

REZILIENȚA INGINEREASCĂ ÎN ERA COMPLEXITĂȚII

Profesor universitar emerit Șerban RAICU

Universitatea Națională de Științe și Tehnologie Politehnica București, România

REZUMAT. Conceptul, inerent holistic, de reziliență a diferitelor sisteme este important și frecvent prezent în literatura de profil a ultimilor ani. Clarificarea semnificațiilor tehnice și a fundamentelor conceptului de reziliență este necesară. Această lucrare definește reziliența din diferite perspective și oferă un cadru conceptual pentru înțelegerea și analiza efectelor perturbațiilor. Articolul se concentrează pe conceptul relativ nou de Reziliență Inginerească (RI). Pe măsură ce sistemele continuă să crească în amploare și complexitate, se amplifică provocările privind siguranța și managementul riscurilor. RI s-a impus ca o nouă paradigmă de management al siguranței, compatibilă cu natura sistemelor socio-tehnice complexe. Lucrarea sugerează și o tratare metodologică adecvată estimării rezilienței rețelelor de infrastructură destinate transferului de fluxuri.

Cuvinte cheie: reziliență, reziliență inginerescă, sisteme socio-tehnice complexe, management al riscului - Safety I, Safety II, reziliență rețele.

ABSTRACT. The concept of system resilience, inherently holistic, is important and popular over the last few years. Clarifying the technical meanings and foundations of the concept of resilience would appear to be necessary. This paper defines resilience from different perspectives, provides a conceptual framework for understanding and analyzing disruptions. This article focuses on the rather new concept of Resilience Engineering (RE). As systems continue to grow in size and complexity, they pose increasingly greater safety and risk management challenges. RE has established itself as a new safety management paradigm, compatible with the nature of complex socio-technical systems. The paper also suggests an appropriate methodological treatment for estimating the resilience of infrastructure networks intended for flow transfer.

Keywords: resilience, engineering resilience, complex socio-technical systems, risk management - Safety I, Safety II, network resilience.

1. REZILIENȚA - CONCEPT PLURIDISCIPLINAR ȘI POLISEMIC

Întâlnit în numeroase lucrări din domeniul psihologiei, ecologiei, sociologiei, ingineriei etc., conceptul de reziliență este pluridisciplinar și polisemic (reziliență emoțională/mentală, reziliență ecologică, reziliență inginerescă, reziliență socio-ecologică și alte tipuri de reziliență disciplinară, alături de reziliența sistemică sau vulnerabilitatea reziliențială) cu semnificații multiple și uneori contradictorii.

Cu toate sursele posibile de ambiguități, reziliența este acum cvasiunanim acceptată ca o nouă paradigmă. A fi rezilient presupune a fi: rezistent, flexibil și adaptabil, redundant, diversificat și eficace, autonom într-un mediu colaborativ, capabil de a învăța din trecut și de a face față incertitudinilor viitoare.

Sub aspectul primordialității (făcând abstracție de utilizarea în studiul rezistenței la șoc a materialelor, adică cu o altă semnificație, restrânsă, particulară), conceptul actual, extins, de reziliență este revendicat, cu deplin temei, de ecologie [8, 22], adică de comportarea materiei vii care își asigură supraviețuirea și reproducerea chiar atunci când este confruntată cu

evenimente adverse, de o anume amploare, care iar putea afecta funcționarea normală. Reziliența ecologică este preocupată de cercetarea acestei capacități miraculoase a diversității materiei vii, care își conservă proprietățile și dacă este supusă unor variate acțiuni destabilizatoare provenite din mediul de viață. Tainele acestui comportament sunt numai parțial deslușite de achizițiile actuale ale cunoașterii. Dacă pentru oameni și animale valențele atribuite rezilienței sunt în bună parte elucidate (ereditate, procese de reglare-autoreglare, homeostazie etc), atunci, în cazul plantelor, dar și al insectelor sau al viețuitoarelor microscopice (fungi, viruși, bacterii) fascinațiile comportamentale ale acestora în condiții neobișnuite sunt motivante pentru continuarea cercetărilor. Oamenii, conștienți de faptul că aceste sisteme naturale dăinuesc într-un anume echilibru dinamic miraculos, de sute de milioane de ani, au căutat să le înțeleagă mecanismele, să învețe de la ele.

