le classiche compartimentazioni settoriali.



Il registro linguistico adottato è semplice, pensato per il coinvolgimento di un pubblico ampio, senza che tuttavia risulti sacrificata la trattazione delle tematiche affrontate, supportata da continui rinvii alla letteratura di riferimento per eventuali ulteriori approfondimenti da parte del lettore.

La trattazione si articola in sette paragrafi; il primo di essi introduce alcune note storiche e tassonomiche per mettere il lettore nella condizione di elaborare un quadro preliminare; il secondo paragrafo riconduce la trasformazione intelligente entro il concetto scientifico di transizione e ne discute lo stato di avanzamento; il terzo, il quarto e il quinto paragrafo offrono un resoconto complessivo di questa trasformazione con riferimento alla produzione industriale e al settore sanitario, preceduto da una chiara descrizione della metodologia perseguita; il sesto paragrafo discute le principali sfide associate alla progressiva integrazione dell'IA in questi due domini.

2. L'intelligenza artificiale: note storiche, definizioni e classi applicative

L'IA rappresenta quel ramo della computer science dedicato allo sviluppo di sistemi informatici dotati di capacità che richiamano quelle tipiche dell'essere umano, come l'interazione con l'ambiente tramite forme di percezione spaziale, temporale e sensoriale, l'interazione in linguaggio naturale, la pianificazione, la rappresentazione della conoscenza, la risoluzione di problemi, la creazione di contenuti, l'apprendimento e l'adattamento.

L'idea dell'intelligenza delle macchine si sviluppa nella prima metà del Novecento, a partire dagli studi di Alan Turing e dalla sua teoria per classificare una macchina come intelligente esposta nell'articolo *Computing Machinery and Intelligence* (1950) (Saygin et al. 2000). Con il volume *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Stuart Russel e Peter Norvig (1995) introducono il concetto di macchine razionali in contrapposizione all'idea delle macchine intelligenti e il richiamo alle capacità umane, dato che le persone non sviluppano il proprio agire entro schemi rigidi e precostituiti di razionalità. In



tempi recenti, in occasione della terza edizione della Martini Lecture Bicocca (2021), Luciano Floridi ha parlato di *Agere sin intelligere*, sostenendo l'opportunità di superare l'espressione IA a vantaggio della locuzione *artificial agency*, in grado di fornire un resoconto più immediato e realistico delle capacità acquisite dalle macchine negli ultimi decenni (Floridi e Cabitza 2021).

L'espressione IA resta comunque prevalente e ampiamente utilizzata nei contesti istituzionali, oltre che nel linguaggio comune. L'OCSE (2023) e l'Unione europea (2024) definiscono l'IA come un sistema basato su macchine in grado di influenzare l'ambiente producendo un output – previsioni, raccomandazioni o decisioni – per un dato insieme di obiettivi. Entro questa definizione viene compreso un variegato e crescente gruppo di sistemi informatici con diversi livelli di autonomia e adattabilità, capaci di eseguire compiti e affrontare problemi che richiederebbero le capacità umane.

Le forme più avanzate di IA si fondano su tecniche di apprendimento automatico (*Machine Learning, Deep Learning*) (Brown 2021; Goodfellow et al. 2016; Murphy 2012; Samuel 1959). I progressi in questo campo hanno ampliato e potenziato il ventaglio di capacità a disposizione delle macchine – elaborazione del linguaggio naturale (*Natural Language Processing*), di contenuti multimediali (*Computer Vision*) e la generazione di contenuti – portando allo sviluppo dell'IA generativa e dei Large Language Models².

I chatbot, il trattamento intelligente dei dati, i sistemi di raccomandazione e le soluzioni di IA dalla dimensione fisica sono alcune delle applicazioni più diffuse. I chatbot sono ormai ampiamente presenti nel marketing (Ramesh e Chawla 2022), nei servizi di *customer relationship management* (Di Cataldo e Dorigatti 2025; Doellgast et al. 2023) e nella gestione dei lavoratori (Kellogg et al. 2020). Basati su varie tecniche di elaborazione del linguaggio naturale, questi programmi informatici sono progettati per interagire con gli utenti attraverso il linguaggio umano, consentendo una comunicazione fluida tra persone e macchine. Il trattamento intelligente dei dati

² La nozione di IA generativa coinvolge varie forme di creazione di contenuti (immagini, video, grafici), mentre i modelli linguistici di grandi dimensioni ne costituiscono una specifica applicazione per la comprensione e generazione del linguaggio naturale.



(*Intelligent Data Processing*) permette di elaborare i big data e ricavarne nuove informazioni, come la realizzazione di previsioni, la redazione di classifiche e di raggruppamenti secondo indici di omogeneità. I sistemi di raccomandazione (*Recommendation System*) sono una delle principali tecnologie a supporto del mercato digitale; si tratta di software che acquisiscono le tracce lasciate dall'utente nel corso delle sue attività all'interno della rete per ricostruire le preferenze e filtrare i contenuti da proporre in modo da migliorarne l'esperienza, prolungarne la permanenza e stimolare l'incontro tra la domanda e l'offerta di beni e servizi. Le soluzioni fisiche dell'IA, infine, emergono dalla combinazione tra l'IA e la robotica avanzata che permette di sviluppare tecnologie programmate per svolgere attività complesse, muoversi in contesti di incertezza (es. situazioni con un elevato rischio di collisioni, di incendi, ecc.) e collaborare con gli esseri umani.

Nel paragrafo successivo, la progressiva integrazione delle soluzioni di IA nelle attività umane viene ricondotta al concetto scientifico di transizione e presentata come una sotto-transizione del cambiamento digitale.

3. La transizione intelligente

Il XXI secolo vede sovrapporsi imponenti transizioni correlate – la crisi climatica, la digitalizzazione e le evoluzioni negli indici demografici nei paesi del Nord-Globale – che saranno decisive per il futuro della vita su questo pianeta.

Nella letteratura scientifica questi complessi cambiamenti vengono descritti e spiegati come *transizioni socio-tecniche*. Si tratta di cambiamenti che trasformano il modo in cui la società funziona, suscitando profonde evoluzioni multi-dimensionali, che coinvolgono diversi sotto-sistemi interagenti (tecnologia, economia, politica, scienza, cultura, diritto) e vari attori (imprese, *policy makers*, cittadini, lavoratori, sindacati, associazioni del terzo settore, ricercatori e altre categorie professionali) (Nesari et al. 2022; Geels 2004; Elzen et al. 2004; Freeman e Louçã 2001).

Il termine transizione viene impiegato da molto tempo e in modo sempre più diffuso in



ambito scientifico. La fortuna di questo concetto può essere ricondotta alla sua capacità di catturare le dinamiche di mutamento che interessano i fenomeni fisici, chimici e sociali. Fenomeni, appunto, che non evolvono per cesure nette tra un “prima” e un “dopo”, ma che invece seguono una dinamica processuale.

Vi hanno fatto ricorso per prime le cosiddette scienze esatte (o “dure”) per indicare un fenomeno fisico classico, come i cambiamenti nello stato di aggregazione della materia (liquido-solido-gassoso) che si verificano al variare di alcuni parametri di controllo.

L’idea di transizione ha trovato un largo spazio anche nelle scienze sociali. Anche questi, infatti, evolvono secondo dinamiche processuali e non lineari, in cui si susseguono fasi intermedie, pur non essendo possibile una puntuale previsione degli esiti che vi faranno seguito.

I primi a definire e impiegare il concetto di transizione nel campo delle scienze sociali sono stati Rotmans, Kemps e colleghi (2000, 2001a, 2001b). La transizione è stata definita come un processo di cambiamento sociale continuo, su larga scala (con una reciproca influenza tra le dimensioni tecnologica, ecologica, economica, sociale, culturale, istituzionale), di lungo termine (interessando un intervallo minimo di 25 anni o almeno una generazione), che coinvolge differenti livelli di scala (macro, meso e micro) e ha carattere strutturale.

Il processo di transizione che conduce un fenomeno sociale da una condizione di equilibrio dinamico ad un nuovo equilibrio dinamico può essere ricostruito attraverso un modello articolato in tre fasi (Loorbach et al. 2015): (1) il superamento di un lungo periodo di ottimizzazione e di equilibrio dinamico; (2) un periodo relativamente breve e dirompente di destabilizzazione e riconfigurazione; (3) l’affermarsi di una nuova condizione di equilibrio dinamico, diversa da quella di origine. La dinamica della transizione può subire accelerazioni o rallentamenti in concomitanza di uno shock esterno (Van Driel e Schot 2005), com’è concretamente accaduto per effetto della pandemia da SARS-Cov-2 che ha accresciuto il ritmo della transizione digitale.

A partire dalle argomentazioni fin qui esposte, la progressiva integrazione delle tecnologie di IA in ogni dominio della società – dalla politica al diritto, dalla salute al



welfare, dall'ambiente all'istruzione – può essere ricondotta al concetto di transizione socio-tecnica e intesa come una sotto-dimensione della transizione digitale in quanto parte del processo di automazione che ne costituisce uno dei driver principali (Eurofound 2021).

La transizione intelligente consiste nel graduale affermarsi di nuove soluzioni per la creazione, gestione e utilizzo della conoscenza (Bettiol et al. 2020; Abubakar et al. 2019) e implica un cambiamento paradigmatico nei processi organizzativi. Le organizzazioni stanno diventando *intelligenti* in quanto integrano la classica dinamica verticistica (*top down*) dei processi decisionali, che muove dall'alto delle gerarchie organizzative verso il basso (Uhl-Bien et al. 2007), con processi circolari, automatizzati e basati su tecniche di rinforzo sostenute da informazioni empiriche e previsioni statistiche accurate, che ridimensionano l'influenza esercitata da quadri ideologici, valori e cultura. In questa riconfigurazione, il locus della conoscenza (*knowledge locus*) e dell'agire (*agency locus*) – intesi come spazio entro cui le informazioni vengono acquisite, validate, utilizzate e trasformate in azione – cessa di essere appannaggio esclusivo della componente umana per essere sempre più occupato da strumenti computazionali avanzati dotati di margini crescenti di autonomia. L'apprendimento organizzativo e le valutazioni decisionali avvengono sempre meno all'interno della mente umana (cfr. Simon 1991, p. 125) e sempre più all'interno delle macchine che, attraverso algoritmi di apprendimento automatico, si affermano come fonte di conoscenza acquisita (Kusiak 2019).

Dohale e colleghi (2022) e Lerch e colleghi (2022) hanno evidenziato come esito di questa evoluzione un rafforzamento delle organizzazioni nei processi ordinari, nelle capacità reattive e l'acquisizione di inedite capacità previsionali e di programmazione proattiva.

Attraverso un framework articolato in sei passaggi è possibile descrivere gli sforzi che le organizzazioni dovranno affrontare per compiere la transizione intelligente (Alsheibani et al. 2020): (1) raggiungere la compatibilità tra le tecnologie da introdurre, i dataset disponibili e le strutture preesistenti; (2) dotarsi delle competenze necessarie per sostenere l'integrazione e il funzionamento di queste tecnologie; (3) assicurare la



disponibilità e la qualità dei dati nel tempo; (4) allineare il *business case* alle tecnologie da implementare e ai dati corrispondenti; (5) identificare i vantaggi e gli obiettivi da raggiungere, senza dimenticare i costi opportunità; (6) supportare gli sviluppatori nella creazione di tecnologie di IA concretamente applicabili secondo le peculiarità dei contesti organizzativi e gli obiettivi prefissati.

La transizione intelligente ha attirato l'attenzione dell'industria, delle organizzazioni governative e del mondo accademico, portando alla costituzione di forum e consorzi volti a sviluppare architetture, roadmap, standard e programmi di ricerca. Allo stato attuale, la transizione ha raggiunto lo stadio intermedio del modello descritto *supra*, ossia quello della destabilizzazione e della riconfigurazione, entro cui le organizzazioni affrontano questi sei passaggi e si rapportano alle sfide di carattere etico, politico e sociale associate al cambiamento.

4. Note metodologiche

Nei paragrafi seguenti si discutono le applicazioni dell'IA alla produzione industriale e al settore sanitario, fornendo un'ampia e dettagliata analisi della letteratura scientifica in materia con l'obiettivo di rafforzare la comprensione del modo in cui questi due settori stanno affrontando la transizione intelligente e comporre un quadro delle principali sfide emergenti.

La trattazione si sviluppa a partire da tre interrogativi di ricerca:

Rq 1 – Quali sono i principali campi di applicazione dell'IA nella produzione industriale e nel settore sanitario?

Rq 2 – Come evolvono i processi organizzativi in questi due domini?

Rq 3 – Quali problematiche affrontano le applicazioni dell'IA in questi due contesti?

