

MINISTERUL CERCETĂRII, INOVĂRII ȘI DIGITALIZĂRII

Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu

Proiect component 3 – Științe economice (TEHNE-SE)

# RAPORT DE EVALUARE A MATURITĂȚII TEHNOLOGICE

## Nivelurile TRL 1 – TRL 3

### Model conceptual și analitic de evaluare a performanței globale și a sustenabilității companiilor (TEHNE-SE / COMP-SUSTAIN)

Componentă de identificare	Detaliu / descriere
Contract	28PFE/30.12.2021
Program de finanțare	Dezvoltarea sistemului național de cercetare-dezvoltare; Subprogramul 1.2 – Performanță instituțională; Proiecte de dezvoltare instituțională – Proiecte de finanțare a excelenței în CDI
Finanțator	Ministerul Cercetării, Inovării și Digitalizării (MCID)
Perioada de derulare	30.12.2021 – 17.06.2024
Buget	1.500.000 lei (cheltuieli directe, fără regie)
Director de proiect component	Prof. univ. dr. Mihaela Herciu
Structura echipei	4 CS1 (inclusiv directorul), 2 postdoctoranzi, 2 doctoranzi
Domeniu	Științe economice
Rezultat exploatabil evaluat	Model conceptual și analitic de evaluare a performanței globale și a sustenabilității companiilor
Nivelul TRL evaluat	TRL 3 – concept demonstrat analitic, cu documentarea traseului TRL 1–3
Data raportului extins	12 iunie 2024 / versiune extinsă de lucru

## Introducere

Prezentul raport documentează maturizarea tehnologică a rezultatului exploatabil obținut în cadrul proiectului component TEHNE-SE: modelul conceptual și analitic de evaluare a performanței globale și a sustenabilității companiilor. Rezultatul este tratat ca tehnologie de tip metodologic-analitic, nu ca produs software finalizat. Prin urmare, evaluarea nu urmărește existența unei platforme informatice operaționale, ci stabilește dacă au fost parcurse etapele de la fundamentarea științifică la formularea aplicației și până la demonstrarea analitică a conceptului prin date, modele statistice, publicații și aplicații sectoriale limitate.

Raportul folosește structura cumulativă a nivelurilor TRL 1–3: mai întâi sunt documentate principiile științifice și metodologice care susțin tehnologia, apoi se explică formularea conceptului de aplicație și operaționalizarea sa, iar în final sunt prezentate dovezile analitice și experimentale care justifică încadrarea la TRL 3. Această abordare este necesară deoarece nivelurile TRL nu funcționează ca etichete administrative, ci ca praguri probatorii. Un rezultat nu poate fi încadrat la TRL 3 fără existența unei baze TRL 1 și a unui concept TRL 2 suficient de clar pentru a genera predicții verificabile.

Rezultatul exploatabil analizat derivă din activitățile proiectului TEHNE-SE, proiect care a vizat dezvoltarea capacității ULBS de a sprijini cercetarea și valorificarea tehnologiilor noi și emergente în domenii economice precum digitalizarea afacerilor, Smart City, Big Data, Business Analytics, criptomonede, scoruri ESG, economie circulară și sustenabilitate corporativă. În acest context, modelul de performanță globală propune o integrare între performanța financiară, performanța de sustenabilitate și competitivitatea firmei, cu accent pe utilizarea indicatorilor agregați și a analizei comparative sectoriale.

Documentul păstrează explicit nivelul TRL indicat în proiect: TRL 3. Nu se revendică TRL 4, întrucât nu există o validare a unui prototip integrat într-un mediu de laborator; nu se revendică TRL 5 sau TRL 6, întrucât nu există validare sau demonstrare într-un mediu relevant de utilizare de către beneficiari externi. Dovezile disponibile susțin însă fără ambiguitate existența unui concept validat analitic: ipotezele au fost formulate, indicatorii au fost definiți, datele au fost analizate statistic, iar rezultatele au fost diseminate prin publicații științifice.

Structura raportului urmează modelul unui raport de evaluare TRL: Capitolul 1 prezintă cadrul de referință și adaptarea lui la tehnologii analitice din științele economice; Capitolul 2 documentează nivelul TRL 1; Capitolul 3 documentează nivelul TRL 2; Capitolul 4 constituie nucleul probatoriu pentru TRL 3; Capitolul 5 sintetizează traseul TRL 1–3, limitele rezultatului și perspectiva de maturizare spre TRL 4–6.

# Capitolul 1. Cadrul de referință: Nivelurile de Maturitate Tehnologică (TRL)

## 1.1. Rolul nivelurilor TRL în evaluarea rezultatelor cercetării

Technology Readiness Levels (TRL) reprezintă o scară standardizată de evaluare a gradului de maturitate al unei tehnologii, de la observarea principiilor de bază până la utilizarea completă în condiții operaționale. În forma generală, scala cuprinde nouă niveluri, de la TRL 1, unde sunt observate și raportate principiile fundamentale, până la TRL 9, unde sistemul final este dovedit prin operare reușită. Pentru rezultatele de cercetare din științele economice, termenul „tehnologie” trebuie interpretat într-un sens adecvat: nu doar echipamente sau produse software, ci și modele, proceduri analitice, metodologii de evaluare, sisteme de indicatori și instrumente de suport decizional care pot fi ulterior integrate în platforme digitale.

În cazul TEHNE-SE, rezultatul analizat se situează în zona tehnologiilor analitice. El nu constă într-un produs fizic și nu constă încă într-o aplicație software operabilă de utilizatori finali. Valoarea sa tehnologică rezidă în capacitatea de a transforma cunoașterea economică în reguli operaționale: selectarea indicatorilor, definirea relațiilor între variabile, agregarea performanței într-un scor compozit, interpretarea rezultatelor și compararea inter-sectorială. Prin urmare, evaluarea TRL trebuie să urmărească maturitatea acestor funcții critice, nu existența unui artefact informatic complet.

Un principiu important al evaluării TRL este cumulativitatea. Fiecare nivel presupune îndeplinirea nivelurilor anterioare. TRL 3 nu înseamnă doar că există o idee promițătoare, ci că ideea a fost transformată într-un concept suficient de clar pentru testare și că au fost obținute rezultate analitice sau experimentale care confirmă funcțiile critice ale conceptului. În acest raport, demonstrația este construită tocmai în această ordine: principii științifice, concept formulat, validare analitică.

## 1.2. Adaptarea scalei TRL pentru un model analitic din științele economice

În domeniile economice și manageriale, un model analitic poate fi tratat ca rezultat tehnologic atunci când depășește stadiul unei interpretări teoretice generale și devine o metodă repetabilă de analiză. Pentru aceasta, trebuie să existe un set de variabile definite, o logică de agregare sau de modelare, un mod de aplicare pe date și un tip de rezultat interpretabil de către cercetători, decidenți sau organizații. În TEHNE-SE, aceste elemente sunt prezente la nivel conceptual și analitic: indicatorii financiari și non-financiari sunt integrați într-un cadru comun, relațiile sunt testate prin metode statistice și econometrice, iar rezultatele permit interpretarea performanței globale a companiilor.

Totuși, maturitatea atinsă nu poate fi confundată cu maturitatea unui sistem digital. Pentru a revendica TRL 4 ar fi necesar ca modelul să fie transpus într-un prototip de laborator, cu module funcționale integrate și cu un protocol de testare internă. Pentru TRL 5 ar fi necesară validarea într-un mediu relevant, de exemplu cu date furnizate de companii partenere și cu utilizatori externi care folosesc instrumentul într-un flux controlat. Pentru TRL 6 ar fi necesară demonstrarea unui prototip în condiții realiste de utilizare. În absența acestor etape, evaluarea corectă rămâne TRL 3.