Asimilările pentru individ, colectivitate și societate în ansamblu, referitoare la comportarea materiei vii în condițiile evenimentelor care tind să îi perturbe funcționarea normală le regăsim în bună parte și parcă tot mai frecvent reflectate în conceptele proiectării sistemelor antropice. Pe măsură ce omenirea, a

REZILIENȚA INGINEREASCĂ

acumulat cunoaștere științifică și a înregistrat progrese tehnologice declanșate, la început de secol XIX, de revoluția mașinistă, a realizat sisteme tehnice tot mai complexe, mai sofisticate și implicit mai scumpe. Preocuparea conservării și asigurării funcționării normale a acestor sisteme tehnice, în condițiile evenimentelor perturbatoare, exogene sau endogene, calificate ca riscuri sau incertitudini, s-a acutizat. În ultima jumătate de veac, conceptele de reziliență inginerescă, organizațională, sistemică etc., (în funcție de obiectivele urmărite), toate inspirate de reziliența ecologică, au proliferat. Cu toate acestea, nu se poate afirma că pentru conceptul de reziliență s-ar fi consolidat ca o teorie unitară. De aceea, literatură de profil consemnează încă o varietate de definiții chiar pentru un unul și același dintre tipurile de reziliențe vehiculate, deși în prezența diferențelor specifice și a genului proximal o definiție unitară, lipsită de echivoc, ar fi trebuit deja să se afirme.

Sunt suficiente câteva exemple pentru a ilustra diversitatea, atât a definițiilor cât și a domeniilor de utilizare a conceptului de reziliență, dar și pentru a desprinde o anume convergență către o definiție unitară:

– Caracteristica unui sistem care îi permite să compenseze perturbațiile făcând posibilă funcționarea în continuare până când infrastructura este grav avariata sau distrusă [17];

– Capacitatea sistemului de a-și păstra nivelul de serviciu (normal) sau de a reveni la acest nivel într-un interval de timp limitat [7];

– Capacitatea sistemului de a se adapta la condiții de funcționare variabile și neprevăzute, dar fără distrugerii catastrofale [14];

– Capacitatea sistemului de a absorbi consecințele perturbațiilor, de a reduce impactul acestor perturbații și de a menține transferul fluxurilor [8, 22];

– Capacitatea unei rețele de a menține sau de a restabili funcționarea acceptabilă în ciuda perturbațiilor [6].

2. REZILIENȚA INGINEREASCĂ

Pentru că inginerul este implicat în conceperea, realizarea, funcționarea și mentenanța sistemelor tehnice interesul pentru reziliență inginerescă, cu necesarele extensii la reziliența sistemică, (adevătată complexității sistemelor tehnice actuale) și la reziliența socio-tehnică (corespunzătoare interacțiunilor diversificate dintre sistemele tehnice și mediul social și natural), este tot mai extinsă.

Făcând abstracție de elementele specifice ale reziliențelor menționate anterior, se detașează ideea că fiecare este un concept complex, multifactorial, multinivel și multidimensional, asociat cu principii

cheie (anticiparea, răspunsul, învățarea și monitorizarea proactivă) subordonate asigurării succesului misiunii propuse [11].

Fiecare dintre etapele marcante ale evoluției în timp a conceptului de reziliență inginerescă poate fi exemplificată prin evenimente larg mediatizate pentru consecințele negative de amploare. Astfel, pot fi disociate: *era tehnologică* (anterioară anilor 1960), caracterizată, de exemplu, prin catastrofele repetate ale avioanelor comerciale de Havilland Comet, cu cauze târziu identificate, (fenomene ale oboselii materialelor, conjugate cu erori de proiectare care au produs concentrări de eforturi fatale pentru unele componente), *era erorilor umane* (perioada 1960-1980), caracterizată prin posibile erori ale operatorilor umani, marcată de cel mai mare accident nuclear din istoria SUA, din fericire, fără victime umane (centrala Three Mile Island), *era interacțiunilor socio-tehnice* (1980-2000), în care interpretările eronate ale informațiilor echipamentelor de control de care dispunea operatorul și acțiunile de comandă neadecvate întreprinse au fost sursa unor accidente grave (Cernobil, naveta Challenger) și cea de a patra, *era rezilienței* (începând cu primul deceniu al actualului mileniu) care se remarcă prin vulnerabilități majore în fața riscurilor și incertitudinilor (tragedia de la World Trade Center, uraganul Katrina și urmările Cutremurului Tōhoku din Japonia) (fig. 2.1).