Per affrontare i quesiti di ricerca è stata condotta una revisione della letteratura. Considerato che la capacità di assorbimento rappresenta un requisito fondamentale per



l'innovazione tecnologica delle organizzazioni, si è ritenuto che la conoscenza scientifica fino ad oggi prodotta potesse validamente supportare i decisori politici, le imprese, i sindacati e i servizi sanitari nazionali nell'affrontare questa transizione (Grandinetti 2016; Van Geenhuizen e Soetanto 2009).

La letteratura consultata è stata rintracciata attraverso le piattaforme Scopus e Google scholar. In linea con il suggerimento di Newbert (2007), sono state selezionate le pubblicazioni ospitate su riviste accademiche che prevedono un doppio processo di revisione fra pari in forma anonima (*double blind peer review*) garantendo il rigore metodologico, la qualità dei risultati e il posizionamento nel dibattito scientifico.

La selezione è stata limitata alle pubblicazioni in lingua inglese e in lingua italiana. Inoltre, le pubblicazioni precedenti al primo quinquennio del millennio corrente sono state escluse a causa dei profondi cambiamenti tecnologici recenti. Per queste ragioni, eventuali questioni discusse in altre sedi – come in altro genere di riviste, white paper, capitoli di volume, articoli giornalistici specialistici – e periodi storici potrebbero risultare non rappresentate oppure non essere state adeguatamente incluse.

In conclusione, la revisione della letteratura condotta in questa sede restituisce una bibliografia ragionata per coloro che intendono approfondire ulteriormente le tematiche qui discusse e affrontare nuovi interrogativi di ricerca.

5. La transizione intelligente dell'industria

Fin dalla prima rivoluzione industriale, gli operatori economici hanno migliorato il processo produttivo incrementando efficienza, qualità e valore aggiunto (Wan et al. 2020; Kusiak 2019; Kusiak 1990).

La produzione industriale si è evoluta attraverso quattro fasi rivoluzionarie. La prima di queste (1760-1840) è stata caratterizzata dall'affermarsi di forme embrionali di automazione spinte dalla meccanizzazione a vapore e ad acqua. Nella seconda fase (1870-1930), lo sviluppo della produzione industriale ha raggiunto un nuovo stadio



grazie all'automazione a trazione elettrica e ai progressi nella divisione del lavoro. La terza rivoluzione industriale (1970 – 2000) è segnata dall'avvento della digitalizzazione, della datificazione e della robotica. Nella quarta e attuale fase, la produzione viene riorganizzata attraverso la costruzione di sistemi cyber-fisici, sostenuti dall'IA e da altre tecnologie di ultima generazione. Anche il ruolo della componente umana nei processi di produzione muta in modo significativo, sempre più impegnata in mansioni di programmazione, monitoraggio e supervisione (Rauch et al. 2020).

Nell'ultimo decennio, la nozione di *smart manufacturing*³ (Kusiak 2017) è stata utilizzata per esprimere il segno distintivo della produzione 4.0., che impara dai dati per evolvere in modo spontaneo secondo le elaborazioni effettuate. Non si tratta, dunque, di una semplice automazione della produzione, ma di una capacità autonoma di simulazione, evoluzione e ottimizzazione.

Nell'Industria 4.0, ogni componente è connessa – veicoli, lavoratori, robot, linee di produzione, impianti – e ogni processo viene tracciato in formato digitale (Mittal et al. 2019). Il *National Institute of Standards and Technology* (NIST) definisce la produzione intelligente come un sistema collaborativo e completamente integrato che risponde in tempo reale alle mutevoli esigenze del mercato, della rete di fornitura e dei clienti (Lu et al. 2016).

Kusiak (2017) ha identificato i sei pilastri che sorreggono la transizione intelligente dell'industria, sottolineando che le denominazioni e la rilevanza di ciascuno sono cambiate nel tempo pur trattandosi di dimensioni chiave stabili: (1) tecnologia e processi produttivi; (2) materiali; (3) dati; (4) ingegneria predittiva; (5) sostenibilità; (6) condivisione delle risorse e networking. Intervenendo su ciascuno di questi pilastri, un complesso di tecnologie correlate sta abilitando la trasformazione intelligente della produzione industriale. Sono in esso inclusi i sistemi cyber-fisici, l'Internet of Things (IoT), il cloud computing, la robotica avanzata, il 5G, la blockchain, la produzione

³ Il termine è stato coniato intorno al 1990, quando venne fondato il *Journal of Intelligent Manufacturing* (<https://link.springer.com/journal/10845>) e venne pubblicato il volume *Intelligent Manufacturing Systems* (Kusiak1990).



additiva, le tecnologie di risparmio energetico e i big data (Nuttah et al. 2023; Jan et al. 2023; Kotsiopoulos et al. 2021; Pokherel et al. 2021; Chen et al. 2017; Kang et al. 2016; Zhang et al. 2014).

La rilevanza dei big data nel contesto dei sistemi di produzione cyber-fisici è ampiamente documentata (Bag et al. 2021; Andronie et al. 2021; Zhang et al. 2020; Kuo e Kusiak 2019; Zhong et al. 2017). La centralità dei dati non rappresenta una novità, bensì una rinascita dovuta all'accresciuta disponibilità delle informazioni e alla capacità di elaborazione raggiunta dalle tecnologie (Kusiak 2017, p. 511). Come strumento di ingegneria predittiva, l'IA interviene nei processi di gestione della conoscenza e guida il comportamento organizzativo, occupandosi della creazione, condivisione, acquisizione, archiviazione e utilizzo della conoscenza all'interno di un'organizzazione (Zong et al. 2025; Taherdoost e Madanchian 2023; Ahsan et al. 2023; Rojek et al. 2021; Zonta et al. 2020; Manesh, et al. 2020; Kusiak 2017). Diventati la risorsa più preziosa per le imprese, i dati e i moderni strumenti computazionali abilitano un modello organizzativo *data-driven*, fondato su informazioni empiriche e previsioni statistiche accurate circa la gestione dei flussi di lavoro, le catene di fornitura, le preferenze dei consumatori, le scelte strategiche dei competitors (Javaid et al. 2022; Taranto-Vera et al. 2021; Haenlein et al. 2019; Harding et al. 2006).

Espressione diretta dei processi di digitalizzazione, datificazione e automazione intelligente, il *digital twin* (trad. gemello digitale) consiste nella riproduzione virtuale di un oggetto fisico o di un sistema che ne comprende gli elementi di progettazione, costruttivi e operativi (Lo et al. 2021). Utilizzando telecamere, sensori e altri strumenti per la raccolta dei dati, il *digital twin* riflette la conoscenza in tempo reale, consentendo il monitoraggio degli impianti, la simulazione dei processi e l'ingegneria predittiva, rendendo possibile testare l'efficacia di riforme tecnologiche-organizzative senza dover modificare il sistema fisico e interrompere le attività (Nakagawa et al. 2021).

Il termine Intelligenza Artificiale Industriale (IAI) è stato introdotto per indicare il variegato complesso di soluzioni di IA applicate in ambito industriale (Lee et al. 2018). Esplorando la letteratura emergono cinque macro-campi di applicazione dell'IAI: (1)



nelle attività di *enterprise resource planning* (ERP), dove l'IA potenzia le capacità organizzative nella gestione e integrazione dei processi operativi attraverso l'elaborazione di un unico database, in cui convergono le informazioni provenienti da ogni reparto (Zong et al. 2025; Jawad e Balázs 2024; Al-Amin et al. 2023; Kunduru 2023; Aktürk 2021; Ashima et al. 2021; Da Costa et al. 2019; Singh et al. 2019; Oztemel e Gursev 2020); (2) nelle attività di *supply chain management* (SCM), l'IA elabora le informazioni che riguardano il mercato, le variabili socio-economiche, ambientali e istituzionali (Samuels 2025; Xu 2021; Xie et al. 2020; Hofmann et al. 2019; Tung 2019; Tuffnell et al. 2019; Singh et al. 2019); (3) nei processi di *product lifecycle management* (PLM), l'IA permette di sviluppare e modificare in modo continuo il prodotto/servizio attraverso le elaborazioni realizzate sul gemello digitale (Wang et al. 2021; Tucker 2021; Liu et al. 2020; Hughes et al. 2020; Li et al. 2017; Kovács 2006); (4) nelle attività di *human resource management* (HRM), l'IA viene impiegata in ogni funzione di HRM a partire dal reclutamento iniziale fino alla conclusione del rapporto di lavoro (Li 2024; Agarwal et al. 2022; Samarasinghe et al. 2020; Dhanpat et al. 2020; Puhovichova e Jankelova 2020; Rana e Sharma 2019); (5) nelle attività di *customer relationship management*, l'IA migliora l'efficacia della gestione dei clienti, rendendo le attività di marketing, vendita e customer care più rapide e personalizzate (Foruzandeh et al. 2025; Sofiyah et al. 2024; Mah et al. 2022; Ledro et al. 2022; Mithas et al. 2022).

Nel sesto paragrafo si discutono le principali sfide che sono emerse in corrispondenza di questi campi di applicazione.

6. La transizione intelligente del settore sanitario

L'IA sta ridefinendo la pratica medica, i sistemi sanitari nazionali e l'organizzazione sanitaria globale (Haug e Drazen 2023; Capasso e Umbrello 2022; Secinaro et al. 2021; Satpathy et al. 2021; Straw 2020).

La nozione di *smart healthcare* (Zhao et al. 2017) esprime un rinnovato paradigma nell'approccio medico (Kuo 2023; Alowais et al. 2023). La transizione intelligente



spinge il superamento delle classiche configurazioni operative dal carattere reattivo, incentrate sulla malattia e sull'ospedalizzazione, e l'approdo verso un modello proattivo, che cura il benessere dell'individuo lungo l'intero ciclo di vita con modalità preventive e sempre più personalizzate, traducendosi in una riduzione delle visite mediche, delle necessità di trattamento e dei ricoveri ospedalieri.

Nonostante un contesto normativo e infrastrutturale ancora frammentato, le applicazioni dell'IA in medicina sono in espansione, accelerate dalla pandemia e dai sempre più frequenti disastri naturali derivanti dal cambiamento climatico (inondazioni, dissesti idrogeologici, incendi boschivi, uragani) che possono causare carenza di cibo, farmaci e ostacolare l'erogazione di servizi essenziali (ONU 2022; Chee et al. 2021; Dwivedi et al. 2018; Pourhosseini et al. 2015).

A partire da una revisione della letteratura, le applicazioni dell'IA in ambito sanitario sono state qui raccolte e osservate in relazione a cinque dei pilastri fondamentali del sistema sanitario (KPMG 2022; OMS 2010)⁴: (1) Servizi sanitari; (2) Personale sanitario; (3) Informazioni sanitarie; (4) Tecnologie mediche; (5) Governance.

Le applicazioni tecnologiche di ultima generazione sono state considerate dalla letteratura come un modo per migliorare l'erogazione dei servizi sanitari. La tecnologia ne sostiene la remotizzazione, implementando la telemedicina, l'erogazione delle consulenze da remoto e l'assistenza digitale del paziente (Ahuja et al. 2024; Jin et al. 2024; Khan et al. 2021; Gunasekeran et al. 2021; Wang et al. 2021; Wang e Alexander 2021; Mishra et al. 2021; Parviainen e Rantala 2021; Wang e Wu 2021; Babic et al. 2021; Umbrello et al. 2021; Sarbadhikari e Pradhan 2020; Tan et al. 2020; Scott et al. 2020; Saba et al. 2019; Pollack 2005). La remotizzazione contribuisce alla costruzione di un sistema sanitario più inclusivo, che va oltre le città sviluppate, coprendo anche le aree meno servite e le popolazioni svantaggiate (Richie 2022; Hadley et al. 2020). Indipendentemente dalle distanze geografiche, gli algoritmi possono monitorare la salute pubblica e la condizione personale di malati cronici, disabili, anziani e persone

⁴ L'economia di queste pagine non permette di approfondire le applicazioni dell'IA nell'ambito del pilastro della finanza sanitaria.



con difficoltà motorie e cognitive (Hossain et al. 2019). Robot mobili, deambulatori intelligenti, computer palmari e dispositivi da polso discreti rafforzano l'autonomia di queste persone, migliorandone la qualità della vita e alleviando il carico assistenziale per il servizio pubblico e le famiglie.