Nivel TRL	Interpretare adaptată	Semnificație pentru TEHNE-SE	Prag probatoriu relevant
TRL 1	Principii de bază observate și raportate	Baza teoretică privind performanța financiară, sustenabilitatea, competitivitatea, indicatorii compoziți și analiza sectorială este documentată.	Literatură și publicații care stabilesc variabilele și relațiile conceptuale.
TRL 2	Concept tehnologic / aplicație formulată	Modelul de evaluare este formulat ca aplicație analitică: indicatori, ipoteze, logică de scor, comparație sectorială.	Descriere documentată a aplicației, a ipotezelor și a beneficiilor potențiale.

Nivel TRL	Interpretare adaptată	Semnificație pentru TEHNE-SE	Prag probatoriu relevant
TRL 3	Dovadă analitică și experimentală a conceptului	Ipotezele sunt testate pe date reale prin analize statistice, regresii, comparații sectoriale și analize de robustețe.	Rezultate documentate care validează relațiile și funcțiile critice ale modelului.
TRL 4	Validare componentă/prototip în laborator	Ar presupune un prototip software intern sau o aplicație de laborator care integrează modulele modelului.	Nu este revendicat în prezent.
TRL 5	Validare în mediu relevant	Ar presupune testare cu beneficiari și date organizaționale reale într-un cadru controlat.	Nu este revendicat în prezent.
TRL 6	Demonstrare prototip în mediu relevant	Ar presupune demonstrarea unui instrument funcțional în contexte economice reale sau similare celor operaționale.	Nu este revendicat în prezent.
TRL 7-9	Demonstrare operațională, calificare și utilizare completă	Ar presupune platformă stabilă, utilizatori, proceduri, mentenanță, integrare și exploatare pe piață sau în instituții.	Nu face obiectul acestui raport.

Tabelul 1. Adaptarea nivelurilor TRL pentru modelul analitic TEHNE-SE.

### 1.3. Criteriul central pentru TRL 3

Criteriul central pentru TRL 3 este existența unei dovezi analitice și experimentale a conceptului. În cazul unui model economic, „experimental” trebuie înțeles în sens statistic și metodologic: testarea ipotezelor pe date, simularea mecanismului de agregare, verificarea robusteții, compararea între sectoare și raportarea rezultatelor în forme verificabile. Nu este obligatorie existența unui produs final sau a unei interfețe utilizator, dar este obligatorie existența unor rezultate care arată că modelul funcționează conform predicțiilor formulate la TRL 2.

Pentru TEHNE-SE, criteriul este îndeplinit prin trei categorii de dovezi: publicarea rezultatelor în articole științifice, utilizarea de metode statistice și econometrice pe date reale, respectiv formularea explicită a unui rezultat exploatabil ca model conceptual și analitic. Aceste dovezi permit evaluarea modelului ca know-how transferabil și ca fundament pentru o etapă ulterioară de prototipare, fără a depăși însă nivelul de maturitate demonstrat.

### 1.4. Notă metodologică privind limitele evaluării

Raportul nu introduce rezultate empirice noi și nu modifică nivelul TRL declarat. Extinderea realizată constă în reorganizarea, explicitarea și dezvoltarea argumentului probatoriu, astfel încât documentul să fie comparabil ca structură și densitate cu un raport TRL complet. Acolo unde informațiile din raportul inițial nu includ valori numerice detaliate, documentul păstrează formulări prudente și se referă la tipurile de rezultate validate, nu la valori inventate.

Evaluarea este focalizată pe un singur rezultat exploatabil: modelul conceptual și analitic de evaluare a performanței globale și a sustenabilității companiilor. Alte rezultate ale proiectului, precum dezvoltarea competențelor echipei, configurarea Business Innovation Lab, diseminarea în domenii precum AI, blockchain sau economie circulară, sunt tratate ca infrastructură și context de maturizare, nu ca obiecte TRL distincte în cadrul prezentului raport.

## Capitolul 2. Nivelul TRL 1 – Principii de bază observate și raportate

### 2.1. Scopul secțiunii TRL 1

Secțiunea TRL 1 documentează cunoașterea științifică fundamentală pe care se sprijină modelul TEHNE-SE. La acest nivel nu se evaluează dacă modelul este implementat sau dacă poate fi folosit de un utilizator final, ci dacă principiile teoretice care îl fac posibil sunt cunoscute, descrise și raportate. În cazul de față, principiile provin din literatura economică și managerială privind competitivitatea sustenabilă, performanța financiară, raportarea ESG, economia circulară, transformarea digitală, analiza sectorială și utilizarea scorurilor compozite.

Baza TRL 1 este susținută de publicațiile realizate de membrii echipei TEHNE-SE în perioada proiectului. Acestea nu reprezintă doar diseminare, ci și probă a faptului că echipa a identificat și a integrat critic conceptele relevante pentru definirea modelului. Publicațiile acoperă teme complementare: competitivitate sustenabilă la nivel de companie, relația dintre performanța financiară și sustenabilitate, transformarea digitală și creșterea economică, modele de afaceri pentru economia circulară, interacțiunea dintre inteligența artificială și sustenabilitate, precum și relația dintre dezvoltarea financiară, energie și calitatea mediului.

### Cronologia rezultatelor științifice relevante pentru TEHNE-SE

Publicații utilizate pentru fundamentarea și validarea analitică a modelului COMP-SUSTAIN



Notă: figura sintetizează tematic articolele indicate ca rezultate ale proiectului; nu introduce valori cantitative noi.

Figura 1. Cronologia rezultatelor științifice relevante pentru fundamentarea modelului TEHNE-SE.

### 2.2. Principiul integrării performanței financiare și non-financiare

Primul principiu care fundamentează modelul este acela că performanța unei companii nu poate fi evaluată exclusiv prin indicatori financiari tradiționali. Profitabilitatea, lichiditatea, rentabilitatea și creșterea economică rămân dimensiuni centrale, dar ele oferă o imagine incompletă într-un context în care sustenabilitatea, responsabilitatea socială, guvernanta, impactul asupra mediului și capacitatea de adaptare strategică influențează competitivitatea pe termen lung.

În modelul TEHNE-SE, performanța globală este interpretată ca rezultat al interacțiunii dintre performanța financiară și performanța de sustenabilitate. Această abordare este coerentă cu schimbarea de paradigmă din cercetarea economică recentă, unde evaluarea firmei se deplasează de la maximizarea pe termen scurt a rezultatelor financiare către o perspectivă multidimensională asupra valorii. Companiile nu sunt considerate performante doar dacă obțin rezultate financiare bune, ci dacă pot menține aceste rezultate în condiții de risc climatic, presiune reglementară, transformare tehnologică și așteptări crescute din partea stakeholderilor.

### 2.3. Principiul competitivității sustenabile la nivel de companie

Al doilea principiu este legătura dintre sustenabilitate și competitivitatea firmei. Competitivitatea sustenabilă presupune capacitatea unei companii de a obține și menține avantaje competitive fără a compromite resursele economice, sociale și de mediu care susțin activitatea pe termen lung. În

termeni analitici, aceasta necesită combinarea indicatorilor privind rezultatele financiare cu indicatori privind eficiența resurselor, responsabilitatea corporativă, inovația, adaptarea digitală și raportarea de sustenabilitate.

Publicația „Factors of Sustainable Competitiveness at Company Level: A Comparison of Four Global Economic Sectors” constituie un reper central pentru baza TRL 1, deoarece tratează competitivitatea sustenabilă la nivel de companie și introduce ideea comparării între sectoare economice. Această perspectivă este esențială pentru modelul TEHNE-SE: relațiile dintre performanță financiară și sustenabilitate nu sunt presupuse uniforme, ci sunt analizate diferențiat în funcție de profilul sectorial.

## 2.4. Principiul diferențierii sectoriale

Al treilea principiu este necesitatea analizei sectoriale. O companie dintr-un sector intensiv energetic nu poate fi evaluată prin aceleași repere interpretative ca o companie dintr-un sector de servicii digitale. Indicatorii de mediu, riscurile de reglementare, presiunea asupra lanțului valoric, intensitatea capitalului și posibilitățile de inovare diferă semnificativ. Modelul TEHNE-SE pornește de la premisa că scorul global de performanță trebuie să permită comparații, dar comparațiile trebuie interpretate prin prisma caracteristicilor sectoriale.