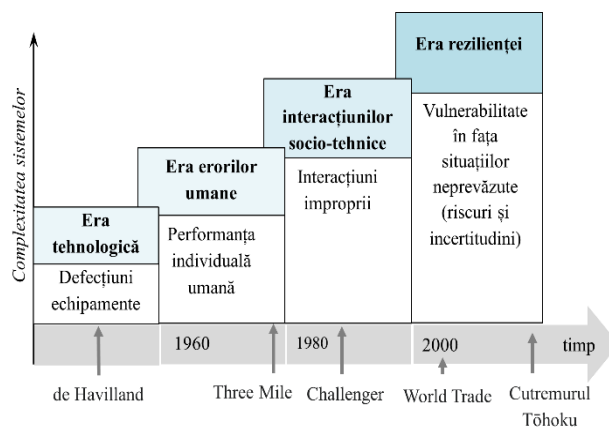


Fig. 2.1. Evoluția conceptului de reziliență inginerescă în corelație cu dinamica complexității sistemelor socio-tehnice antrenate de progresul tehnologic (adaptare după [4]).

Desigur, pot fi adăugate multe alte exemplificări ale dinamicii progresului tehnologic care au condus la creșteri ale complexității sistemelor tehnice, concomitente cu sporirea expunerii la riscuri tot mai ridicate și mai diversificate (economice, sociale, tehnice, politice, umane, organizaționale).

Astăzi, când vine vorba de sisteme și structuri complexe, precum transportul și traficul, aeronautica, telecomunicațiile, generarea de energie, asistența

medicală și altele, accidentele tragice și eșecurile catastrofale au devenit un fapt de viață în care eroarea umană este cea, de regulă, considerată inițial responsabilă [15, 22]. Cu toate acestea, cercetările au arătat, în mod repetat, că mai frecvent decât eroarea umană, cauzele trebuie atribuite factorilor organizaționali care pot crea condiții care invită la dezastru. Suficientă o privire retrospectivă la accidentul navei spațiale Columbia din 2003. Urmărirea asiduă, obsesivă, a lui „mai bine, mai ieftin, mai rapid” a determinat managementul să ia decizii care au ignorat marjele de siguranță fără să realizeze că riscurile au crescut dramatic [1, 5, 25].

Reziliența inginerescă este, cel mai adesea, definită în funcție de următoarele patru proprietăți (4R) [24]:

– Robustețe: rezistența sau capacitatea elementelor, sistemelor sau a altor entități de analiză de a rezista la un anumit nivel de stres sau solicitare fără a suferi degradarea sau pierderea funcției;

– Redundanță: măsura în care există elemente, sisteme sau alte entități de analiză care sunt substituibile, adică capabile să satisfacă cerințele funcționale în cazul întreruperii, degradării sau pierderii funcționalității;

– Refacere: capacitatea de a identifica probleme, de a stabili priorități și de a mobiliza resurse atunci când există condiții care amenință să perturbe un element, sistem sau altă entitate de analiză;

– Reacție: capacitatea de a îndeplini prioritățile și de a atinge obiectivele în timp util pentru a limita pierderile și a evita perturbările viitoare.

O ilustrare grafică a acestor proprietăți ale rezilienței ingineresti o găsim în triunghiul de reziliență din figura 2.2 în care timpul și respectiv, funcționalitatea sistemului sunt reprezentate în cele două axe. Funcționalitatea sistemului se degradează după criză, dar își revine treptat. Recuperarea funcționalității este rapidă pentru un sistem cu o reziliență ridicată și mai lentă pentru cel cu o rezistență scăzută.