Il supporto al personale medico e infermieristico costituisce una seconda macro-area applicativa dell'IA nel settore sanitario. La tecnologia viene impiegata per svolgere attività routinarie e ridurre il carico di lavoro non necessario, abilitando il trasferimento del personale su funzioni maggiormente complesse e di valore per il paziente (Rahman et al. 2021a; Sharma et al. 2020; Vaishya et al. 2020; Naseem et al. 2020; Sun et al. 2019). L'IA inoltre aumenta le capacità del personale medico nelle attività di diagnostica, nell'individuazione dei piani di trattamento e nelle operazioni chirurgiche. Accedendo a studi clinici relativi a casi comparabili, e collegando la storia clinica del paziente con queste informazioni, l'IA può interpretare efficacemente radiografie, ecografie, risonanze magnetiche e tomografie assiali computerizzate (TAC) permettendo la rilevazione precoce delle patologie e in certe circostanze di anticiparne l'insorgenza (Murero e Punziano 2025; Högberg et al. 2024; Bausano 2024; Rajpurkar e Lungren 2023; Fong et al. 2021; Kuo e Lien 2020; Kuo 2020, 2017). Queste applicazioni riducono la probabilità di diagnosi errate, test non necessari e trattamenti potenzialmente dannosi (Alowais et al. 2023; Esteva et al. 2017).

La chirurgia assistita da robot intelligenti sta dimostrando una notevole superiorità rispetto ai metodi laparoscopici tradizionali. Agevolando il coordinamento occhio-mano e superando i vincoli posti dagli strumenti chirurgici tradizionali attraverso un sistema di guida remota, questo approccio riduce lo sforzo fisico e mentale dei medici, riducendo il rischio di complicazioni, i tempi di recupero e la necessità di farmaci antidolorifici postoperatori (Iftikhar et al. 2024; Sucandy et al. 2022; Feng et al. 2022; Richie 2022; Secinaro et al. 2021; Moglia et al. 2021; Wang e Wu 2021; Umbrello et al. 2021; Rahman et al. 2021a; LeBlanc et al. 2020; Zemmar et al. 2020; Haleem e Javaid 2020; Coombs 2020; Adly et al. 2020; Sun et al. 2019; Ai et al. 2017).

I sistemi di IA supportano anche la raccolta, l'archiviazione, la formattazione e il



recupero delle informazioni sanitarie tramite tecniche di apprendimento automatico, utilizzando repository multi-istituzionali che migliorano la gestione dei flussi di lavoro e ridimensionano il rischio di errore umano (Elleuch et al. 2021; Chattu 2021; Secinaro et al. 2021; Scott et al. 2020; Sun et al. 2019; Adly et al. 2020; Hassanpour e Langlotz 2016).

L'integrazione delle soluzioni basate sull'IA coinvolge direttamente anche le tecnologie mediche, che trasformano il monitoraggio dei pazienti e le terapie farmacologiche, proiettando il settore verso una nuova frontiera di collaborazione tra il personale medico e le macchine. Dispositivi indossabili e tracker rendono possibile un avanzato monitoraggio dei pazienti in tempo reale e rivoluzionano l'assistenza domiciliare (Elleuch et al. 2021; Parviainen e Rantala 2021; Haleem e Javaid 2020; Milne-Ives et al. 2020; Coombs 2020; Hammock et al. 2013; Kjellstrom et al. 2005). Nelle pratiche di somministrazione mirata di farmaci, i nanorobot sono in grado di identificare le aree da trattare e un maggiore controllo sul rilascio del farmaco (Wu et al. 2024; Acharya et al. 2024; Park 2013).

La letteratura ha anche riscontrato un nutrito novero di applicazioni dell'IA nel campo della governance clinica, sostenendo l'erogazione di un'assistenza sicura, efficace, che sia in grado di raggiungere chiunque, in qualsiasi luogo e in qualsiasi momento (Flynn 2002; Macfarlane 2019). L'IA supporta la gestione dei database governativi, le attività di sorveglianza sanitaria e semplifica la gestione del sistema sanitario attraverso funzionalità di tracciamento e gestione in tempo reale che permettano di modellare la pratica medica, le risorse e i servizi in un contesto sempre più esposto a variazioni di mercato, sconvolgimenti geo-politici, disastri naturali e sanitari (Larsson et al. 2025; Ahuja et al. 2024; Brownstein et al. 2023; Ahsana e Siddique 2022; Leimanis e Palkova 2021; Mishra et al. 2021; Gunasekeran et al. 2021; Wang e Wu 2021; Pascu-Gabara e Cepoi 2021; Rahman et al. 2021a; Nasseef et al. 2021; Khan et al. 2021; Angioni e Musso 2020; Sarbadhikari e Pradhan 2020; Haleem e Javaid 2020; Lalmuanawma et al. 2020; Kankanhalli et al. 2019; Sun et al. 2019; Jung et al. 2018; Fry et al. 2005).

Per concludere, la letteratura sottolinea la speciale rilevanza delle sfide etiche per il



settore sanitario, che potrebbero compromettere la dignità dei pazienti, l'equità nell'accesso ai servizi sanitari, l'efficacia delle procedure diagnostiche e terapeutiche (Larsson et al. 2025; Bausano 2024; Biondi et al. 2023; Badidi 2022; Ahsana e Siddique 2022; Rahman et al. 2021b; Ghayvat et al. 2021; Sarbadhikari e Pradhan 2020; McGreevey et al. 2020; Kumar et al. 2020; Unberath et al. 2020; Haleem e Javaid 2020; Mazurek e Małagocka 2019; Kankanhalli et al. 2019; Sun et al. 2019).

7. Le sfide alla transizione intelligente di industria e sanità

L'adozione di tecnologia di IA nella produzione industriale e nel settore sanitario è ancora in una fase iniziale e procede a velocità differenziate per aree geografiche e caratteristiche organizzative (dimensioni, cultura manageriale, natura pubblica o privata), frenata da un complesso di sfide che potrebbe generare nuove diseguaglianze fra persone, popolazioni, organizzazioni, territori e approfondire quelle esistenti.

La letteratura ha identificato un complesso di problematiche in grado di ostacolare l'introduzione dell'IA da parte delle organizzazioni e influenzarne gli effetti, che si presentano in modo trasversale nei due domini esaminati in questa sede (Bécue et al. 2021). Queste sono state qui accorpate e ripartite in tre macro-aree per agevolarne la trattazione: (1) le sfide tecnologiche-organizzative; (2) le sfide etiche; (3) le sfide politiche-sociali.

Le sfide tecnologiche-organizzative coinvolgono le tematiche connesse all'introduzione di soluzioni basate sull'IA e alla capacità di adattamento delle strutture organizzative. Entro questo alveo tematico rientrano le diverse questioni che concernono la dimensione economica della transizione intelligente, il rischio di atteggiamento passivo da parte delle organizzazioni, gli indispensabili requisiti di compatibilità socio-tecnica fra le nuove tecnologie da integrare, i dati e le strutture organizzative preesistenti, comprese le competenze di manager e lavoratori.

Il necessario contemperamento tra il miglioramento dei processi organizzativi mediante



l'introduzione di tecnologie intelligenti e il mantenimento di standard elevati di sicurezza per i diritti fondamentali, le libertà, la concorrenza fra le imprese e i valori democratici impone un insieme di sfide etiche e politiche-sociali.

Le sfide etiche coinvolgono l'insieme delle questioni morali e valoriali collegate alla transizione intelligente, quindi gli impatti che una maggiore integrazione delle tecnologie di IA nella produzione industriale e nel settore sanitario potrebbe produrre sulle persone, sulla collettività e sull'ambiente. Fra le principali questioni di carattere etico emergono la necessità di promuovere lo sviluppo di un contesto sociotecnico in cui si mantiene la centralità della componente umana accanto agli imperativi della prevenzione dei danni, dell'equità e della conoscibilità delle logiche e delle modalità di funzionamento dell'IA.

Le sfide politiche-sociali coprono le questioni che interessano il funzionamento delle istituzioni e la convivenza, influenzando la dimensione dei diritti, della partecipazione, della coesione sociale e del benessere. In questo terzo nucleo tematico rientra la necessità di applicare agli stakeholder a vario titolo coinvolti nel funzionamento dell'IA – ricercatori, sviluppatori, progettisti, fornitori, utilizzatori, governi, pubbliche amministrazioni, autorità indipendenti, parti sociali, soggetti privati, cittadini, lavoratori e consumatori – i requisiti necessari affinché si assicuri la conformità della transizione intelligente ai principi etici fondamentali.

7.1. Le sfide tecnologiche-organizzative

La revisione della letteratura condotta in questa sede permette di ricostruire alcune delle principali sfide emergenti sul versante tecnologico-organizzativo.

La penuria di investimenti, di adeguate strutture di R&S e il rischio di atteggiamento passivo da parte delle organizzazioni, insieme ai consistenti ostacoli di natura tecnica, rappresentano alcuni dei principali limiti alla transizione intelligente di industria e sanità (Ahsana e Siddique 2022; Alahmari et al. 2022; Aerts e Bogdan-Martin 2021; Secinaro et al. 2021; Stanisławski e Szymonik 2021; Naseem et al. 2020). La scarsa



propensione del management al cambiamento e la debole presenza di competenze tecniche avanzate nel mercato del lavoro, come del resto a disposizione dei lavoratori già occupati, complicano la situazione delle organizzazioni, soprattutto in settori pubblici, sensibili e/o strategici dove la selezione del personale specializzato incontra specifiche problematiche (Murero e Punziano 2025; Moreira et al. 2023; Araujo Moreira et al. 2023; Alahmari et al. 2022; Mishra et al. 2021a; Aerts e Bogdan-Martin 2021; Angioni e Musso 2020; Haleem e Javaid 2020; Sarbadhikari e Pradhan 2020). Affinché sia possibile aggiornare la dimensione tecnologica delle organizzazioni, infatti, è necessaria la disponibilità di manodopera tecnica per comprendere il sistema, i suoi componenti e integrarlo con nuove applicazioni per aumentarne le capacità (data scientist, ingegneri di intelligenza artificiale, ingegneri dei dati). Accanto al bisogno di figure tecniche, emerge pure la necessità di formazione per i lavoratori impiegati nelle mansioni più tradizionali: alfabetizzazione in materia di IA, nozioni etiche, comunicative e di compliance.

Nonostante la letteratura abbia rilevato ormai da tempo e in modo completo il potenziale contributo delle nuove tecnologie alla capacità di creare e trattenere valore aziendale, le organizzazioni sono preoccupate del ritorno sull'investimento e stanno ancora interrogandosi sui costi associati all'adozione di soluzioni basate sull'IA – costo del cambiamento, del talento e i costi-opportunità nascosti – e su come aumentare il valore aziendale attraverso queste innovazioni (Bharadwaj et al. 2024; Stanisławski e Szymonik 2021; Pandey et al. 2021; Benbya et al. 2020; Pereira et al. 2020; Peres et al. 2020; Mun et al. 2020; Bosman et al. 2020). In particolare, emerge un problema di mentalità passiva e ridotta propensione all'innovazione che interessa principalmente le realtà di più piccole dimensioni e dove il management assume un atteggiamento conservativo.

Fra le sfide tecnologiche principali, la lettura identifica la debole trasferibilità delle soluzioni basate sull'IA e i necessari requisiti di connettività, compatibilità, interoperabilità e scalabilità (Oikonomou et. al 2025; Arona et al. 2023; Lehne et al. 2019). Generalmente, infatti, si tratta di soluzioni sviluppate per un determinato



dominio e per un particolare contesto organizzativo, che sono quindi difficili da trasferire, anche tra le organizzazioni che operano nel medesimo settore.

Nelle applicazioni *mission-critical* come l'assistenza sanitaria, i pericoli che interessano la raccolta dati e l'addestramento dei modelli sono le preoccupazioni preminenti e un ostacolo concreto alla transizione intelligente (Larsson et al. 2025; Radanliev et al. 2022a; Radanliev et al. 2022b; Peng et al. 2022; Popkova e Sergi 2022; Zahid et al. 2021; Yigitcanlar e Cugurullo 2020; Larsson e Heintz 2020; Darvishi et al. 2020; Sun et al. 2019).

7.2. Le sfide etiche

Il ricorso crescente all'IA nella produzione industriale e nel settore sanitario, che delega alle macchine uno spazio più ampio nella gestione della conoscenza, nei processi decisionali e in senso più ampio nell'agire organizzativo ha imposto la necessità di quadri etici per mediare l'impatto prodotto e assicurare il rispetto dei valori intransigibili che sono alla base della comunità internazionale e delle costituzioni democratiche (Floridi 2023; Huang et al. 2022; Winfield et al. 2021; Walmsley 2021; Jobin et al. 2019; Dignum 2018; Etzioni e Etzioni 2017).

La nozione programmatica di IA affidabile (trad. *trustworthy AI*) elaborata a livello europeo esprime l'idea di un futuro in cui la democrazia, lo Stato di diritto e i diritti fondamentali migliorino e siano difesi attraverso le applicazioni tecnologiche avanzate, permettendo all'innovazione e alla competitività responsabile di prosperare in condizioni di sicurezza.