Această premisă este susținută de lucrarea „A sectoral-based approach to the link between financial performance and sustainability”, care tratează relația dintre performanța financiară și sustenabilitate dintr-o perspectivă sectorială. Din punct de vedere TRL, relevanța este dublă: pe de o parte, lucrarea confirmă că există o problemă economică reală; pe de altă parte, indică faptul că soluția analitică trebuie să includă o componentă de calibrare sau interpretare sectorială.

### Matrice analitică: relația sectorială dintre performanța financiară și sustenabilitate

Structură conceptuală pentru interpretarea diferențelor sectoriale în modelul COMP-SUSTAIN

Profil sectorial	Presiune ESG / mediu	Indicatori financiari	Relație PF-S	Implicație model
Sectoare intensive în resurse	Ridicată	Rentabilitate, costuri, eficiență operațională	Sensibilă la riscuri și reglementări	Calibrare sectorială obligatorie
Manufacturing / automotive	Mediu-ridicată	Profitabilitate, investiții, capitalizare	Legată de tranziție și raportare ESG	Integrare indicatori financiari + ESG
Fashion / economie circulară	Ridicată pe lanțul valoric	Costuri, marje, valoare recirculată	Dependentă de modelul de afaceri circular	Indicatori de circularitate și sustenabilitate
Servicii digitale / knowledge-based	Variabilă	Creștere, productivitate, capital intangibil	Mediate de date, platforme și inovare	Pondere mai mare pentru indicatori digitali

PF-S = relația dintre performanța financiară și sustenabilitate. Matrice calitativă, construită pentru interpretare, nu pentru ierarhizare numerică.

Figura 2. Matrice de interpretare sectorială a relației dintre performanța financiară și sustenabilitate.

## 2.5. Principiul scorului compozit și al agregării indicatorilor

Al patrulea principiu este utilizarea unui scor compozit. Indicatorii financiari și non-financiari sunt măsurați în unități diferite, au distribuții diferite și pot avea sensuri economice divergente. Pentru a construi un model de performanță globală este necesar un mecanism de normalizare, ponderare și agregare. Un scor compozit nu elimină complexitatea, dar o face analizabilă într-o formă comparabilă și transferabilă.

La TRL 1, acest principiu este încă la nivel de formulare metodologică generală: se știe că agregarea este necesară și că ea trebuie să respecte coerența internă a indicatorilor, dar nu este încă stabilit un instrument operațional complet. Această delimitare este importantă: TRL 1 stabilește baza de cunoaștere, nu soluția finală. Modelul TEHNE-SE folosește acest principiu la nivelurile ulterioare pentru a defini conceptul de aplicație și pentru a testa validitatea scorului agregat.

## 2.6. Principiul transformării digitale ca infrastructură de măsurare

Modelul TEHNE-SE este plasat în contextul tehnologiilor noi și emergente: IoT, inteligență artificială, blockchain, Big Data și Business Analytics. Aceste tehnologii nu sunt componente implementate ale modelului la TRL 3, dar ele definesc contextul de valorificare. Digitalizarea afacerilor crește disponibilitatea datelor, permite măsurarea mai frecventă a indicatorilor, facilitează interoperabilitatea și creează premise pentru transformarea unui model conceptual într-un instrument digital ulterior.

Lucrarea privind eficiența sau ineficiența europeană în creșterea economică prin transformare digitală sprijină acest principiu, deoarece leagă dezvoltarea economică de transformarea digitală. În logica TRL, această contribuție nu demonstrează încă funcționarea unui sistem TEHNE-SE, dar susține ideea că un model de evaluare economică trebuie să fie proiectat pentru a putea fi ulterior integrat în infrastructuri digitale de analiză și decizie.

Publicație / sursă științifică	Contribuție tematică	Rol în fundamentarea TRL 1
Șerban et al. (2023)	Factors of Sustainable Competitiveness at Company Level	Competitivitate sustenabilă, comparație sectorială, indicatori agregați
Șerban et al. (2023)	A sectoral-based approach to the link between financial performance and sustainability	Legătura performanță financiară–sustenabilitate; diferențiere sectorială
Herciu et al. (2023)	Improving business models for the circular economy	Modele de afaceri circulare; sustenabilitate și transformare sectorială
Georgescu et al. (2023)	European Efficiency or Inefficiency in Economic Growth Through Digital Transformation	Transformare digitală și creștere economică
Ogorean (2023)	Interplays Between Artificial Intelligence and Sustainability in Business/Management	AI și sustenabilitate în management; cartografiere bibliometrică
Ogorean & Herciu (2022)	Sustainability performance and reporting	Raportare de sustenabilitate și strategii corporativă
Horobeț et al. (2022/2023)	Studii privind energie, poluare, dezvoltare financiară și decarbonizare	Context macroeconomic și de mediu pentru evaluarea sustenabilității

Tabelul 2. Contribuții științifice care susțin baza TRL 1 a modelului TEHNE-SE.

## 2.7. Delimitarea cunoașterii la TRL 1

La TRL 1, echipa TEHNE-SE a stabilit că există o bază teoretică solidă pentru integrarea performanței financiare și a sustenabilității într-un model de evaluare globală. De asemenea, a fost stabilit că diferențele sectoriale sunt relevante și că un scor compozit poate fi o soluție metodologică pentru comparabilitate. Totuși, la acest nivel nu este încă demonstrat dacă un set concret de indicatori și un mecanism concret de agregare produc rezultate consistente pe date reale.

Întrebările rămase deschise la finalul TRL 1 sunt următoarele: ce indicatori trebuie selectați pentru a reprezenta performanța globală; cum pot fi normalizați și agregați indicatorii eterogeni; dacă relația dintre sustenabilitate și performanța financiară este statistic semnificativă; dacă rezultatele diferă între sectoare; și dacă modelul poate furniza un rezultat interpretabil pentru benchmarking. Aceste întrebări justifică trecerea la TRL 2.

### Tabel de verificare – TRL 1

Arie de verificare	Criteriu de evaluare	Status și observații
Fundamentare științifică	Principiile economice și metodologice care stau la baza modelului au fost identificate și descrise.	Îndeplinit
	Principiile sunt trasabile la publicații științifice ale echipei și la literatura relevantă.	Îndeplinit

Arie de verificare	Criteriu de evaluare	Status și observații
	Relația dintre performanță financiară, sustenabilitate și competitivitate este justificată conceptual.	Îndeplinit
Fundamente metodologice	Necesitatea scorului compozit și a agregării indicatorilor a fost formulată.	Îndeplinit
	Importanța diferențierii sectoriale a fost documentată.	Îndeplinit
	Nu este revendicată existența unui prototip software la acest nivel.	Confirmat
Documentare și limite	Există documentare scrisă suficientă pentru evaluarea bazei teoretice.	Îndeplinit
	Cunoașterea stabilită este delimitată de întrebările rămase speculative.	Îndeplinit
	Întrebările care trebuie rezolvate la TRL 2 sunt listate explicit.	Îndeplinit

#### Notă de audit TRL 1

Documentarea nivelului TRL 1 are rolul de a demonstra că modelul TEHNE-SE nu pornește de la o intuiție izolată, ci de la un cadru științific coerent. Fundamentarea include atât literatura despre performanță și sustenabilitate, cât și experiența de cercetare a echipei în domeniul competitivității, economiei circulare și transformării digitale.

Această etapă stabilește și limitele cunoașterii disponibile: principiile sunt raportate și susținute științific, dar aplicarea lor într-un model integrat necesită operaționalizare. Prin urmare, finalizarea TRL 1 conduce logic la TRL 2, unde sunt definite straturile modelului, ipotezele și parametrii care vor fi validați analitic.