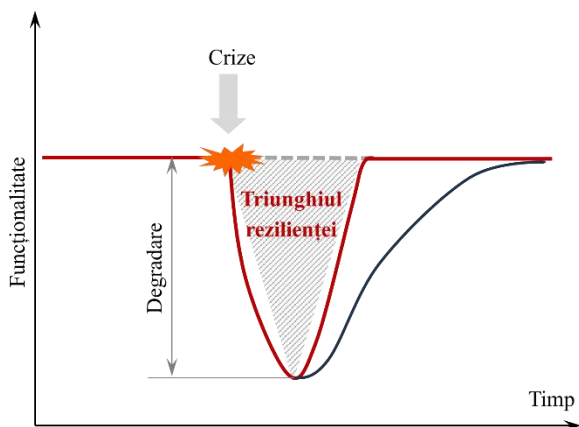


Fig. 2.2. Posibila pierdere temporară a funcționalității unui obiect/sistem.

Triunghiul rezilienței exprimă zona de degradare a calității funcționalității. În raport cu natura performanțelor, pozitive (exemplu, fluiditatea traficului pe unul din sensurile de circulație a unei autostrăzi) sau negative (mărimea șirului de autovehicule blocate de un ambuteiaj pe o autostradă) și de durata producerii degradării, respectiv de cea de restabilire a funcționalității triunghiurile rezilienței pot fi caracterizate sintetic prin câțiva indicatori, definiți pentru performanțele pozitive (fig. 2.3) ale comportării sistemului:

- Gradientul degradării

$$R_d = \frac{p_0 - p_{min}}{t_r - t_c} \quad (2.1)$$

- Gradientul recuperării

$$R_r = \frac{p_0' - p_{min}}{t_0' - t_r} \quad (2.2)$$

- Durata recuperării

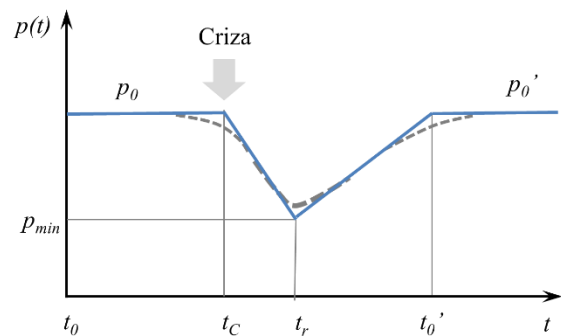
$$\theta_r = t_0' - t_r \quad (2.3)$$

- Indici de recuperare

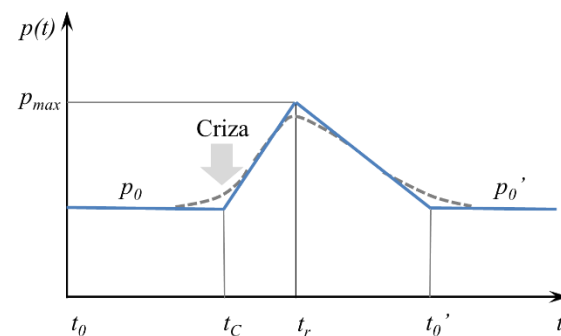
$$i_r = \frac{t_0' - t_c}{t_r - t_c} \quad (2.3)$$

sau

$$I_r = \frac{\int_{t_c}^{t_0'} p(t) dt}{\int_{t_0}^T p(t) dt} \quad (2.4)$$



a) performanță pozitivă ($p_0' < p_0$; $p_0' \geq p_0^*$)



b) performanță negativă ($p_0' \leq p_0^*$; $p_0' > p_0$)

Fig. 2.3. Elementele caracteristice ale triunghiului rezilienței.

Acestor caracterizări cantitative ale triunghiului rezilienței trebuie să li se adauge și măsurători de natură financiară (mai dificil de estimat) care să exprime eficiența, ca raport dintre câștigul de siguranță în funcționarea unui anumit sistem tehnico-organizatoric, obținut prin introducerea surplusului de redundanță în sistem și valoarea resurselor investite.