Il quadro di riferimento europeo per la realizzazione di un'IA affidabile si fonda su tre pilastri reciprocamente connessi⁵: legalità, robustezza, eticità. I principi etici, infatti, sostengono l'elaborazione di strumenti normativi innovativi e contribuiscono

⁵ Ethics guidelines for trustworthy AI, EU website: <https://shorturl.at/UV7ZV>. La legalità va intesa come piena osservanza delle leggi e dei regolamenti vigenti, mentre la nozione di robustezza indica un approccio di prevenzione dei rischi che direttamente, o indirettamente, possono derivare dall'IA.



all'interpretazione dei diritti fondamentali in funzione delle evoluzioni che interessano l'ambiente sociotecnico, e possono orientare la logica alla base dello sviluppo, dell'utilizzo e dell'implementazione delle nuove tecnologie adattandosi in modo dinamico alla società e ai diversi domini di applicazione.

Definiti come imperativi etici affinché gli operatori del settore dell'IA si adoperino sempre per aderirvi, anche andando oltre la mera osservanza formale del diritto vigente (Floridi 2018), i principi etici in materia di IA sono quattro (cfr. Floridi et al. 2018): (1) Il principio del rispetto dell'autonomia umana; (2) il principio della prevenzione dei danni; (3) il principio di equità; (4) il principio di esplicabilità.

Il principio del rispetto dell'autonomia umana punta a garantire la libertà e l'effettiva autodeterminazione degli esseri umani, indispensabile per partecipare attivamente alla vita economica, sociale e politica. Con riferimento all'IA, tale principio esclude utilizzi che finiscano per subordinare, costringere, ingannare, manipolare, condizionare o raggruppare in modo ingiustificato gli esseri umani. Al contrario, l'IA dovrà essere progettata secondo un'impostazione antropocentrica in modo da aumentare, integrare e potenziare le abilità umane, il controllo umano nelle situazioni di pericolo e l'empatia in particolari domini applicativi.

Il principio della prevenzione dei danni esclude situazioni minacciose per la dignità umana, l'integrità psico-fisica e in grado di produrre conseguenze sociali dannose (es. danni all'ambiente, alla coesione sociale, allo sviluppo territoriale). Ciò può implicare il necessario coinvolgimento di categorie vulnerabili nello sviluppo e nella valutazione delle tecnologie e l'introduzione di specifiche precauzioni. Particolare attenzione dovrà prestarsi alle situazioni di elevata asimmetria, come ad esempio nella concorrenza fra le imprese, tra datori di lavoro e dipendenti, nell'erogazione di servizi pubblici.

Il principio di equità impone che lo sviluppo, la distribuzione e l'utilizzo dell'IA avvengano in modo rispettoso dell'eguaglianza. In termini sostanziali, ciò implica un impegno concreto affinché si realizzi una distribuzione equa dei vantaggi e degli svantaggi prodotti dal cambiamento, tenendo in speciale considerazione le persone, i gruppi, le organizzazioni e i territori più vulnerabili. La dimensione procedurale



dell'equità implica la capacità di contestare efficacemente le decisioni delle macchine, ma può essere esteso a tutte quelle circostanze che influenzano l'accesso ai benefici delle nuove tecnologie.

Il principio dell'esplicabilità sostiene la creazione e il mantenimento della fiducia verso la transizione intelligente⁶. Il principio di esplicabilità implica che i processi siano trasparenti, che la finalità e il funzionamento dell'IA siano dichiarati e che le decisioni, per quanto possibile, siano spiegabili a coloro che ne sono interessati. Laddove la spiegabilità non fosse possibile per la complessità tecnica della tecnologia, l'esplicabilità potrà essere promossa tramite la tracciabilità, la verificabilità e la comunicazione trasparente.

Pur indicando senza dubbio la direzione verso possibili soluzioni, questi principi rimangono prescrizioni etiche astratte e dovranno quindi essere tradotti in requisiti concreti e applicabili.

7.3. Le sfide politiche-sociali

Le sfide politiche-sociali sono strettamente collegate alle sfide tecniche-organizzative e alla predisposizione di requisiti concreti e applicabili ai diversi portatori di interessi coinvolti nella transizione intelligente così da rafforzare l'osservanza dei principi etici in materia di IA. Le sfide politiche-sociali coprono le variegate questioni che mettono in discussione la prospettiva di un futuro digitale che sia incentrato sull'essere umano, in cui la tecnologia interviene come strumento per soddisfarne i bisogni delle persone e migliorare la vita sociale⁷.

Entro questa cornice, l'IA dovrebbe rappresentare lo strumento per sostenere l'eguaglianza, la coesione sociale e l'inclusione, offrendo prodotti, servizi e lavori che siano accessibili e di qualità, e per aumentare, piuttosto che sostituire, le capacità

⁶ Su questo si vedano: Adams, 2023; Floridi, Cowls 2019; Floridi et al. 2018; Siau et al. 2018.

⁷ ESRC Center for Sociodigital Futures, University of Bristol:
<https://www.bristol.ac.uk/research/centres/sociodigital-futures/>.



umane, a partire dalle competenze e dalle esperienze acquisite nel corso della carriera dai lavoratori a vario titolo impiegati nella produzione industriale e nel settore sanitario. È necessario, dunque, prestare particolare attenzione alle situazioni che coinvolgono persone, gruppi, organizzazioni e territori che risultano svantaggiati e minacciati dalla transizione intelligente.

Il debole supporto governativo e il disallineamento tra i quadri normativi e le politiche rappresentano le problematiche principali che la comunità internazionale, gli aggregati sovra-nazionali e i singoli paesi stanno affrontando nell'accompagnare l'integrazione dell'IA nelle organizzazioni pubbliche e private che operano nei due domini in esame (Capasso e Umbrello 2022; Alahmari et al. 2022; Leimanis e Palkova 2021; Babic et al. 2021; Aerts e Bogdan-Martin 2021; Sarbadhikari e Pradhan 2020; Kumar et al. 2020; Sun et al. 2019; Mrówczyńska et al. 2019).

Nello scenario presente, caratterizzato da una crescente mediazione delle relazioni umane da parte di strumenti computazionali avanzati, che coinvolge direttamente l'economia, i servizi pubblici essenziali e i diritti fondamentali, le formazioni dell'Industria 4.0. e della Sanità 4.0. ci interrogano sul contratto sociale (Rahwan 2018) e in merito alla formulazione di tipologie innovative di intervento per supportare la transizione intelligente (Di Cataldo 2024).

La responsabilità sociale d'impresa (RSI) diventa un tema centrale per le politiche industriali (Camilleri 2024), chiamate a coltivare la sensibilità verso le problematiche di carattere sociale e promuovere la considerazione della sostenibilità nella governance delle imprese, attraverso iniziative di formazione rivolte ai Consiglieri di Amministrazione, la rimodulazione dei criteri di remunerazione del management e la ricalibratura dei piani strategici.

In ambito sanitario, la crescente dipendenza da algoritmi e dati rischia di ridurre il contatto personale e indebolire la dimensione empatica, entrambi essenziali per la soddisfazione e la fiducia del paziente. Una preoccupazione diffusa in letteratura consiste nella possibilità di una riforma della formazione medica verso la scienza dei dati e altre discipline tecniche, che potrebbe inavvertitamente portare a una



sottovalutazione delle competenze cliniche tradizionali, del rapporto medico-paziente e aumentare le difficoltà nel coinvolgimento degli stakeholder (Al-Jaroodi et al. 2023; Rahman et al. 2021a, 2021b; Sun et al. 2019).

Accanto a queste problematiche di carattere formativo e operativo, emergono preoccupazioni di carattere finanziario e democratico associate ai costi della transizione intelligente e alla portata dei vantaggi associati. La necessità di investimenti ingenti in contesti che presentano significative disegualianze sociali, economiche e territoriali può mettere in discussione l'accessibilità generale di questi sviluppi tecnologici e dei benefici associati.

Queste preoccupazioni evidenziano l'importanza di adottare un approccio equilibrato che preservi i valori fondamentali della concorrenza fra le imprese, della coesione territoriale, dell'assistenza sanitaria, concentrato sul processo decisionale collaborativo, dove gli stakeholder contribuiscono con il loro giudizio e la loro esperienza, e di perseguire iniziative per colmare il divario digitale sul piano geografico e sociale (Fondazione Veronesi 2024; Alowais et al. 2023).

Per concludere, le sfide politiche-sociali si completano con la necessaria attuazione dei principi etici fondamentali, attraverso l'imposizione di un complesso di requisiti ai diversi portatori di interessi coinvolti nella transizione intelligente (Li et al. 2023): (1) l'intervento e la sorveglianza da parte dell'essere umano, quindi la predisposizione di meccanismi per mantenere un equilibrio tra il concetto di "controllo" e quello di "autonomia" che sia rispettoso dei diritti e dei valori fondamentali anche nello scenario sociotecnico emergente⁸; (2) la robustezza tecnica, intesa come resilienza e sicurezza delle tecnologie di IA in modo da ridurre al minimo anche i danni involontari e indiretti; (3) la riservatezza e la governance dei dati, che impone adeguati meccanismi posti a garanzia del trattamento dei dati, dell'accesso ai dati oggetto di trattamento e del pieno rispetto della vita privata; (4) la trasparenza, da realizzarsi attraverso meccanismi di tracciabilità e spiegabilità che permettano all'essere umano un'interazione consapevole

⁸ Vi rientrano diversi approcci: *human-in-the-loop*, *human-on-the-loop* e *human-in-command*.



delle finalità, delle capacità e dei limiti dell'IA; (5) l'equità, evitando effetti discriminatori, assicurando l'accessibilità delle nuove tecnologie e coinvolgendo le categorie vulnerabili nell'intero ciclo di vita dell'IA; (6) il benessere sociale e ambientale, significa che la tecnologia dovrà essere a beneficio delle persone, comprese le generazioni future, l'ambiente e gli altri esseri viventi; (7) l'accountability, prevedendo meccanismi che garantiscano la responsabilità e l'accountability nel funzionamento dell'IA, come la valutazione degli algoritmi, la validazione dei dati e forme efficaci di ricorso.



Riferimenti bibliografici

1. Abubakar, A. M., Elrehail, H., Alatailat, M. A., and Elçi, A. (2019). Knowledge management, decision-making style and organizational performance. *Journal of innovation and knowledge*, 4(2): 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2017.07.003>.
2. Acharya, B., Behera, A., Behera, S., and Moharana, S. (2024). Recent advances in nanotechnology-based drug delivery systems for the diagnosis and treatment of reproductive disorders. *ACS Applied Bio Materials*, 7(3): 1336-1361. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c01064>.
3. Adams, J. (2023). Defending explicability as principle for the ethics of artificial intelligence in medicine. *Medicine, Health Care and Philosophy*. <https://doi.org/10.1007/s11019-023-10175-7>.
4. Adly, A. S., Adly, A. S., and Adly, M. S. (2020). Approaches based on artificial intelligence and the internet of intelligent things to prevent the spread of COVID-19: scoping review. *Journal of medical Internet research*, 22(8), e19104. <https://doi.org/10.2196/19104>.
5. Aerts, A., and Bogdan-Martin, D. (2021). Leveraging data and AI to deliver on the promise of digital health. *International Journal of Medical Informatics*, 150, 104456. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2021.104456>.
6. Agarwal, V., Mathiyazhagan, K., Malhotra, S., and Saikouk, T. (2022). Analysis of challenges in sustainable human resource management due to disruptions by Industry 4.0: an emerging economy perspective. *International Journal of Manpower*, 43(2): 513-541. <https://doi.org/10.1108/IJM-03-2021-0192>.
7. Ahsan, M. A., Ahmad, K., Ahamed, J., Omar, M., and Ahmad, K. A. B. (2023). PAPQ: Predictive analytics of product quality in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers*, (4): 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.02.001>.
8. Ahsan, M. M., and Siddique, Z. (2022). Industry 4.0 in Healthcare: A systematic review. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(1), 100079. <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2022.100079>.
9. Ahuja, A., Agrawal, S., Acharya, S., Batra, N., and Daiya, V. (2024). Advancements in wearable digital health technology: a review of epilepsy management. *Cureus*, 16(3). <https://doi.org/10.7759/cureus.57037>.
10. Ai, Y., Pan, B., Fu, Y., and Wang, S. (2017) Design of a novel robotic system for minimally invasive surgery. *Industrial Robot*, 44(3): 288–298. <https://doi.org/10.1108/IR-07-2016-0181>.
11. Aktürk, C. (2021). Artificial intelligence in enterprise resource planning systems: A bibliometric study. *Journal of International Logistics and Trade*, 19(2): 69-82. <https://doi.org/10.24006/jilt.2021.19.2.069>.