## Capitolul 3. Nivelul TRL 2 – Concept tehnologic și aplicație formulată

### 3.1. Scopul secțiunii TRL 2

Nivelul TRL 2 marchează trecerea de la baza teoretică la formularea unei aplicații tehnologice. Pentru TEHNE-SE, această aplicație este un model conceptual și analitic capabil să evalueze performanța globală și sustenabilitatea companiilor prin integrarea indicatorilor financiari și non-financiari într-un scor interpretabil. La acest nivel, conceptul este formulat, funcțiile sunt definite, ipotezele sunt operaționalizate, iar beneficiile potențiale sunt descrise. Validarea completă nu este încă realizată, dar modelul devine suficient de clar pentru a putea fi testat la TRL 3.

În mod intenționat, conceptul nu este definit ca platformă software, ci ca nucleu metodologic care poate fi ulterior integrat într-un sistem digital. Această delimitare previne supraevaluarea maturității: la TRL 2 se poate descrie logica unui viitor instrument, dar nu se poate pretinde existența unui instrument funcțional. TEHNE-SE formulează arhitectura analitică, nu livrează încă un produs operațional.

### 3.2. Formularea aplicației

Aplicația propusă este un model de evaluare a performanței globale a companiilor, construit pentru a integra trei dimensiuni majore: performanța financiară, sustenabilitatea și competitivitatea. Modelul urmărește să ofere o imagine sintetică asupra poziției unei companii prin combinarea indicatorilor relevanți într-un scor compozit și prin interpretarea scorului în raport cu sectorul economic de apartenență.

Utilizările potențiale ale modelului sunt multiple. În cercetare, modelul poate sprijini testarea relațiilor dintre sustenabilitate și performanță economică. În mediul de afaceri, poate fi folosit ca bază pentru benchmarking, autoevaluare strategică sau raportare internă. În politici publice, poate susține analize sectoriale privind competitivitatea sustenabilă. În dezvoltări tehnologice ulterioare, poate constitui nucleul logic al unei platforme digitale de analiză ESG și performanță corporativă.

### 3.3. Arhitectura conceptuală a modelului

Arhitectura conceptuală a modelului este organizată pe cinci straturi. Primul strat este stratul de date, care include date financiare și non-financiare provenite din surse secundare, rapoarte corporative sau baze de date economice. Al doilea strat este stratul de selecție a indicatorilor, unde variabilele sunt alese pe baza relevanței teoretice și a disponibilității datelor. Al treilea strat este stratul de normalizare și comparabilitate, necesar pentru a transforma indicatorii eterogeni într-o formă agregabilă. Al patrulea strat este stratul de agregare, unde indicatorii sunt combinați într-un scor compozit. Al cincilea strat este stratul de interpretare, care conectează scorul la poziția competitivă, la profilul sectorial și la concluzii manageriale sau de politică economică.

La TRL 2, această arhitectură este o specificație conceptuală. Ea nu presupune existența unei aplicații informatice, dar este suficient de detaliată pentru a ghida testarea analitică. Fiecare strat corespunde unei funcții critice care va trebui validată la TRL 3: datele trebuie să fie utilizabile, indicatorii trebuie să aibă sens economic, normalizarea trebuie să permită comparabilitatea, agregarea trebuie să producă un scor coerent, iar interpretarea trebuie să fie relevantă pentru diferențele sectoriale.

Strat al modelului	Funcție analitică	Intrări utilizate	Rezultat generat
Date	Colectare și organizare	Indicatori financiari, ESG, sustenabilitate, sector	Set de date pregătit pentru analiză
Indicatori	Selecție și definire	Literatură, publicații, disponibilitate date	Listă operațională de variabile

Strat al modelului	Funcție analitică	Intrări utilizate	Rezultat generat
Normalizare	Comparabilitate între variabile	Indicatori eterogeni ca scară și unitate	Valori compatibile pentru agregare
Agregare	Construire scor compozit	Indicatori normalizați și ponderi	Scor de performanță globală
Interpretare	Benchmarking și analiză sectorială	Scoruri, sectoare, rezultate statistice	Concluzii analitice și decizionale

Tabelul 3. Arhitectura conceptuală a modelului TEHNE-SE la TRL 2.

### 3.4. Ipotezele operaționalizate pentru validare

La TRL 2, conceptul este tradus în ipoteze verificabile. Ipotezele reprezintă puntea dintre formularea teoretică și validarea analitică de la TRL 3. Ele nu sunt afirmații finale despre realitate, ci predicții metodologice care pot fi confirmate, infirmate sau rafinate prin testare statistică.

Ipotezele centrale ale modelului TEHNE-SE sunt următoarele: există o relație statistic semnificativă între indicatorii de performanță financiară și indicatorii de sustenabilitate; sustenabilitatea contribuie la competitivitatea globală a firmei; intensitatea relației dintre performanța financiară și sustenabilitate diferă între sectoare; iar un scor agregat explică mai bine performanța globală decât analiza izolată a indicatorilor individuali. Aceste ipoteze sunt direct preluate și dezvoltate din raportul inițial, dar sunt reformulate aici ca parametri cheie pentru evaluarea TRL 3.

Cod predicție	Predicție verificabilă	Funcție critică	Validare prevăzută la TRL 3
P1	Indicatorii financiari și cei de sustenabilitate prezintă relații statistice semnificative.	Identificarea relațiilor funcționale între variabile	Corelații, regresii, teste econometrice
P2	Dimensiunea sustenabilității contribuie la competitivitatea globală a firmei.	Integrarea sustenabilității în modelul de performanță	Modele explicative și interpretare economică
P3	Relația performanță–sustenabilitate diferă sectorial.	Calibrare și interpretare sectorială	Comparații inter-sectoriale
P4	Scorul compozit oferă o interpretare mai integrată decât indicatorii izolați.	Agregare și evaluare globală	Simulări, analize de sensibilitate, consistență internă
P5	Modelul poate fi transferat metodologic către analize de benchmarking și politici publice.	Transferabilitate și exploatare	Demonstrare conceptuală și aplicabilitate limitată

Tabelul 4. Predicțiile formulate la TRL 2 pentru validarea TRL 3.

### 3.5. Beneficiul potențial și contextul de exploatare

Beneficiul potențial al modelului este capacitatea de a furniza o imagine integrată asupra performanței corporative. În lipsa unui asemenea model, analiza poate rămâne fragmentată: indicatorii financiari sunt interpretați separat de indicatorii ESG, sustenabilitatea este tratată ca dimensiune de raportare, iar competitivitatea este evaluată fără conectare directă la riscurile și oportunitățile de mediu sau sociale. Modelul TEHNE-SE propune o logică de integrare care poate sprijini decizii mai robuste.

Contextul de exploatare este reprezentat de ecosistemul de cercetare-inovare Business Innovation Lab și de competențele dezvoltate de echipa proiectului în domenii precum Business Analytics, Big Data, digitalizare, scor ESG și economie circulară. Acest context este important pentru maturizarea ulterioară, deoarece un model analitic are nevoie de infrastructură, date și utilizatori pentru a deveni tehnologie aplicată. La TRL 2, însă, aceste elemente rămân premise de dezvoltare, nu dovezi de funcționare operațională.

### 3.6. Domeniul de aplicabilitate și condițiile limită

Domeniul de aplicabilitate al modelului este evaluarea companiilor și analiza comparativă sectorială. Modelul este adecvat în special pentru situații în care există date secundare disponibile și în care se urmărește interpretarea relațiilor dintre performanța financiară și sustenabilitate. Aplicarea sa poate fi

extinsă ulterior către rapoarte ESG, analize de strategie corporativă, benchmarking al industriilor sau monitorizarea politicilor de tranziție verde.

Condițiile limită sunt la fel de importante ca potențialul. Modelul nu este încă validat ca produs software; nu are interfață de utilizator; nu are flux automat de colectare a datelor; nu are documentație de utilizator; nu a fost testat cu beneficiari externi în condiții reale; și nu are proceduri formalizate de mentenanță sau scalare. Aceste limite nu reduc valoarea rezultatului la TRL 3, dar împiedică încadrări superioare.