3. O NOUĂ CULTURĂ A RISCULUI

Cea mai importantă diferență dintre ingineria rezilienței și practicile comune ale siguranței sistemelor la risc constă în aceea că ingineria rezilienței presupune monitorizarea continuă a funcționării, adică a performanței de succes de zi cu zi. Este urmarea adoptării conceptului de „reziliență inginerască” în sfera siguranței în funcționare. În opoziție cu managementul clasic al riscului, care în mod tradițional, trimitea la norme și programe de acțiune în raport cu fiecare cauză de disfuncționalitate identificată, reziliența inginerască aduce în prim plan caracteristicile unui sistem care este capabil, în măsura definită, să respecte condițiile de funcționare chiar și atunci când sunt prezente schimbări de o anumită amploare în mediul cu care interacționează.

Viziunea tradițională a cauzalității liniare este înlocuită cu una mai complexă, integratoare-cauzalități multiple, combinate, complexe, care generează posibile evenimente perturbatoare, dar fără cauzalități identificabile.

Reziliența, în managementul riscului, apare ca o nouă paradigmă, a complexității care apelează la componente particulare multiplu articulate (adaptare, persistență, învățare, stabilitate, rezistență, recuperare etc.)

Distincția dintre cele două concepte de siguranță, numite Safety-I și Safety-II [10], trebuie remarcată.

Safety-I se concentrează pe identificarea incidentelor și accidentelor punând accent pe eliminarea erorilor și abaterilor de la norme pentru a evita eșecurile. Acest model tradițional (al anilor '80 - '90) vizează reducerea riscurilor prin analizarea evenimentelor negative și implementarea măsurilor de siguranță.

În schimb, Safety-II tratează siguranța prin înțelegerea modurilor în care sistemul funcționează normal și cum prin acțiuni adecvate se adaptează pentru a face față schimbărilor (situațiilor de risc și incertitudine). Cu un câștig de popularitate după anii 2000 (era rezilienței sistemelor complexe), Safety-II se concentrează pe aspectele pozitive ale performanței, explorând modul în care oamenii,

componente ale sistemului tehnico-organizatoric, cu diferite competențe și atribuții, gestionează și se adaptează cu succes schimbărilor endogene și exogene.

În concluzie, dacă Safety-I se concentrează pe perspectiva asupra erorilor și a succesului, adică pe identificarea și eliminarea problemelor, atunci Safety-II are ca obiectiv înțelegerea modului în care oamenii fac lucrurile să funcționeze în mod corect și eficace chiar în fața diverselor provocări, adică promovează atitudini proactive și înțelegere a capacității de operare în orice condiții.

Pentru a practica cu succes un management al riscului care presupune o tratare holistică a ansamblului condițiilor care în viitor ar putea perturba funcționarea normală, fără a-și propune explicații bazate pe un singur factor sau dimensiune (ca în Safety-I), un sistem rezilient trebuie să fie capabil:

- să reacționeze la variabilitate, perturbații și oportunități;
- să monitorizeze ceea ce se întâmplă și să recunoască dacă ceva se schimbă atât de mult încât poate afecta capacitatea sistemului de a-și îndeplini funcțiile atribuite;
- să învețe lecții adecvate din experiențe adecvate;
- să anticipeze evoluțiile viitoare.

Abilitățile sunt dependente reciproc și ponderea fiecăreia depinde de natura operațiilor și de mediul specific de operare (de producție, de afaceri, de reglementare, de mediu, social etc.). Definite prin intermediul funcțiilor subadiacente și constitutive abilitățile specificate pot fi dezvoltate în grade diferite pentru o anumită organizație. Evaluarea modului în care fiecare abilitate servește la un moment dat conservării funcționării sistemului socio-tehnic în condiții adverse este sugerat de o Grila de analiză a rezilienței (RAG) [9]. Aceeași evaluare poate fi folosită pentru a propune modalități concrete de dezvoltare a sub-funcțiilor specifice ale unei abilități – fără a uita însă că abilitățile sunt reciproc dependente.