12. Al-Amin, M., Hossain, T., Islam, J., and Biwas, S. K. (2023). History, features, challenges, and critical success factors of enterprise resource planning (ERP) in the era of industry 4.0. *European scientific journal*, 19(6), 31. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n6p31>.
13. Alahmari, N., Alswedani, S., Alzahrani, A., Katib, I., Albeshri, A., and Mehmood, R. (2022). Musawah: A Data-Driven AI Approach and Tool to Co-Create Healthcare Services with a Case Study on Cancer Disease in Saudi Arabia. *Sustainability*, 14(6): 3313. <https://doi.org/10.3390/su14063313>.
14. Alowais, S. A., Alghamdi, S. S., Alsuhebany, N., Alqahtani, T., Alshaya, A. I., Almohareb, S. N., Aldairem A., Alrashed M., Saleh K.B., Badreldin H. A., Al Yami M.S., Al Harbi S., and Albekairy A.M. (2023). Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice. *BMC medical education*, 23(1): 689. <https://doi.org/10.1186/s12909-023-04698-z>.
15. Alsheibani, S. A., Cheung, Y., Messom, C., and Alhosni, M. (2020). Winning AI strategy: Six-steps to create value from artificial intelligence. *AMCIS 2020 Proceedings 1*. <https://shorturl.at/1p2dN>.
16. Al-Jaroodi, J., Mohamed, N., and Abukhousa, E. (2020). Health 4.0: on the way to realizing the healthcare of the future. *Ieee Access*, 8, 211189-211210. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038858>.
17. Al-Jaroodi, J., Mohamed, N., Kesserwan, N., and Jawhar, I. (2023). Human factors affecting the adoption of healthcare 4.0. In *2023 IEEE International Systems Conference*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/SysCon53073.2023.10131064>.
18. Andronie, M., Lazaroïu, G., Iatagan, M., Hurloiu, I., and Dijmarescu, I. (2021). Sustainable cyber-physical production systems in big data-driven smart urban economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(2): 751. <https://doi.org/10.3390/su13020751>.
19. Angioni, M., and Musso, F. (2020). New perspectives from technology adoption in senior cohousing facilities. *The TQM Journal*, 32(4): 761-777. <https://doi.org/10.1108/TQM-10-2019-0250>.
20. Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S. K., and Singh, S. (2021). Automation and manufacturing of smart materials in Additive Manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5081-5088. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.583>.
21. Babic, B., Gerke, S., Evgeniou, T., and Cohen, I. G. (2021). Direct-to-consumer medical machine learning and artificial intelligence applications. *Nature Machine Intelligence*, 3(4): 283-287. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00331-0>.
22. Badidi, E. (2022). Edge AI and Blockchain for Smart Sustainable Cities: Promise and Potential. *Sustainability*, 14(13), 7609. <https://doi.org/10.3390/su14137609>.
23. Bag, S., Pretorius, J. H. C., Gupta, S., and Dwivedi, Y. K. (2021). Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities. *Technological Forecasting and Social Change*, 163, 120420. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120420>.



24. Bausano, G. (2024). Intelligenza artificiale: è il momento della medicina generale, nell'interesse dei pazienti. *Care. Costi dell'Assistenza e Risorse Economiche*, (1/2) 7-7. <https://shorturl.at/33EA8>.
25. Bécue, A., Praça, I., and Gama, J. (2021). Artificial intelligence, cyber-threats and Industry 4.0: Challenges and opportunities. *Artificial intelligence review*, 54(5): 3849-3886. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09942-2>.
26. Benbya, H., Davenport, T. H., and Pachidi, S. (2020). Artificial intelligence in organizations: Current state and future opportunities. *MIS Quarterly Executive*, 19(4). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3741983>.
27. Bettiol, M., Di Maria, E., and Micelli, S. (2020). Industry 4.0 and Knowledge Management: An Introduction. In: Bettiol, M., Di Maria, E., and Micelli, S. (eds) *Knowledge Management and Industry 4.0*. Knowledge Management and Organizational Learning, vol 9. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43589-9>.
28. Bharadwaj, P., Nicola, L., Breau-Brunel M., Sensini F., Tanova-Yotova N., Atanasov P., Lobig F., and Blankenburg, M. (2024). Unlocking the value: quantifying the return on investment of hospital artificial intelligence. *Journal of the American College of Radiology*, 21(10), 1677-1685. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2024.02.034>.
29. Biondi, G., Cagnoni, S., Capobianco, R., Franzoni, V., Lisi, F. A., Milani, A., and Vallverdú, J. (2023). Ethical design of artificial intelligence-based systems for decision making. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 6, 1250209. <https://doi.org/10.3389/frai.2023.1250209>.
30. Bosman, L., Hartman, N., and Sutherland, J. (2020). How manufacturing firm characteristics can influence decision making for investing in Industry 4.0 technologies. *Journal of manufacturing technology management*, 31(5): 1117-1141. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0283>.
31. Brown, S. (2021) Machine Learning, explained – *MIT Management: Sloan School*. <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/machine-learning-explained>.
32. Brownstein, J.S., Rader, B., Astley, C.M., and Tian, H. (2023). Advances in Artificial Intelligence for Infectious-Disease Surveillance. *New England Journal of Medicine*, 388(17): 1597-607. <https://doi.org/10.1056/NEJMr2119215>.
33. Camilleri, M. A. (2024). Artificial intelligence governance: Ethical considerations and implications for social responsibility. *Expert systems*, 41(7), e13406. <https://doi.org/10.1111/exsy.13406>.
34. Capasso, M., and Umbrello, S. (2022). Responsible nudging for social good: new healthcare skills for AI-driven digital personal assistants. *Medicine, Health Care and Philosophy*, 25(1): 11-22. <https://doi.org/10.1007/s11019-021-10062-z>.
35. Carvalho, N. G. P., and Cazarini, E. W. (2020). Industry 4.0-What Is It? In: Hamilton Ortiz J. (eds) *Industry 4.0. Current Status and Future Trends*. IntechOpen. DOI: [10.5772/intechopen.90068](https://doi.org/10.5772/intechopen.90068).



36. Chattu, V. K. (2021). A review of artificial intelligence, big data, and blockchain technology applications in medicine and global health. *Big Data and Cognitive Computing*, 5(3), 41. <https://doi.org/10.3390/bdcc5030041>.
37. Chee, M. L., Ong, M. E. H., Siddiqui, F. J., Zhang, Z., Lim, S. L., Ho, A. F. W., and Liu, N. (2021). Artificial intelligence applications for COVID-19 in intensive care and emergency settings: a systematic review. *International journal of environmental research and public health*, 18(9), 4749. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094749>.
38. Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., and Yin, B. (2017). Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. *Ieee Access*, 6: 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>.
39. Coombs, C. (2020). Will COVID-19 be the tipping point for the intelligent automation of work? A review of the debate and implications for research. *International journal of information management*, 55, 102182. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102182>.
40. Da Costa, M. B., Dos Santos, L. M., Schaefer, J. L., Baierle, I. C. and Nara, E. O. (2019) Industry 4.0 technologies basic network identification. *Scientometrics*, 121(2): 977–994. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03216-7>.
41. Darvishi, H., Ciuonzo, D., Eide, E. R., and Rossi, P. S. (2020). Sensor-fault detection, isolation and accommodation for digital twins via modular data-driven architecture. *IEEE Sensors Journal*, 21(4): 4827–4838. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3029459>.
42. Devezas, T., and Sarygulov, A. (2017). *Industry 4.0*. Basel: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49604-7>.
43. Dhanpat, N., Buthelezi, Z. P., Joe, M. R., Maphela, T. V., and Shongwe, N. (2020). Industry 4.0: The role of human resource professionals. *SA Journal of Human Resource Management*, 18(1): 1-11. <https://doi.org/10.4102/sajhrm.v18i0.1302>.
44. Di Cataldo, L. (2024). Le relazioni industriali nel secolo della transizione. In: Di Cataldo, L., Occhipinti, M., and Pantaleo V. (eds) *Trasformazioni e intersezioni nella società contemporanea: Persone, Istituzioni, Ambiente e Tecnologia*. Vol. 2 (pp. 359-387). IPS Edizioni.
45. Di Cataldo L., and Dorigatti L. (2025). Intelligenza artificiale, condizioni di lavoro e relazioni industriali nei servizi labour intensive. Il caso dei contact center. *Quaderni di Rassegna Sindacale*, 2 (in corso di pubblicazione).
46. Dignum, V. (2018). Ethics in artificial intelligence: introduction to the special issue. *Ethics and Information Technology*, 20(1): 1-3. <https://doi.org/10.1007/s10676-018-9450-z>.
47. Doellgast, V., O’Bradey, S., and Kim, J. (2023). *AI in contact centers*. USA: Cornell University, ILR School. <https://shorturl.at/HKVRn>.



48. Dohale, V., Akarte, M., Gunasekaran, A., and Verma, P. (2022). Exploring the role of artificial intelligence in building production resilience: learnings from the COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Research*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2127961>.
49. Dwivedi, Y. K., Shareef, M. A., Mukerji, B., Rana, N. P., and Kapoor, K. K. (2018). Involvement in emergency supply chain for disaster management: A cognitive dissonance perspective. *International Journal of Production Research*, 56(21): 6758-6773. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1378958>.
50. Ekins, S. (2016). The next era: deep learning in pharmaceutical research. *Pharmaceutical research*, 33(11): 2594-2603. <https://doi.org/10.1007/s11095-016-2029-7>.
51. Elleuch, M. A., Hassena, A. B., Abdelhedi, M., and Pinto, F. S. (2021). Real-time prediction of COVID-19 patients health situations using Artificial Neural Networks and Fuzzy Interval Mathematical modeling. *Applied soft computing*, 110, 107643. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107643>.
52. Elzen, B. Geels F.W., Green K. (Eds.). (2004). *System Innovation and the Transition to Sustainability: Theory, Evidence and Policy*. Edward Elgar, Cheltenham. <https://doi.org/10.4337/9781845423421>.
53. Esteva A., Kuprel B., Novoa R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., and Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639): 115-118. <https://doi.org/10.1038/nature21056>.
54. Etzioni, A., and Etzioni, O. (2017). Incorporating ethics into artificial intelligence. *The Journal of Ethics*, 21(4): 403-418. <https://doi.org/10.1007/s10892-017-9252-2>.
55. Eurofound (2021), *The digital age: Implications of automation, digitisation and platforms for work and employment*, Challenges and prospects in the EU series, Publications Office of the European Union, Luxembourg. (ISBN: 978-92-897-2213-1). <https://doi.org/10.2806/288>.
56. Feng, Q., Tang, W., Zhang, Z., Wei, Y., Ren, L., Chang, W., Zhu D., Liang F., He G., and Xu, J. (2022). Robotic versus laparoscopic abdominoperineal resections for low rectal cancer: A single-center randomized controlled trial. *Journal of surgical oncology*, 126(8): 1481-1493. <https://doi.org/10.1002/jso.27076>.
57. Floridi, L. (2018). Soft Ethics and the Governance of the Digital. *Philosophy and Technology*, 31, (1): 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13347-018-0303-9>.
58. Floridi, L. (2023). *The Ethics of Artificial Intelligence: Principles, Challenges, and Opportunities*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198883098.001.0001>.
59. Floridi, L., and Cabitza, F. (2021). *Intelligenza artificiale: l'uso delle nuove macchine*. Bompiani, Milano. (ISBN-13: 978-8830109384).
60. Floridi L., and Cowls J. (2019). A unified framework of five principles for AI in society. *Harvard Data Science Review*, 1(1), <https://doi.org/10.1162/99608f92.8cd550d1>.
61. Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V. Luetge C., Madelin



- R., Pagallo U., Rossi F, Schafer B., Valcke P., and Vayena E. J. M. (2018), AI4People —An Ethical Framework for a Good IA Society: Opportunities, Risks, Principles, and Recommendations. *Minds and Machines* 28(4): 689-707. <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>.
62. Flynn, R. (2002). Clinical governance and governmentality. *Health, risk and society*, 4(2): 155-173. <https://doi.org/10.1080/13698570220137042>.
63. Fondazione Umberto Veronesi (2024) *La ricerca scientifica nell'era dell'intelligenza artificiale*. Documenti di Etica e Bioetica, Comitato Etico Fondazione Umberto Veronesi.
64. Fong, P. Y., Chan, Y. M., and Tang, J. Z. E. (2021). Otogenic Lemierre's Syndrome With Bilateral Metastatic Pneumonia: Report of an Unusual Case in a Male. *Archives of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*, 6(1): 5. <https://doi.org/10.24983/scitemed.aohns.2022.00158>.
65. Foruzandeh, E., Jalali, S. M., and Taherikia, F. (2025). Designing an Artificial Intelligence-Based Customer Relationship Management Model to Achieve Competitive Advantage in the Food Industry. *Business, Marketing, and Finance Open*, 2(3):25-33. <https://doi.org/10.61838/bmfopen.2.3.3>.
66. Freeman, C., and Louçã F. (2001). *As Time Goes By: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/0199251053.001.0001>.
67. Fry, E. A., and Lenert, L. A. (2005) MASCAL: RFID tracking of patients, staff and equipment to enhance hospital response to mass casualty events. *AMIA Annual Symposium Proceedings* (vol. 2005.). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16779042/>.
68. Geels F. W., (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy*, 33(6-7):897-920. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>.
69. Ghayvat, H., Awais, M., Gope, P., Pandya, S., and Majumdar, S. (2021). Recognizing suspect and predicting the spread of contagion based on mobile phone location data (counteract): a system of identifying covid-19 infectious and hazardous sites, detecting disease outbreaks based on the internet of things, edge computing, and artificial intelligence. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102798. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102798>.
70. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., and Bengio, Y. (2016). *Deep learning* (Vol. 1, No. 2). Cambridge: MIT press. (ISBN-13: 978-0262035613).
71. Grandinetti, R. (2016). Absorptive capacity and knowledge management in small and medium enterprises. *Knowledge Management Research and Practice*, 14(2):159-168. <https://doi.org/10.1057/kmrp.2016.2>.
72. Gunasekeran, D. V., Tseng, R. M. W. W., Tham, Y. C., and Wong, T. Y. (2021). Applications of digital health for public health responses to COVID-19: a systematic scoping review of artificial intelligence, telehealth and related technologies. *NPJ digital medicine*, 4(1):1-6. <https://doi.org/10.1038/s41746-021-00412-9>.