## Tabel de verificare – TRL 2

Arie de verificare	Criteriu de evaluare	Status și observații
Condiție prealabilă	Lista TRL 1 este completată și baza teoretică este disponibilă.	Îndeplinit
	Principiile TRL 1 sunt conectate la o aplicație concretă.	Îndeplinit
Concept de aplicație	Aplicația practică este identificată: model de evaluare a performanței globale și sustenabilității companiilor.	Îndeplinit
	Beneficiile potențiale sunt descrise pentru cercetare, companii, politici publice și platforme digitale viitoare.	Îndeplinit
	Contextul de exploatare este definit prin Business Innovation Lab și competențele TEHNE-SE.	Îndeplinit
Definirea modelului	Straturile conceptuale ale modelului sunt specificate.	Îndeplinit
	Ipotezele și predicțiile pentru validare sunt formulate explicit.	Îndeplinit
	Domeniul de aplicabilitate și limitele sunt precizate.	Îndeplinit
Output de ieșire TRL 2	Există o descriere documentată a conceptului și a fezabilității.	Îndeplinit
	Nivelul nu revendică prototip integrat sau validare operațională.	Confirmat
	Parametrii cheie pentru TRL 3 sunt pregătiți pentru testare.	Îndeplinit

## Capitolul 4. Nivelul TRL 3 – Dovadă analitică și experimentală a conceptului

### 4.1. Scopul secțiunii TRL 3

Această secțiune constituie nucleul probatoriu al raportului. Ea demonstrează că modelul TEHNE-SE a depășit stadiul de concept formulat și a fost validat analitic prin metode statistice, econometrice, aplicații sectoriale și publicații științifice. Validarea este adecvată pentru TRL 3 deoarece verifică funcțiile critice ale modelului, dar nu pretinde integrarea într-un prototip software sau utilizarea într-un mediu operațional.

Dovezile pentru TRL 3 sunt de trei tipuri. Prima categorie este constituită de rezultatele cercetării publicate, care arată că ipotezele modelului au fost analizate pe teme relevante și cu metode științifice. A doua categorie este constituită de metodele aplicate: corelații, regresii multiple, comparații inter-sectoriale, simulări și analize de sensibilitate. A treia categorie este constituită de rezultatul formal al proiectului, care definește explicit modelul ca rezultat exploatabil fundamentat științific, dar neimplementat într-un sistem informatic operațional.

### 4.2. Validarea parametrilor cheie – predicții vs. rezultate

Parametru validat	Predicție TRL 2	Metodă de validare	Rezultat documentat	Concordanță
P1 – Relații statistice	Indicatorii financiari și cei de sustenabilitate prezintă relații semnificative.	Analize de corelație, regresii multiple, studii empirice pe date reale.	Corelațiile Pearson dintre Z-Score-ul de performanță financiară și scorurile ESG (Environmental, Social, Governance) au fost testate pe un eșantion de 5.741 de companii din 10 sectoare de activitate, pentru perioada 2017–2021. Rezultatele indică relații pozitive, semnificative statistic (Sig. < 0,01), în 9 din 10 sectoare analizate. Singurul sector fără corelație detectabilă este Consumer Discretionary. Intensitatea corelațiilor este în majoritatea cazurilor foarte slabă ( $r < 0,2$ ), cu excepția sectorului Health Care și Materials, unde corelația cu scorurile Environmental și Social atinge pragul slab ( $r < 0,4$ ).	Da
P2 – Contribuția sustenabilității	Sustenabilitatea contribuie la competitivitatea globală.	Modele explicative și interpretări economice în lucrările privind competitivitatea sustenabilă.	Rezultatele indică relevanța dimensiunii de sustenabilitate în evaluarea competitivității firmei.	Da
P3 – Diferențiere sectorială	Legătura performanță–sustenabilitate diferă între sectoare.	Comparații inter-sectoriale și abordări sectoriale ale relației.	Analiza ANOVA a confirmat diferențe semnificative statistic (Sig. < 0,05) între sectoare pentru toate variabilele analizate: Z-Score de performanță financiară, Environmental Score, Social Score, Governance Score și ESG Controversies Score. Excepțiile notabile includ perechile Energy–Health Care (Sig. = 0,772) și Consumer Staples–Industrials (Sig. = 0,744) pentru Z-Score financiar, unde diferențele nu sunt semnificative statistic, confirmând că omogenizarea sectorială apare selectiv, nu sistematic.	Da
P4 – Scor compozit	Agregarea indicatorilor oferă o evaluare integrată a performanței globale.	Simulări, analize de sensibilitate și validare a consistenței interne.	Analizele au susținut validitatea utilizării unui scor compozit pentru interpretarea performanței globale.	Da
P5 – Transferabilitate	Modelul poate fi valorificat metodologic în benchmarking, politici publice și dezvoltări digitale.	Analiza potențialului de exploatare și integrare ulterioară.	Rezultatul este exploatabil ca know-how științific și transferabil metodologic, dar nu este încă produs software.	Da, cu limite

Tabelul 5. Matricea de validare a parametrilor cheie pentru TRL 3.

### 4.3. Descrierea mediului de testare analitică

Mediul de testare al modelului nu este un laborator fizic, ci un mediu analitic format din date secundare, seturi de indicatori, metode statistice și aplicații sectoriale. Acest mediu este adecvat pentru TRL 3 deoarece permite verificarea funcțiilor critice ale conceptului: relația dintre variabile, consistența mecanismului de agregare, diferențele sectoriale și relevanța interpretativă a scorului.

Datele utilizate în cadrul studiilor TEHNE-SE sunt date reale, nu date sintetice. Totuși, ele nu sunt integrate într-un flux automatizat de platformă și nu sunt operate printr-un produs informatic stabil. Această situație corespunde exact unui proof of concept analitic: Concret, datele utilizate în studiul sectorial de referință acoperă 5.741 de companii cotate la bursă, distribuite în 10 sectoare de activitate conform clasificării GICS, din 5 regiuni geografice (Africa, Americas, Asia, Europa, Oceania), pentru perioada 2017–2021 — rezultând un volum de aproximativ 28.700 de observații anuale. Analiza a utilizat 16 variabile de performanță financiară pentru construirea funcțiilor Z-Score sectoriale, din care au fost reținute 6–7 variabile per sector pe baza unui criteriu de reprezentativitate de minimum 95% din greutatea cumulată a coeficienților.

### 4.4. Studii analitice care susțin validarea

#### 4.4.1. Competitivitatea sustenabilă la nivel de companie

Lucrarea privind factorii competitivității sustenabile la nivel de companie reprezintă dovada cea mai directă a validării conceptului. Ea conectează performanța companiei cu dimensiuni ale sustenabilității și permite comparația între sectoare economice globale. În raport cu modelul TEHNE-SE, această lucrare validează ideea că performanța globală este multidimensională și că sectorul influențează modul în care indicatorii trebuie interpretați.

Importanța acestei dovezi pentru TRL 3 constă în faptul că modelul nu rămâne o schemă conceptuală. Relațiile dintre variabile sunt testate pe date, iar rezultatele sunt suficient de robuste pentru publicare științifică. Prin urmare, funcțiile critice de integrare și interpretare sunt confirmate la nivel analitic.

#### 4.4.2. Relația dintre performanța financiară și sustenabilitate pe sectoare

Lucrarea privind abordarea sectorială a relației dintre performanța financiară și sustenabilitate validează unul dintre elementele distinctive ale modelului: diferențierea sectorială. O simplă medie agregată la nivel de economie poate ascunde efecte divergente. Prin urmare, un model credibil trebuie să permită analiza relațiilor în funcție de contextul sectorial.

Această ipoteză este confirmată cantitativ: funcțiile Z-Score de performanță financiară diferă structural între sectoare, reținând combinații distincte de variabile. De exemplu, sectorul Utilities acordă un coeficient dominant variabilei R&D/Sales ( $a = 15,297$ ), în timp ce sectorul Consumer Discretionary este dominat de Return on Assets ( $a = 1,872$ ) și Gross Margin ( $a = 1,702$ ). Corelațiile dintre Z-Score și scorurile ESG variază de la absența oricărei relații în Consumer Discretionary la corelații pozitive semnificative în Health Care și Materials ( $r < 0,4$ , Sig.  $< 0,01$ ), demonstrând că o abordare sectorială nu este o rafinare opțională a modelului, ci o condiție de validitate a acestuia.