Prin urmare, potențialul de dezvoltare a celor patru abilități oferă o alternativă utilă la conservarea funcționalității prin reziliență. Spre deosebire de cultura managementul clasic al riscului care vizează un anumit nivel al funcționalității pentru fiecare dintre riscurile analizate, ingineria rezilienței, în manieră holistică, își propune să reflecte sintetic cât de bine funcționează sistemul în timp. Reziliența nu caracterizează o stare sau o condiție, ci un proces mai degrabă continuu decât discret. Este vorba mai exact de menținerea unui echilibru între cele patru abilități adecvate unui anumit tip de activitate și a unor

REZILIENȚA INGINEREASCĂ ÎN ERA COMPLEXITĂȚII

anumite situații de funcționare. De exemplu, dacă un sistem tehnico-organizațional se concentrează în primul rând pe răspunsul la gestionarea situațiilor neprevăzute sau dificile și neglijează monitorizarea proactivă atunci nu mai poate fi considerat rezilient pentru că neglijarea monitorizării va crește probabilitatea ca performanțele să-i fie afectate de alte perturbații neprevăzute care îi pot reduce performanța și/sau periclita siguranța.

4. REZILIENȚA REȚELELOR

Considerațiile care urmează sunt orientate pe reziliența rețelelor tehnice destinate transferului de fluxuri (alimentare cu apă, cu energie electrică, cu gaz, telecomunicații, transport și trafic, evacuare ape uzate și pluviale), care, precum și alte rețele ale societății (de sănătate, financiare etc), sunt vitale pentru funcționarea unui sistem teritorial. De aceea, sunt considerate infrastructuri critice ale societății. Fiecare rețea este un sistem, iar ansamblul lor este un sistem de sisteme (un agregat de sisteme, un sistem tehnic mare sau un sistem complex) cu intercondiționări multiple cu sistemul teritorial. Atât rețelele, cât și sistemul teritorial sunt confruntate cu riscuri și incertitudini variate - naturale, economice și financiare, tehnice, sociale, politice, umane, organizaționale [20].

Comportarea fiecărei rețele, în spiritul lui Safety – II, trebuie tratată în raport cu reziliența la ansamblul evenimentelor perturbatoare ale funcționării normale, în manieră unitară, holistică, și nu în raport cu reziliența la un anumit eveniment perturbator. Adică, prin raportare la modul în care rețeaua este capabilă să își conserve misiunea (transferul de fluxuri energetice, materiale, informaționale) sau să

recupereze cât mai rapid consecințele negative provocate sistemului teritorial (sub aspect tehnic, economic, social, ambiental) din cauza degradărilor funcțiilor rețelei-indiferent de natura acțiunilor destabilizatoare care le-au produs.

Figurile 4.1. și 4.2. exemplifică două aspecte esențiale ale comportării la risc a unei rețele de transport/trafic care, în general, în mod succesiv, înregistrează degradări materiale, structurale și funcționale [20].

Primul se referă la capacitatea rețelei de a-și exercita rolul de a transfera fluxuri chiar atunci când unele funcțiuni (proprietăți) au fost afectate. Rețeaua, în limitele capacităților de rezistență și absorbție, răspunde perturbațiilor continuându-și misiunea în folosul sistemului teritorial pe care îl servește.

Al doilea vizează capacitatea rețelei de a recupera degradările produse de perturbații pentru a reveni la funcționarea normală (inițială sau îmbunătățită), prin restaurarea componentelor care și-au diminuat parțial sau total funcționalitatea.

Cele două aspecte constituie confirmări ale celor 4R (robustețe, redundanță, reacție, refacere), desemnate ca proprietăți esențiale ale rezilienței.

Reziliența rețelei de trafic rutier urban la impacturi materiale, structurale și funcționale, căreia îi corespunde reprezentarea din figura 4.2., se datorează redundanței structurale care este atribuită rețelei (fiabilitatea funcțională conferită prin proiectarea și realizarea sistemului rutier - pentru capacitatea de rezistență, respectiv, proprietăților de conectivitate și nodalitate - pentru capacitatea de absorbție, dar fără a omite, pentru ambele capacități - rezistență și absorbție - rolul algoritmilor adaptivi ai rețelei și condiționările de amploarea și durata evenimentelor perturbatoare).