73. Hadley, T. D., Pettit, R. W., Malik, T., Khoei, A. A., and Salihu, H. M. (2020). Artificial intelligence in global health—a framework and strategy for adoption and sustainability. *International Journal of Maternal and Child Health and AIDS*, 9(1):121. <https://doi.org/10.21106/ijma.296>.
74. Haenlein, M., Kaplan, A., Tan, C. W., and Zhang, P. (2019) Artificial intelligence (AI) and management analytics. *Journal of Management Analytics*, 6(4):341–343. <https://doi.org/10.1080/23270012.2019.1699876>.
75. Haleem, A., and Javaid, M. (2020) Medical 4.0 and its role in healthcare during COVID-19 pandemic: A review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 5(04):531-545. <https://doi.org/10.1142/S2424862220300045>.
76. Hammock, M. L., Chortos, A., Tee, B. C., Tok, J. B., and Bao, Z. (2013). 25th anniversary article: The evolution of electronic skin (e-skin): A brief history, design considerations, and recent progress. *Adv Mater*, 25(42):5997–6038. <https://doi.org/10.1002/adma.201302240>.
77. Harding, J. A., Shahbaz, M., and Kusiak, A. (2006). Data mining in manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(4):969-976. <https://doi.org/10.1115/1.2194554>.
78. Hassanpour, S., and Langlotz, C. P. (2016). Information extraction from multi-institutional radiology reports. *Artificial intelligence in medicine*, (66):29-39. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2015.09.007>.
79. Haug, C. J., and Drazen, J. M. (2023). Artificial Intelligence and Machine Learning in Clinical Medicine, *New England Journal of Medicine* [Internet]; 388(13):1201–8. Available from: <https://doi.org/10.1056/NEJMr2302038>.
80. Hofmann, E., Sternberg, H., Chen, H., Pflaum, A., and Prockl, G. (2019). Supply chain management and Industry 4.0: conducting research in the digital age. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 49(10), 945-955. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-11-2019-399>.
81. Högberg, C., Larsson, S., and Lång, K. (2024). Engaging with artificial intelligence in mammography screening: Swedish breast radiologists' views on trust, information and expertise. *Digital Health*, 10. <https://doi.org/10.1177/20552076241287958>.
82. Hossain, M. S., Muhammad, G., and Alamri, A. (2019). Smart healthcare monitoring: A voice pathology detection paradigm for smart cities. *Multimedia Systems*, 25, 565–575. <https://doi.org/10.1007/s00530-017-0561-x>.
83. Huang, C., Zhang, Z., Mao, B., and Yao, X. (2022). An overview of artificial intelligence ethics. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 4(4), 799-819. <https://doi.org/10.1109/TAI.2022.3194503>.
84. Hughes, L., Dwivedi, Y. K., Rana, N. P., Williams, M. D. and Raghavan, V. (2020) Perspectives on the future of manufacturing within the industry 4.0 era. *Production Planning and Control*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810762>.



85. Iftikhar, M., Saqib, M., Zareen, M., and Mumtaz, H. (2024). Artificial intelligence: revolutionizing robotic surgery. *Annals of Medicine and Surgery*, 86(9), 5401-5409. <https://doi.org/10.1097/MS9.0000000000002426>.
86. Jan, Z., Ahamed, F., Mayer, W., Patel, N., Grossmann, G., Stumptner, M., and Kuusk, A. (2023). Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 216, 119456. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119456>.
87. Jan, Z., and Verma, B. (2020). Multicluster class-balanced ensemble. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(3), 1014-1025. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2979839>.
88. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., and Suman, R. (2022). Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 7(01), 83-111. <https://doi.org/10.1142/S2424862221300040>.
89. Jawad, Z. N., and Balázs, V. (2024). Machine learning-driven optimization of enterprise resource planning (ERP) systems: a comprehensive review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 13(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00460-y>.
90. Jin, H., Qi, C., and Chen, Z. (2024). Affective computing for healthcare: *Recent trends, applications, challenges, and beyond*. *Emotional Intelligence*, 3. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5084-2_1.
91. Jobin, A., Ienca, M., and Vayena, E. (2019). The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature machine intelligence*, 1(9), 389-399. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0088-2>
92. Jung, Y., Hur, C., and Kim, M. (2018). Sustainable situation-aware recommendation services with collective intelligence. *Sustainability*, 10(5), 1632. <https://doi.org/10.3390/su10051632>.
93. Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, B. H., and Noh, S. D. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 3(1), 111-128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>.
94. Kankanhalli, A., Charalabidis, Y., and Mellouli, S. (2019). IoT and AI for smart government: A research agenda. *Government Information Quarterly*, 36(2), 304-309. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.02.003>.
95. Kellogg, K. C., Valentine, M. A., and Christin, A. (2020). Algorithms at work: The new contested terrain of control. *Academy of management annals*, 14(1), 366-410. <https://doi.org/10.5465/annals.2018.0174>.
96. Khan, M., Mehran, M. T., Haq, Z. U., Ullah, Z., Naqvi, S. R., Ihsan, M., and Abbass, H. (2021). Applications of artificial intelligence in COVID-19 pandemic: A comprehensive review. *Expert systems with applications*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115695>.
97. Kjellström, B., Igel, D., Abraham, J., Bennett, T., and Bourge, R. (2005). Trans-telephonic monitoring of continuous haemodynamic measurements in heart failure patients. *Journal of telemedicine and telecare*, 11(5), 240-244. <https://doi.org/10.1258/1357633054471795>.



98. Kotsiopoulos, T., Sarigiannidis, P., Ioannidis, D., and Tzovaras, D. (2021). Machine learning and deep learning in smart manufacturing: The smart grid paradigm. *Computer Science Review*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100341>.
99. Kovács, G., Kopácsi, S., Haidegger, G., and Michelini, R. (2006). Ambient intelligence in product life-cycle management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19(8), 953-965. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.01.017>.
100. KPMG, (2022). Healthcare for all- the greatest gift. <https://shorturl.at/Nra3b>.
101. Kumar, S., Raut, R. D., and Narkhede, B. E. (2020). A proposed collaborative framework by using artificial intelligence-internet of things (AI-IoT) in COVID-19 pandemic situation for healthcare workers. *International Journal of Healthcare Management*, 13(4), 337-345. <https://doi.org/10.1080/20479700.2020.1810453>.
102. Kunduru, A. R. (2023). Effective usage of artificial intelligence in enterprise resource planning applications. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 71(4), 73-80. <https://doi.org/10.14445/22312803/IJCTT-V71I4P109>.
103. Kuo, C. L. (2020). Dangers of a false sense of security in a huge mastoid cholesteatoma with skull base erosion and cerebrospinal fluid leakage. *Archives of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery (AOHNS)*, 4 (2), 5. <https://doi.org/10.24983/scitemed.aohns.2020.00134>.
104. Kuo, C. L. (2023). Revolutionizing healthcare paradigms: The integral role of artificial intelligence in advancing diagnostic and treatment modalities. *International Microsurgery Journal (IMJ)*;7(1):4. <https://doi.org/10.24983/scitemed.imj.2023.00177>.
105. Kuo, C. L., Chang, W. P., Chang, N. H. Y., Shiao, A. S., and Lien, C. F. (2017). Increased Risk of Depression in Patients with Cholesteatoma. *Archives of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*; 1(3):1. <https://doi.org/10.24983/scitemed.aohns.2017.00038>.
106. Kuo, C. L., and Lien, C. F. (2022). Safe tympanic retraction may be unsafe: A false sense of security in a patient with cholesteatoma. *Archives of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*; 6(2):3. <https://doi.org/10.24983/scitemed.aohns.2022.00168>.
107. Kuo, Y. H., and Kusiak, A. (2019). From data to big data in production research: the past and future trends. *International Journal of Production Research*, 57(15-16): 4828-4853. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443230>.
108. Kusiak, A. (1990). *Intelligent manufacturing systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. (ISBN: 978013468345).
109. Kusiak, A. (2017). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 508-517. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>.
110. Kusiak, A. (2019). Intelligent manufacturing: bridging two centuries. *Journal of intelligent manufacturing*, 30(1), 1-2. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1455-2>.



111. Lalmuanawma, S., Hussain, J., and Chhakchhuak, L. (2020). Applications of machine learning and artificial intelligence for Covid-19 (SARS-CoV-2) pandemic: A review. *Chaos, Solitons and Fractals*, 139, 110059. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110059>.
112. Larsson, S., and Heintz, F. (2020). Transparency in artificial intelligence. *Internet Policy Review*, 9. <https://doi.org/10.14763/2020.2.1469>.
113. Larsson, I., Svedberg, P., Nygren, J. M., and Petersson, L. (2025) Healthcare leaders' perceptions of the contribution of artificial intelligence to person-centred care: An interview study. *Scandinavian Journal of Public Health*, 53(1_suppl):72-80. <https://doi.org/10.1177/14034948241307112>.
114. LeBlanc, K., Dickens, E., Gonzalez, A., Gamagami, R., Pierce, R., Balentine, C., and Voeller, G. (2020). Prospective, multicenter, pairwise analysis of robotic-assisted inguinal hernia repair with open and laparoscopic inguinal hernia repair: Early results from the prospective hernia study. *Hernia* 24(5): 1069–1081. <https://doi.org/10.1007/s10029-020-02224-4>.
115. Ledro, C., Nosella, A., and Vinelli, A. (2022). Artificial intelligence in customer relationship management: literature review and future research directions. *Journal of Business and Industrial Marketing*, 37(13), 48-63. <https://doi.org/10.1108/JBIM-07-2021-0332>.
116. Lee, J., Davari, H., Singh, J., and Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 18, 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>.
117. Lee, C., and Lim, C. (2021). From technological development to social advance: A review of Industry 4.0 through machine learning. *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120653. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120653>.
118. Lehne, M., Sass, J., Essenwanger, A., Schepers, J., and Thun, S. (2019). Why digital medicine depends on interoperability. *npj Digital Medicine*, 2(1), 79. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0158-1>.
119. Leimanis, A., and Palkova, K. (2021). Ethical guidelines for artificial intelligence in healthcare from the sustainable development perspective. *European Journal of Sustainable Development*, 10(1): 90-90. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2021.v10n1p90>.
120. Lerch, C. M., Heimberger, H., Jäger, A., Horvat, D., and Schultmann, F. (2022). AI-readiness and production resilience: empirical evidence from German manufacturing in times of the Covid-19 pandemic. *International Journal of Production Research*, 62(15): 1-22. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2141906>.
121. Li, S. (2024). Optimization of human resources in automated factories based on artificial intelligence in the context of Industry 4.0. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14241-z>.