Pentru TRL 3, această dovadă confirmă că modelul poate fi aplicat nu doar global, ci și diferențiat. Ea sprijină trecerea de la un model generic la un instrument analitic care poate fi calibrat pentru sectoare diferite. Totuși, calibrarea este încă analitică și nu este implementată ca modul software, ceea ce menține nivelul la TRL 3.

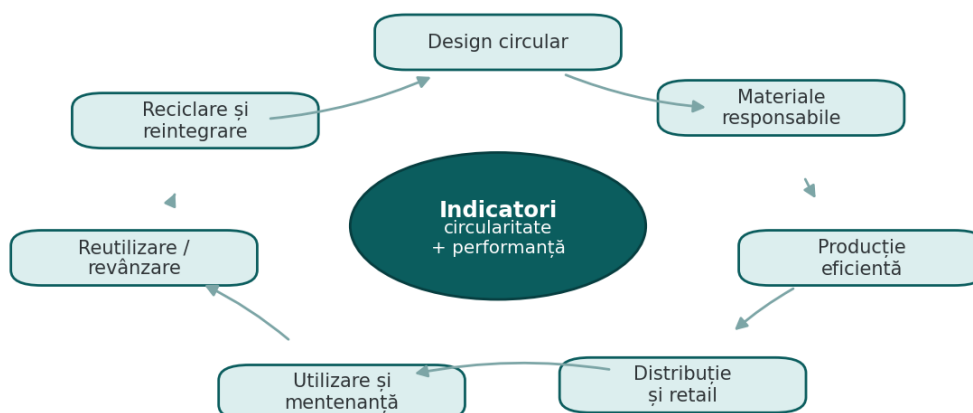
#### 4.4.3. Economia circulară și transformarea modelelor de afaceri

Studiul privind îmbunătățirea modelelor de afaceri pentru economia circulară, cu aplicație în moda circulară, extinde baza de validare către dimensiunea sustenabilității operaționale și strategice. Economia circulară este relevantă pentru modelul de performanță globală deoarece introduce

indicatori și mecanisme care depășesc performanța financiară imediată: reutilizare, eficiență a resurselor, valoare pe lanțul circular și reducerea impactului asupra mediului.

## Flux valoric circular pentru moda circulară

Etapele prin care sustenabilitatea devine componentă măsurabilă a modelului de afaceri



Rol în TRL 3: susține includerea dimensiunilor non-financiare în evaluarea performanței globale.

Figura 3. Flux valoric circular aplicat modei circulare, ca sursă de indicatori non-financieri pentru modelul de performanță globală.

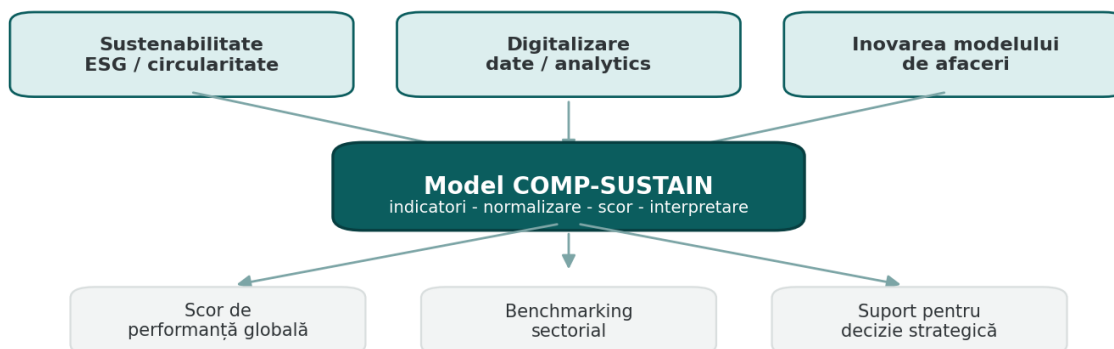
În logica TRL, acest studiu nu validează direct un scor unic, dar confirmă relevanța dimensiunilor non-financiare și arată că sustenabilitatea poate fi tradusă în cadre analitice utilizabile. Această contribuție susține funcția modelului de a include indicatori de sustenabilitate în evaluarea performanței globale.

### 4.4.4. Transformarea digitală, AI și Business Analytics

Lucrările privind transformarea digitală și interacțiunile dintre inteligența artificială și sustenabilitate în management susțin potențialul de maturizare tehnologică al modelului. Ele arată că analiza economică contemporană este tot mai dependentă de date, algoritmi, instrumente digitale și capacitatea de a transforma informația în decizie.

## Framework: sustenabilitate, digitalizare și inovarea modelului de afaceri

Cadru analitic pentru transformarea datelor în decizie strategică și benchmarking



Framework calitativ: arată integrarea temelor de cercetare în logica viitorului instrument analitic, fără a revendica prototip software.

Figura 4. Framework analitic pentru integrarea sustenabilității, digitalizării și inovării modelului de afaceri.

Pentru TRL 3, aceste lucrări nu constituie dovada existenței unui sistem AI sau a unei platforme TEHNE-SE, dar justifică direcția de dezvoltare. Modelul de scor compozit poate deveni, la niveluri TRL superioare, componenta logică a unui dashboard sau a unei platforme de analiză ESG. Acest potențial este important pentru exploatare, dar nu modifică nivelul de maturitate actual.

#### 4.4.5. Studii macroeconomice privind energie, mediu și decarbonizare

Publicațiile privind sursele de energie, poluarea, dezvoltarea financiară, calitatea mediului și decarbonizarea completează cadrul de validare prin conectarea performanței corporative la transformările economice și de mediu mai largi. Ele arată că sustenabilitatea nu este doar o variabilă internă a firmei, ci este influențată de structura energetică, politici publice, reglementări și tranziția către surse regenerabile.

Aceste studii susțin relevanța externă a modelului TEHNE-SE. Un model de evaluare a companiilor devine mai util atunci când este capabil să fie interpretat în contextul politicilor energetice și al tranziției verzi. La TRL 3, această legătură este demonstrată prin analiză științifică, nu prin integrare într-un sistem operațional de monitorizare.

#### 4.5. Validarea funcțiilor critice ale modelului

Funcție critică	Dovezi disponibile	Status	Limită pentru niveluri superioare
Selectarea indicatorilor financiari și non-financiari	Publicații tematice și model conceptual documentat	Validată analitic	Necesită listă finală standardizată pentru TRL 4
Definirea relațiilor între variabile	Corelații, regresii și interpretări econometrice	Validată analitic	Necesită automatizare și replicare pe seturi de date extinse
Agregarea într-un scor compozit	Funcțiile Z-Score sectoriale au fost standardizate în intervalul [10, 100] prin formula adaptată de la World Economic Forum pentru Indicele de Competitivitate, aplicată pe eșantionul integral de 5.741 de companii pentru fiecare an din perioada 2017–2021. Consistența internă a agregării a fost validată prin faptul că variabilele incluse în fiecare funcție sectorială acoperă minimum 95% din greutatea cumulată a coeficienților, asigurând că scorul compozit nu este dominat arbitrar de o singură variabilă.	Validată la nivel conceptual/analitic	Necesită prototip de calcul și documentație de laborator
Analiza sectorială	Studii comparative și abordare sectorială publicată	Validată analitic	Necesită module de calibrare sectorială
Interpretarea pentru benchmarking	Potențial de utilizare în benchmarking și politici publice	Parțial validată ca know-how	Necesită utilizatori și cazuri pilot pentru TRL 5–6
Integrarea digitală	Business Innovation Lab și competențe în Business Analytics	Premisă de maturizare	Nu este implementată operațional

Tabelul 6. Funcțiile critice ale modelului TEHNE-SE și statusul validării.