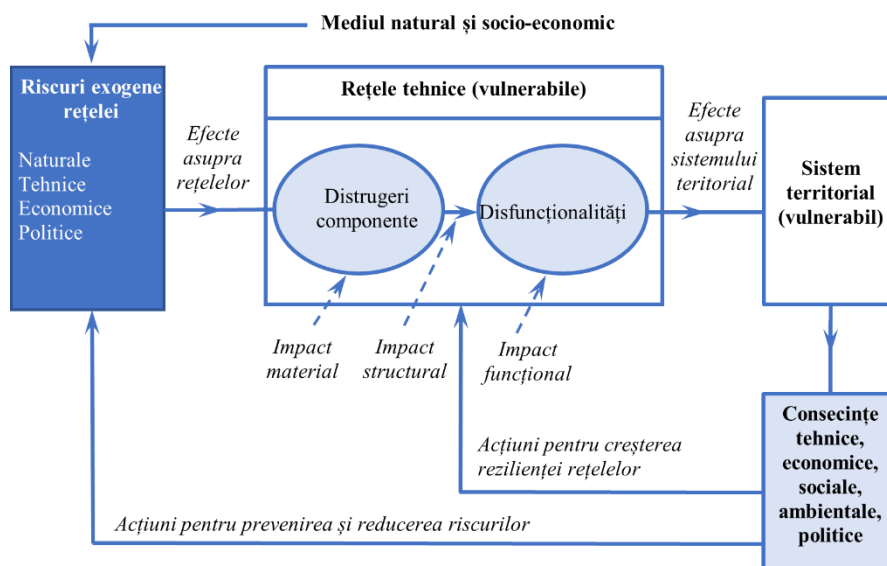


Fig. 4.1. Riscuri și consecințe pentru rețea și sistem teritorial.