122. Li, B. H., Hou, B. C., Yu, W. T., Lu, X. B. and Yang, C. W. (2017) Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: A review. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, 18(1): 86–96.
<https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>.
123. Li, B., Qi, P., Liu, B., Di, S., Liu, J., Pei, J., Yi, J., and Zhou, B. (2023). Trustworthy AI: From principles to practices. *ACM Computing Surveys*, 55(9): 1-46.
<https://doi.org/10.1145/3555803>.
124. Liu, Y., Zhang, Y., Ren, S., Yang, M., Wang, Y., and Huisingh, D. (2020). How can smart technologies contribute to sustainable product lifecycle management?. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119423>.
125. Liu, Z., Yang, G., and Zhang, Y. (2023). Carbon footprint assessment in manufacturing Industry 4.0 using machine learning with intelligent Internet of things. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12183-6>.
126. Loorbach, D., Frantzeskaki, N., and Huffenreuter, R. L. (2015). Transition Management. Taking Stock from Governance Experimentation. In *Large Systems Change: An Emerging Field of Transformation and Transitions* (pp. 48-66). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781003579380>.
127. Lu, Y., Morris, K. C., and Frechette, S. (2016). Current standards landscape for smart manufacturing systems. *National Institute of Standards and Technology*, 8107(3): 1-39.
<https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8107>.
128. Mah, P. M., Skalna, I., and Muzam, J. (2022). Natural language processing and artificial intelligence for enterprise management in the era of industry 4.0. *Applied Sciences*, 12(18), 9207. <https://doi.org/10.3390/app12189207>.
129. Manesh, M. F., Pellegrini, M. M., Marzi, G., and Dabic, M. (2020). Knowledge management in the fourth industrial revolution: Mapping the literature and scoping future avenues. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68(1): 289-300.
<https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2963489>.
130. Macfarlane, A. J. R. (2019). What is clinical governance?. *BJA education*, 19(6): 174-175.
<https://doi.org/10.1016/j.bjae.2019.02.003>.
131. Mazurek, G., and Małagocka, K. (2019). Perception of privacy and data protection in the context of the development of artificial intelligence. *Journal of Management Analytics*, 6(4): 344–364. <https://doi.org/10.1080/23270012.2019.1671243>.
132. McGreevey, J. D., Hanson, C. W., and Koppel, R. (2020). Clinical, legal, and ethical aspects of artificial intelligence–assisted conversational agents in health care. *Jama*, 324(6): 552-553. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.2724>.
133. Milne-Ives, M., de Cock, C., Lim, E., Shehadeh, M. H., de Pennington, N., Mole, G., ... and Meinert, E. (2020). The effectiveness of artificial intelligence conversational agents in health care: systematic review. *Journal of medical Internet research*, 22(10).
<https://doi.org/10.2196/20346>.



134. Mishra, S., Thakkar, H., Mallick, P. K., Tiwari, P., and Alamri, A. (2021). A Sustainable IoHT based Computationally Intelligent Healthcare Monitoring System for Lung Cancer Risk Detection. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103079>.
135. Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., and Wuest, T. (2019). Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 233(5): 1342-1361. <https://doi.org/10.1177/0954405417736547>.
136. Mithas, S., Chen, Z. L., Saldanha, T. J., and De Oliveira Silveira, A. (2022). How will artificial intelligence and Industry 4.0 emerging technologies transform operations management?. *Production and Operations Management*, 31(12): 4475-4487. <https://doi.org/10.1111/poms.13864>.
137. Moglia, A., Georgiou, K., Georgiou, E., Satava, R. M., and Cuschieri, A. (2021). A systematic review on artificial intelligence in robot-assisted surgery. *International Journal of Surgery*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.ijisu.2021.106151>.
138. Moreira, P. A., Fernandes, R. M., Avila, L. V., Bastos, L. D. S. L., and Martins, V. W. B. (2023). Artificial intelligence and industry 4.0? Validation of challenges considering the context of an emerging economy country using Cronbach's Alpha and the Lawshe method. *Eng*, 4(3), 2336-2351. <https://doi.org/10.3390/eng4030133>.
139. Mrówczyńska, M., Sztubecka, M., Skiba, M., Bazan-Krzywoszańska, A., and Bejga, P. (2019). The use of artificial intelligence as a tool supporting sustainable development local policy. *Sustainability*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/su11154199>.
140. Mun, J., Housel, T., Jones, R., Carlton, B., and Skots, V. (2020). Acquiring artificial intelligence systems: Development challenges, implementation risks, and cost/benefits opportunities. *Naval Engineers Journal*, 132(2), 79-94. <https://shorturl.at/qvFDu>.
141. Murero, M., and Punziano, G. (2025). Intelligenza Artificiale in Medicina: Literacy, Percezioni ed Esperienze tra Futuri Plausibili e Nuove Disuguaglianze. *Rivista trimestrale di scienza dell'amministrazione*, 1, 1-44. <https://dx.doi.org/10.32049/RTSA.2025.1.04>.
142. Murphy, K. P. (2012). *Machine learning: a probabilistic perspective*. MIT press. (ISBN: 9780262018029).
143. Nakagawa, E. Y., Antonino, P. O., Schnicke, F., Kuhn, T., and Liggesmeyer, P. (2021). Continuous systems and software engineering for industry 4.0: A disruptive view. *Information and software technology*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106562>.
144. Naseem, M., Akhund, R., Arshad, H., and Ibrahim, M. T. (2020). Exploring the potential of artificial intelligence and machine learning to combat COVID-19 and existing opportunities for LMIC: a scoping review. *Journal of Primary Care and Community Health*, 11. <https://doi.org/10.1177/2150132720963634>.
145. Nasseef, O. A., Baabdullah, A. M., Alalwan, A. A., Lal, B., and Dwivedi, Y. K. (2021). Artificial intelligence-based public healthcare systems: G2G knowledge-based exchange to enhance the decision-making process. *Government Information Quarterly*. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2021.101618>.



146. Nesari, M., Naghizadeh, M., Ghazinoori, S., and Manteghi, M. (2022). The evolution of socio-technical transition studies: a scientometric analysis. *Technology in Society*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101834>.
147. Newbert, S. L., (2007). Empirical research on the resource-based view of the firm: an assessment and suggestions for future research. *Strategic Management Journal*, (28): 121–146. <https://doi.org/10.1002/smj.573>.
148. Nuttah, M. M., Roma, P., Nigro, G. L., and Perrone, G. (2023). Understanding blockchain applications in Industry 4.0: From information technology to manufacturing and operations management. *Journal of Industrial Information Integration*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100456>.
149. Oikonomou, E. K., and Khera, R. (2025). Expanding artificial intelligence to understudied populations: congenital heart disease as the next frontier, *European Heart Journal*, 46(9): 869–871. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae737>.
150. ONU (2022). *Sustainable Development Goals. Goal 3: Ensure healthy lives and promotes well-being for all at all ages*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/health/>.
151. Oztemel, E., and Gursev, S. (2020). Literature review of industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1): 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.
152. Pandey, S., Gupta, S., and Chhajer, S. (2021). ROI of AI: Effectiveness and measurement. *International Journal Of Engineering Research and Technology*, 10. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3858398>.
153. Park, K. (2013). Facing the truth about nanotechnology in drug delivery. *ACS Nano*, 7(9): 7442–7447. <https://doi.org/10.1021/nn404501g>.
154. Parviainen, J., and Rantala, J. (2021). Chatbot breakthrough in the 2020s? An ethical reflection on the trend of automated consultations in health care. *Medicine, Health Care and Philosophy*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11019-021-10049-w>.
155. Pascu-Gabara, E. I., and Cepoi, A. (2021). Innovative solutions to overcome the health services crisis within the Covid-19 era. *IBIMA Business Review*. <https://doi.org/10.5171/2021.907184>.
156. Peng, Y., Liu, E., Peng, S., Chen, Q., Li, D., and Lian, D. (2022). Using artificial intelligence technology to fight COVID-19: a review. *Artificial intelligence review*, 55(6), 4941-4977. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10106-z>.
157. Pereira, A. G., Lima T.M. and Charrua-Santos F. (2020). Industry 4.0 and society 5.0: Opportunities and threats. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(5), 3305–3308. <https://doi.org/10.35940/ijrte.D8764.018520>.
158. Peres, R. S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A. W., and Barata, J. (2020). Industrial artificial intelligence in industry 4.0-systematic review, challenges and outlook. *IEEE access*, 8, 220121-220139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042874>.



159. Pokhrel, S. R., Pan, L., Kumar, N., Doss, R., and Vu, H. L. (2021). Multipath TCP meets transfer learning: A novel edge-based learning for industrial IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(13), 10299-10307. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2021.3056466>.
160. Pollack, M. E. (2005). Intelligent technology for an aging population: The use of ai to assist elders with cognitive impairment. *AI Magazine*, 26(2),9. <https://doi.org/10.1609/aimag.v26i2.1810>.
161. Popkova, E. G., and Sergi, B. S. (2022). Digital public health: Automation based on new datasets and the Internet of Things. *Socio-Economic Planning Sciences*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101039>.
162. Pourhosseini, S. S., Ardalan, A., and Mehroolhassani, M. H. (2015). Key aspects of providing healthcare services in disaster response stage. *Iranian journal of public health*, 44(1), 111. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26060782/>.
163. Puhovichova, D., and Jankelova, N. (2020). Changes of human resource management in the context of impact of the fourth industrial revolution. *Industry 4.0*, 5(3): 138-141. <https://stumejournals.com/journals/i4/2020/3/138>.
164. Radanliev, P., De Roure, D., Maple, C., and Ani, U. (2022a). Super-forecasting the 'technological singularity' risks from artificial intelligence. *Evolving Systems*, 13(5), 747-757. <https://doi.org/10.1007/s12530-022-09431-7>.
165. Radanliev, P., De Roure, D., Maple, C., and Santos, O. (2022b). Forecasts on future evolution of artificial intelligence and intelligent systems. *Ieee Access*, 10, 45280-45288. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169580>.
166. Rahman, M. A., Hossain, M. S., Showail, A. J., Alrajeh, N. A., and Alhamid, M. F. (2021a). A Secure, Private, and Explainable IoHT Framework to Support Sustainable Health Monitoring in a Smart City. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103083>.
167. Rahman, M. M., Khatun, F., Uzzaman, A., Sami, S. I., Bhuiyan, M. A. A., and Kiong, T. S. (2021b). A comprehensive study of artificial intelligence and machine learning approaches in confronting the coronavirus (COVID-19) pandemic. *International Journal of Health Services*, 51(4), 446-461. <https://doi.org/10.1177/00207314211017469>.
168. Rahwan, I. (2018). Society in the Loop: Programming the Algorithmic Social Contract. *Ethics and Information Technology*. 20(1): 5-14. <https://doi.org/10.1007/s10676-017-9430-8>.
169. Rajpurkar, P., and Lungren, M. P. (2023). The Current and Future State of AI Interpretation of Medical Images. *New England Journal of Medicine*, 388(21): 1981-90. Available from: <https://doi.org/10.1056/NEJMra2301725>.
170. Ramesh, A., and Chawla, V. (2022). Chatbots in marketing: A literature review using morphological and co-occurrence analyses. *Journal of Interactive Marketing*, 57(3): 472-496. <https://doi.org/10.1177/10949968221095549>.



171. Rana, G., and Sharma, R. (2019). Emerging human resource management practices in Industry 4.0. *Strategic HR Review*, 18(4): 176-181. <https://doi.org/10.1108/SHR-01-2019-0003>.
172. Rauch, E., Linder, C., and Dallasega, P. (2020). Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0. *Computers and Industrial Engineering*, 139, 105644. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.018>.
173. Richie, C. (2022). Environmentally sustainable development and use of artificial intelligence in health care. *Bioethics*, 36(5): 547-555. <https://doi.org/10.1111/bioe.13018>.
174. Rikalovic, A., Suzic, N., Bajic, B. and Piuri, V. (2022), "Industry 4.0 Implementation Challenges and Opportunities: A Technological Perspective", *IEEE System Journal*, 16 (2): 2797-2810. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3101673>.
175. Rojek, I., Macko, M., Mikołajewski, D., Sága, M., and Burczyński, T. (2021). Modern methods in the field of machine modelling and simulation as a research and practical issue related to Industry 4.0. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 69(2). <https://doi.org/10.24425/bpasts.2021.136717>.
176. Rotmans, J., Kemp, R., and Van Asselt, M. (2001). More evolution than revolution: transition management in public policy, *Foresight*, 3 (1): 15-31. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2021.136717>.
177. Rotmans, J., and Loorbach, D. (2001). Transition management. A new steering model. *ArenA Lucht*, 7(6), 5-8.
178. Rotmans, J., Van Asselt, M., Anastasi, C., Greeuw, S., Mellors, J., Peters, S., Rotham, D., and Rijkens, N. (2000). Visions for a sustainable Europe, *Futures*, 32(9-10): 809-831. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(00)00033-1).
179. Saba, L., Biswas, M., Kuppili, V., Godia, E. C., Suri, H. S., Edla, D. R., and Protogerou, A. (2019). The present and future of deep learning in radiology. *European Journal of Radiology*, 114, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.02.038>.
180. Samarasinghe, K. R., and Medis, A. (2020). Artificial intelligence based strategic human resource management (AISHRM) for industry 4.0. *Global journal of management and business research*, 20(2): 7-13. <https://doi.org/10.34257/GJMBRGVOI20IS2PG7>.
181. Samuel, A. L. (1959). Machine learning. *The Technology Review*, 62(1), 42-45.
182. Samuels, A. (2025). Examining the integration of artificial intelligence in supply chain management from Industry 4.0 to 6.0: a systematic literature review. *Frontiers in artificial intelligence*, 7. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1477044>.
183. Sarbadhikari, S. N., and Pradhan, K. B. (2020). The need for developing Technology-Enabled, safe, and ethical workforce for healthcare delivery. *Safety and Health at Work*, 11(4): 533-536. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.08.003>.