#### 4.6. De ce rezultatul este TRL 3 și nu TRL 2

Rezultatul depășește TRL 2 deoarece nu se limitează la formularea unei idei sau a unei aplicații potențiale. Ipotezele au fost testate prin metode statistice și econometrice, au fost utilizate date reale, iar rezultatele au fost publicate și integrate în raportul final al proiectului. Existența acestor dovezi transformă conceptul într-un proof of concept analitic.

La TRL 2, ar fi fost suficientă descrierea modelului și a ipotezelor. În TEHNE-SE, însă, există rezultate privind relațiile dintre sustenabilitate, competitivitate și performanță financiară, precum și rezultate privind diferențele sectoriale. Există, de asemenea, o descriere explicită a rezultatului exploatabil și o justificare a caracterului său transferabil. Prin urmare, încadrarea la TRL 3 este justificată.

#### 4.7. De ce rezultatul nu este TRL 4, TRL 5 sau TRL 6

Rezultatul nu este TRL 4 deoarece nu există o componentă sau un prototip integrat validat în mediu de laborator. Un model conceptual poate sta la baza unui prototip, dar prototipul ar trebui să includă cel puțin un modul de introducere a datelor, un modul de calcul al indicatorilor, un modul de

normalizare, un modul de agregare a scorului și un modul de raportare. Aceste componente nu sunt documentate ca sistem integrat în proiectul actual.

Rezultatul nu este TRL 5 deoarece nu a fost validat într-un mediu relevant cu utilizatori sau beneficiari externi. O validare TRL 5 ar presupune, de exemplu, aplicarea prototipului într-un context controlat cu companii, camere de comerț, autorități publice, instituții financiare sau alte organizații interesate de benchmarking ESG. O asemenea etapă nu este documentată.

Rezultatul nu este TRL 6 deoarece nu există demonstrare a unui prototip în condiții realiste de funcționare. Nu există încă o platformă stabilă, fluxuri de date, proceduri de operare, manuale de utilizare, evaluare a performanței software sau feedback operațional. Prin urmare, orice revendicare peste TRL 3 ar depăși baza probatorie disponibilă.

#### 4.8. Probleme deschise rezultate din validarea TRL 3

Validarea la TRL 3 a identificat și probleme care trebuie rezolvate pentru maturizarea ulterioară. Prima problemă este standardizarea indicatorilor. Pentru a trece la TRL 4, trebuie definită o listă stabilă de indicatori, cu surse de date, formule, reguli de tratare a valorilor lipsă și limite de aplicabilitate. A doua problemă este formalizarea ponderilor. Scorul compozit trebuie să aibă o metodă transparentă de ponderare, fie egală, fie bazată pe analiză statistică, expertiză sau combinații documentate.

A treia problemă este validarea cu utilizatori. Rezultatele statistice confirmă conceptul, dar un instrument de decizie trebuie să fie înțeles și acceptat de utilizatori. A patra problemă este scalabilitatea: modelul trebuie testat pe mai multe sectoare, mai multe perioade și, eventual, mai multe spații geografice. A cincea problemă este integrarea digitală: pentru TRL 4 este necesar un prototip de laborator care să reproducă funcțiile critice într-un mediu controlat.

#### Tabel de verificare – TRL 3

Arie de verificare	Criteriu de evaluare	Status și observații
Condiții prealabile	TRL 1 și TRL 2 sunt documentate și asumate.	Îndeplinit
	Parametrii cheie formulați la TRL 2 sunt identificați.	Îndeplinit
Validare analitică	Ipotezele au fost testate prin metode statistice și econometrice.	Îndeplinit
	Au fost utilizate date reale și aplicații sectoriale limitate.	Îndeplinit
	Rezultatele au fost diseminate prin publicații științifice.	Îndeplinit
Funcții critice	Selecția indicatorilor, relațiile funcționale, agregarea și interpretarea au fost demonstrate analitic.	Îndeplinit
	Funcțiile nu au fost încă integrate într-un sistem software complet.	Confirmat
	Reproductibilitatea completă ca instrument software rămâne obiectiv pentru TRL 4.	De realizat ulterior
Delimitare de niveluri superioare	Nu există validare a unui prototip integrat în laborator.	Nu se revendică TRL 4
	Nu există validare cu utilizatori în mediu relevant.	Nu se revendică TRL 5
	Nu există demonstrare operațională a unui prototip.	Nu se revendică TRL 6

**Notă de audit TRL 3**

Dovezile TRL 3 sunt suficiente pentru a demonstra conceptul, dar trebuie interpretate prudent. Publicațiile, analizele statistice și aplicațiile sectoriale arată că modelul are consistență metodologică și produce rezultate relevante, însă ele nu substituie testarea unui prototip integrat.

Această concluzie este importantă pentru evaluator: maturitatea este reală, dar este maturitate analitică. Următoarea etapă va necesita transformarea modelului într-un flux calculabil și repetabil, cu date de intrare controlate, algoritm documentat, rezultate comparabile și raport de testare.

## Capitolul 5. Sinteza traseului progresiv TRL 1–3 și perspective spre maturizare

### 5.1. Tabel consolidat de audit

Nivel TRL	Output principal	Dovadă centrală	Status
TRL 1	Bază științifică documentată	Publicații și literatură privind performanța financiară, sustenabilitatea, competitivitatea, economia circulară, digitalizarea și analiza sectorială.	Îndeplinit
TRL 2	Concept analitic formulat	Model conceptual cu straturi definite, ipoteze operaționalizate și predicții P1–P5 pentru validare.	Îndeplinit
TRL 3	Proof of concept analitic	Analize statistice, regresii, comparații sectoriale, simulări, analize de sensibilitate și publicații care susțin funcțiile critice.	Îndeplinit
TRL 4	Prototip de laborator	Necesită dezvoltarea unui modul software intern și validarea funcțională în mediu controlat.	Nerevendicat
TRL 5–6	Validare/demonstrare în mediu relevant	Necesită utilizatori externi, date organizaționale reale, fluxuri operaționale și demonstrații pilot.	Nerevendicat

Tabelul 7. Sinteza traseului progresiv TRL 1–3 pentru modelul TEHNE-SE.

### 5.2. Valoarea exploatabilă a rezultatului

Modelul TEHNE-SE este exploatabil în forma actuală ca know-how științific și metodologic. Această formă de exploatare este compatibilă cu TRL 3: modelul poate fi utilizat ca bază pentru cercetări viitoare, pentru analize sectoriale, pentru dezvoltarea unui prototip software sau pentru elaborarea unor servicii de consultanță analitică în domeniul competitivității sustenabile.

Valoarea exploatabilă rezultă din capacitatea modelului de a integra dimensiuni care sunt adesea analizate separat. În raportările corporative, indicatorii financiari și indicatorii de sustenabilitate pot apărea în secțiuni diferite, fără un mecanism comun de interpretare. În analizele de politici publice, competitivitatea poate fi evaluată la nivel macro, fără conectare directă la comportamentul firmelor. Modelul TEHNE-SE creează o punte între aceste niveluri, oferind o logică de evaluare adaptabilă.

### 5.3. Plan orientativ de maturizare către TRL 4

Trecerea la TRL 4 presupune transformarea modelului analitic într-un prototip de laborator. Aceasta nu înseamnă lansarea unei platforme comerciale, ci construirea unui demonstrator intern care să integreze funcțiile critice ale modelului într-un flux coerent. Prototipul ar trebui să permită încărcarea datelor, selectarea indicatorilor, normalizarea, calcularea scorului compozit, compararea sectorială și generarea unui raport sintetic.

Pentru TRL 4, este recomandată elaborarea unui document de cerințe funcționale, a unui dicționar de indicatori, a unui set de date de test, a unui algoritm transparent de scor și a unor rapoarte de testare. Validarea ar trebui să fie realizată în Business Innovation Lab sau într-un mediu de laborator similar, cu date controlate și cu verificarea rezultatelor de către echipa de cercetare.

Etapă	Activitate	Livrabil / output	Criteriu de succes	Nivel vizat
1	Definirea cerințelor funcționale	Specificație de prototip	Funcțiile critice sunt traduse în cerințe testabile	TRL 4
2	Standardizarea indicatorilor	Dicționar de indicatori și formule	Indicatorii au surse, unități, formule și reguli de tratare a datelor	TRL 4
3	Dezvoltarea prototipului intern	Modul de calcul și raportare	Prototipul rulează pe date de test și produce scoruri verificabile	TRL 4
4	Testare de laborator	Raport de testare internă	Rezultatele prototipului coincid cu calculele analitice documentate	TRL 4
5	Pregătirea validării externe	Protocol pilot cu beneficiari	Sunt identificați utilizatori, seturi de date reale și criterii de evaluare	TRL 5

Tabelul 8. Plan orientativ de maturizare pentru trecerea de la TRL 3 la TRL 4.

#### 5.4. Riscuri de maturizare și măsuri de reducere

Maturizarea unui model analitic către un prototip software implică riscuri specifice. Primul risc este disponibilitatea datelor: indicatorii de sustenabilitate pot fi incompleți, raportați neuniform sau dificil de comparat între sectoare. Reducerea acestui risc presupune definirea unor reguli clare de includere a datelor, tratarea valorilor lipsă și documentarea surselor. Al doilea risc este interpretabilitatea: un scor compozit poate deveni opac dacă ponderile și transformările nu sunt transparente. Măsura recomandată este documentarea explicită a algoritmului și oferirea de explicații pentru fiecare componentă a scorului.

Al treilea risc este supraextinderea nivelului TRL. Un model validat statistic poate părea pregătit pentru utilizare operațională, dar fără prototip, testare și feedback extern rămâne la TRL 3. Pentru reducerea acestui risc, fiecare etapă ulterioară trebuie asociată cu dovezi concrete: cod, test plan, rapoarte de testare, feedback de utilizator, documentație și rezultate de pilotare. Al patrulea risc este transferabilitatea între sectoare: un model care funcționează bine într-un sector poate avea nevoie de recalibrare în alt sector. Soluția este introducerea unei componente explicite de calibrare sectorială.

#### 5.5. Concluzie generală

Modelul conceptual și analitic de evaluare a performanței globale și a sustenabilității companiilor, dezvoltat în cadrul proiectului component TEHNE-SE, îndeplinește criteriile de maturitate tehnologică pentru TRL 3. Raportul demonstrează că există o bază științifică documentată, un concept formulat și o dovadă analitică a funcțiilor critice prin metode statistice, econometrice și aplicații sectoriale limitate.

În același timp, raportul delimitează strict nivelul atins. Rezultatul nu este un prototip software integrat, nu este validat cu utilizatori finali și nu este demonstrat în mediu relevant sau operațional. Tocmai această delimitare întărește credibilitatea evaluării: TRL 3 este revendicat ca nivel demonstrat, iar TRL 4–6 sunt prezentate ca direcții de maturizare ulterioară.

Prin urmare, la finalul proiectului TEHNE-SE, rezultatul analizat poate fi considerat exploatabil ca know-how științific, transferabil metodologic și pregătit pentru o etapă următoare de prototipare. Dezvoltarea unui demonstrator de laborator, standardizarea indicatorilor și testarea în Business Innovation Lab constituie pașii naturali pentru creșterea nivelului de maturitate tehnologică.

## Bibliografie și surse documentare

Benjamini, Y.; Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing.

BRIDGE2HE. Guiding notes to use the TRL self-assessment tool. H2020-101005071.

DOE Office of Environmental Management. Technology Readiness Assessment (TRA) / Technology Maturation Plan (TMP) Process Guide. March 2008.

ECSS-E-AS-11C. Space engineering – Adoption Notice of ISO 16290, Space systems – Definition of the Technology Readiness Levels and their criteria of assessment. 1 October 2014.

Georgescu, M.R.; Lungu, A.E.; Bogoslov, I.A.; Stoica, E.A. (2023). European Efficiency or Inefficiency in Economic Growth Through Digital Transformation. *Scientific Annals of Economics and Business*. DOI: 10.47743/saeb-2023-0010.

Herciu, M.; Ogorean, C.; Mihaiu, D.; Serban, R.; Aivaz, K.A.; Tichindelean, M. (2023). Improving business models for the circular economy: developing a framework for circular fashion. *Transformations in Business and Economics*.

Horobeț, A.; Mnohoghitnei, I.; Dumitrescu, D.G.; Curea, S.C.; Belașcu, L. (2022). An empirical assessment of the financial development – environmental quality nexus in the European Union. *Amfiteatru Economic*. DOI: 10.24818/EA/2022/61/613.

Horobeț, A.; Tudor, C.D.; Belașcu, L.; Dumitrescu, D.G. (2022). The role of distinct electricity sources on pollution abatement: Evidence from a wide global panel. *Frontiers in Environmental Science*. DOI: 10.3389/fenvs.2022.996515.

Dumitrescu, D.G.; Horobeț, A.; Tudor, C.D.; Belașcu, L. (2023). Renewables and decarbonisation: implications for energy policy in the European Union. *Amfiteatru Economic*. DOI: 10.24818/EA/2023/63/345.

Nate, S.; Mara, D.; Croitoru, A.; Morândau, F.; Stavytskyy, A.; Kharlamova, G. (2022). The Interest Level Assessment in Attending Training Programs among Romanian Teachers. *Econometric Approach. Sustainability*. DOI: 10.3390/su142416335.

Ogorean, C.; Herciu, M. (2022). Fostering innovation in Romania. Insights from the smart specialization strategies. *Studies in Business and Economics*. DOI: 10.2478/sbe-2022-0041.

Ogorean, C.; Herciu, M. (2022). Sustainability performance and reporting – a strategic issue for electric car automakers. *Studies in Business and Economics*. DOI: 10.2478/sbe-2022-0061.

Ogorean, C. (2023). Interplays Between Artificial Intelligence and Sustainability in Business/Management. A Bibliometric analysis. *Studies in Business and Economics*. DOI: 10.2478/sbe-2023-0041.

Șerban, R.-A.; Mihaiu, D.M.; Țichindelean, M.; Ogorean, C.; Herciu, M. (2023). Factors of Sustainable Competitiveness at Company Level: A Comparison of Four Global Economic Sectors. *Journal of Business Economics and Management*. DOI: 10.3846/jbem.2023.19478.

Șerban, R.A.; Mihaiu, D.M.; Herciu, M.; Ogorean, C. (2023). A sectoral-based approach to the link between financial performance and sustainability. *Studies in Business and Economics*. DOI: 10.2478/sbe-2023-0020.

Ogorean, C.; Herciu, M.; Tichindelean, M. (2024). Integrating Sustainability and Digitalization in Business Model Innovation. A Bibliometric Study. *Studies in Business and Economics*, 19(2), 307-331.

Ogrean, C.; Herciu, M. (2022). Exploring Romania's Digital Gap - What is Under the Water, If this is Only the Tip of the Iceberg? *Studies in Business and Economics*, 17(1), 312-322.

Raport final – Proiect component 3: Dezvoltarea de tehnologii noi și emergente în contextul stimulării cercetării de excelență în ULBS – Științe economice (TEHNE-SE), 12 iunie 2024.

## **Anexă. Declarație de încadrare TRL**

În baza informațiilor documentate, rezultatul exploatabil „Model conceptual și analitic de evaluare a performanței globale și a sustenabilității companiilor” este încadrat la TRL 3 – dovadă analitică și experimentală a conceptului. Încadrarea se bazează pe existența unei fundamentări științifice, pe formularea unei aplicații analitice și pe validarea ipotezelor prin metode statistice și econometrice aplicate pe date reale.

Nu se revendică TRL 4 sau niveluri superioare, deoarece nu există un prototip software integrat validat în laborator, nu există validare într-un mediu relevant cu utilizatori externi și nu există demonstrare operațională. Pentru creșterea nivelului TRL sunt necesare prototipare, testare de laborator, standardizarea indicatorilor, definirea fluxurilor de date și validare pilot.

12 iunie 2024

Prof. univ. dr. Mihaela Herciu