184. Satpathy, S., Mangla, M., Sharma, N., Deshmukh, H., and Mohanty, S. (2021). Predicting mortality rate and associated risks in COVID-19 patients. *Spatial Information Research*, 29(4): 455-464. <https://doi.org/10.1007/s41324-021-00379-5>.
185. Saygin, A. P., Cicekli, I., and Akman, V. (2000). Turing test: 50 years later. *Minds and Machines*, 10(4): 463-518. <https://doi.org/10.1023/A:1011288000451>.
186. Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. Random House USA Inc. (ISBN-13: 978-0241300756).
187. Scott, B. K., Miller, G. T., Fonda, S. J., Yeaw, R. E., Gaudaen, J. C., Pavliscsak, H. H., Quinn, M. T., and Pamplin, J. C. (2020). Advanced digital health technologies for COVID-19 and future emergencies. *Telemedicine and e-Health*, 26(10): 1226-1233. <https://doi.org/10.1089/tmj.2020.0140>.
188. Secinaro, S., Calandra, D., Secinaro, A., [...], and Biancone, P. (2021). The role of artificial intelligence in healthcare: a structured literature review. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 21(1): 1-23. <https://doi.org/10.1186/s12911-021-01488-9>.
189. Sharma, G. D., Yadav, A., and Chopra, R. (2020). Artificial intelligence and effective governance: A review, critique and research agenda. *Sustainable Futures*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2019.100004>.
190. Siau, K., and Wang, W. (2018), Building Trust in Artificial Intelligence, Machine Learning, and Robotics. *Cutter Business Technology Journal* (31): 47-53.
191. Simon, H. A. (1991). Bounded rationality and organizational learning. *Organization science*, 2(1): 125-134. <https://doi.org/10.1287/orsc.2.1.125>.
192. Singh, R. K., Kumar, P., and Chand, M. (2021). Evaluation of supply chain coordination index in context to Industry 4.0 environment. *Benchmarking: An International Journal*, 28(5): 1622-1637. <https://doi.org/10.1108/BIJ-07-2018-0204>.
193. Skilton, M., and Hovsepian, F. (2018). The 4th industrial revolution. *Springer Nature*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62479-2>.
194. Sofiyah, F. R., Dilham, A., Hutagalung, A. Q., Yulinda, Y., Lubis, A. S., and Marpaung, J. L. (2024). The chatbot artificial intelligence as the alternative customer services strategic to improve the customer relationship management in real-time responses. *International Journal of Economics and Business Research*, 27(5): 45-58. <https://doi.org/10.1504/IJEBR.2024.139810>.
195. Stanisławski, R., and Szymonik, A. (2021). Impact of selected intelligent systems in logistics on the creation of a sustainable market position of manufacturing companies in Poland in the context of Industry 4.0. *Sustainability*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/su13073996>.
196. Straw, I. (2020). The automation of bias in medical Artificial Intelligence (AI): Decoding the past to create a better future. *Artificial intelligence in medicine*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2020.101965>.



197. Sucandy I., Rayman S., Lai E.C. [...] and Pratschke, J., (2022). Robotic versus laparoscopic left and extended left hepatectomy: An international multicenter study propensity score-matched analysis. *Annals of Surgical Oncology*, 29(13): 8398–8406. <https://doi.org/10.1245/s10434-022-12216-6>.
198. Sun, T. Q., and Medaglia, R. (2019). Mapping the challenges of Artificial Intelligence in the public sector: Evidence from public healthcare. *Government Information Quarterly*, 36(2): 368-383. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2018.09.008>.
199. Sun, Y., Xu, H., Li, Z., Han, J., Song, W., Wang, J., and Xu, Z. (2016). Robotic versus laparoscopic low anterior resection for rectal cancer: a meta-analysis. *World journal of surgical oncology*, 14(1): 61. <https://doi.org/10.1186/s12957-016-0816-6>.
200. Taherdoost, H., and Madanchian, M. (2023). Artificial Intelligence and Knowledge Management: Impacts, Benefits, and Implementation. *Computers*, 12(4): 72. <https://doi.org/10.3390/computers12040072>.
201. Tan, N. G., Yang, L. W. Y., Tan, M. Z. W., Chng, J., Tan, M. H. T., and Tan, C. (2022). Virtual care to increase military medical centre capacity in the primary health care setting: A prospective self-controlled pilot study of symptoms collection and telemedicine. *Journal of telemedicine and telecare*, 28(8): 603-612. <https://doi.org/10.1177/1357633X20959579>.
202. Taranto-Vera, G., Galindo-Villardón, P., Merchán-Sánchez-Jara, J., Salazar-Pozo, J., Moreno-Salazar, A., and Salazar-Villalva, V. (2021). Algorithms and software for data mining and machine learning: A critical comparative view from a systematic review of the literature. *The Journal of Supercomputing*, 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03708-5>.
203. Tucker, G. (2021). Sustainable product lifecycle management, industrial big data, and internet of things sensing networks in cyber-physical system-based smart factories. *Journal of Self-Governance and Management Economics*, 9(1): 9-19. <https://doi.org/10.22381/jsme9120211>.
204. Tuffnell, C., Kral, P., Durana, P., and Krulicky, T. (2019) Industry 4.0-based manufacturing systems: Smart production, sustainable supply chain networks, and real-time process monitoring. *Journal of Self-Governance and Management Economics*, 7(2): 7–12. <https://doi.org/10.22381/JSME7220191>.
205. Tung, K. (2019). AI, the internet of legal things, and lawyers. *Journal of Management Analytics*, 6(4): 390–403. <https://doi.org/10.1080/23270012.2019.1671242>.
206. Turing, A. M. (1950) Computing Machinery and Intelligence. *Mind*,(49): 433-460 <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>.
207. Uhl-Bien, M., Marion, R., and McKelvey, B. (2007). Complexity leadership theory: Shifting leadership from the industrial age to the knowledge era. *The leadership quarterly*, 18 (4): 298–318. <https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2007.04.002>.
208. Umbrello, S., Capasso, M., Balistreri, M., Pirni, A., and Merenda, F. (2021). Value sensitive design to achieve the UN SDGs with AI: A case of elderly care robots. *Minds and Machines*, 31(3): 395-419. <https://doi.org/10.1007/s11023-021-09561-y>.



209. Unberath, M., Ghobadi, K., Levin, S., Hinson, J., and Hager, G. D. (2020). Artificial Intelligence-Based Clinical Decision Support for COVID-19-Where Art Thou?. *Advanced Intelligent Systems*, 2(9). <https://doi.org/10.1002/aisy.202000104>.
210. Vaishya, R., Javaid, M., Khan, I. H., and Haleem, A. (2020). Artificial Intelligence (AI) applications for COVID-19 pandemic. *Diabetes and Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews*, 14(4): 337-339. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.04.012>.
211. Van Driel, H., and Schot J. W., (2005) Radical innovation as a multilevel process: introducing floating grain elevators in the port of Rotterdam. *Technology and Culture*, 46(1), 51-76. <https://doi.org/10.1353/tech.2005.0011>.
212. Van Geenhuizen, M., and Soetanto, D. P. (2009). Academic spin-offs at different ages: A case study in search of key obstacles to growth. *Technovation*, 29(10): 671-681. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.05.009>.
213. Xie, Y., Yin, Y., Xue, W., Shi, H., and Chong, D. (2020). Intelligent supply chain performance measurement in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4): 711-718. <https://doi.org/10.1002/sres.2712>.
214. Xu, L. D. (2021). Special issue on system research on artificial intelligence. *Systems Research and Behavioral Science*, 38(1) <https://doi.org/10.1002/sres.2776>.
215. Walmsley, J. (2021). Artificial intelligence and the value of transparency. *AI and society*, 36(2): 585-595. <https://doi.org/10.1007/s00146-020-01066-z>.
216. Wan, J., Li, X., Dai, H.-N., Kusiak, A., Martínez-García, M., and Li, D. (2020). Artificialintelligence-driven customized manufacturing factory: Key technologies, applications, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 109(4): 377-398. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034808>.
217. Wang, L., and Alexander, C. A. (2021). COVID-19: a pandemic challenging healthcare system. *IIEE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 11(4): 271-292. <https://doi.org/10.1080/24725579.2021.1933269>.
218. Wang, L., Liu, Z., Liu, A., and Tao, F. (2021). Artificial intelligence in product lifecycle management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(3): 771-796. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06882-1>.
219. Wang, X., Zhang, Z., Yang, L., and Zhao, J. (2021a). Price and capacity decisions in a telemedicine service system under government subsidy policy. *International Journal of Production Research*, 59(17): 5130-5143. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1774090>.
220. Wang, W. T., and Wu, S. Y. (2021b). Knowledge management based on information technology in response to COVID-19 crisis. *Knowledge Management Research and Practice*, 19(4): 468-474. <https://doi.org/10.1080/14778238.2020.1860665>.
221. Winfield, A. F., Booth, S., Dennis, L. A., Egawa, T., Hastie, H., Jacobs, N., Muttram, R.,



- Olszewska, J. I., Rajabiyazdi, F., Theodoru, A., Underwood, M. A., Wortham, R. H., and Watson, E. (2021). IEEE P7001: A proposed standard on transparency. *Frontiers in Robotics and AI*, 8. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.665729>.
222. Wu, Y., Li, X., Fu, X., [...] and Huang, J. (2024). Innovative nanotechnology in drug delivery systems for advanced treatment of posterior segment ocular diseases. *Advanced science*, 11(32). <https://doi.org/10.1002/advs.202403399>.
223. Wu, Q., Ren, H., Shi, S., Fang, C., Wan, S., and Li, Q. (2023). Analysis and prediction of industrial energy consumption behavior based on big data and artificial intelligence. *Energy Reports*, (9): 395-402. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2023.01.007>.
224. Yigitcanlar, T., and Cugurullo, F. (2020). The sustainability of artificial intelligence: An urbanistic viewpoint from the lens of smart and sustainable cities. *Sustainability*, 12(20): 8548. <https://doi.org/10.3390/su12208548>.
225. Zahid, A., Poulsen, J. K., Sharma, R., and Wingreen, S. C. (2021). A systematic review of emerging information technologies for sustainable data-centric health-care. *International Journal of Medical Informatics*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2021.104420>.
226. Zemmar, A., Lozano, A. M., and Nelson, B. J. (2020). The rise of robots in surgical environments during COVID-19. *Nature Machine Intelligence*, 2(10): 566-572. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-00238-2>.
227. Zhang, L., Luo, Y-L., Tao, F., Li, B.-H., Ren, L., and Zhang, X. (2014). Cloud Manufacturing: A New Manufacturing Paradigm. *Enterprise Information Systems*, 8(2): 167-187. <https://doi.org/10.1080/17517575.2012.683812>.
228. Zhang, Y., Ma, S., Yang, H., Lv, J., and Liu, Y. (2018). A big data driven analytical framework for energy-intensive manufacturing industries. *Journal of Cleaner Production*, (197): 57-72. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.170>.
229. Zhang, X., Ming, X., and Yin, D. (2020). Application of industrial big data for smart manufacturing in product-service system based on system engineering using fuzzy DEMATEL. *Journal of Cleaner Production*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121863>.
230. Zhao, W., Luo, X., and Qiu, T. (2017). Smart Healthcare. *Applied Sciences*, 7(11), 1176. <https://doi.org/10.3390/app7111176>.
231. Zhong, R. Y., Xu, C., Chen, C., and G. Q. Huang. (2017). Big Data Analytics for Physical Internet-based Intelligent Manufacturing Shop Floors. *International Journal of Production Research*, 55(9): 2610-2621. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1086037>.
232. Zong, Z., and Guan, Y. (2025). AI-driven intelligent data analytics and predictive analysis in Industry 4.0: Transforming knowledge, innovation, and efficiency. *Journal of the Knowledge Economy*, 16(1): 864-903. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02001-z>.
233. Zonta, T., Da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., Da Trindade, E. S., and Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers and industrial engineering*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>.