REZILIENȚA INGINEREASCĂ

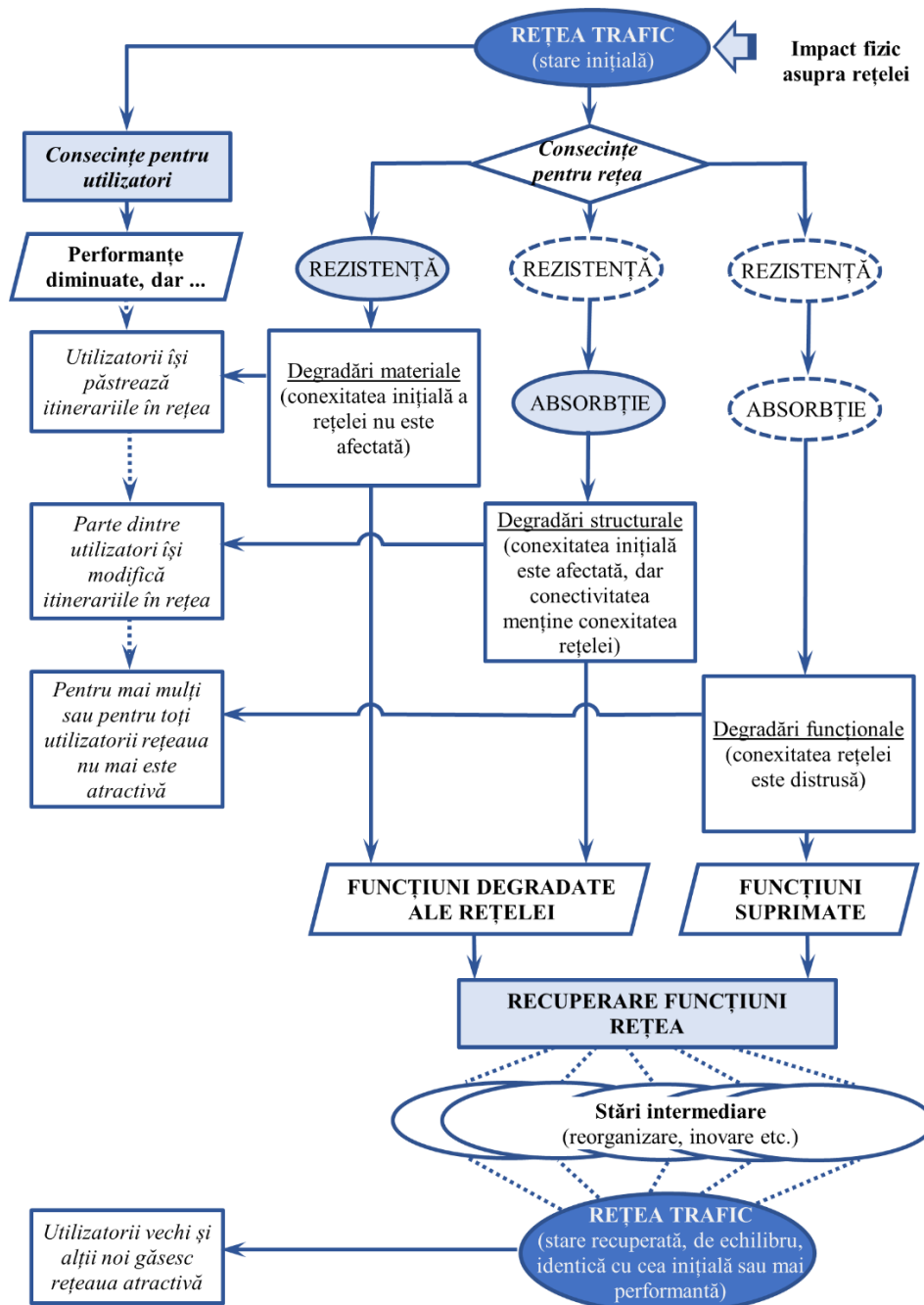


Fig. 4.2. Riscuri și consecințe pentru rețea și sistem teritorial.

Sub aspect formal, reziliența R , a rețelei, ar putea fi sintetizată printr-o funcție implicită de tipul

$$R = f(N, L, A, E), \quad (4.1)$$

în care, N este numărul nodurilor rețelei, L - numărul legăturilor (arcelor arcelor grafului asociat rețelei), A - algoritmi adaptivi ai funcționării rețelei și E - natura și amploarea evenimentelor perturbatoare.

Din punct de vedere social și ecologic, atunci când rețelele pentru transferul de fluxuri ale unui sistem teritorial sunt independente operațional și managerial, când sunt dispersate geografic, când au caracter evolutiv sau când sunt structurate ierarhic se impune instituirea unui management proactiv unitar. Tratarea ca un sistem de sisteme este necesară pentru

a relevă intercondiționările dintre sistemele aferente fiecărui tip de rețea [11, 15].

În reprezentarea prin grafurile aferente fiecărei rețele a sistemului de sisteme a rețelelor (fig. 4.3), se remarcă conexiuni dintre sistemele de la diferitele niveluri în care fost plasată o anumite rețea.

Aceste legături semnifică capacități suplimentare ale sistemului de sisteme de a-și conserva starea în cazul evenimentelor perturbatoare. Pe lângă redundanța structurală intrinsecă a fiecărei rețele, în sistemul de sisteme se evidențiază și o redundanță funcțională datorată conexiunilor dintre rețele. O rețea poate să preia unele funcțiuni în folosul teritoriului ale altei rețele afectate de perturbații. De

REZILIENȚA INGINEREASCĂ ÎN ERA COMPLEXITĂȚII

exemplu, rețeaua electrică poate să preia din funcțiile rețelei de gaze sau rețeaua de telecomunicații poate să preia din funcțiile rețelei de trafic. Această substituibilitate, fie ea și parțială, a rețelelor din cadrul sistemului de sisteme al rețelelor este benefică pentru creșterea rezilienței. Dar, trebuie să remarcăm importanța unui management proactiv al sistemului de sisteme care trebuie să evite eventualele vulnerabilități introduse de transferul de sarcini. Prin suprasarcinile apărute, ca urmare a preluării temporare a sarcinilor altei/altor rețele este posibilă propagarea perturbației înregistrată de o rețea la alta/altele a/ale sistemul reunit (așa zisul „efect de domino”) [13, 14].

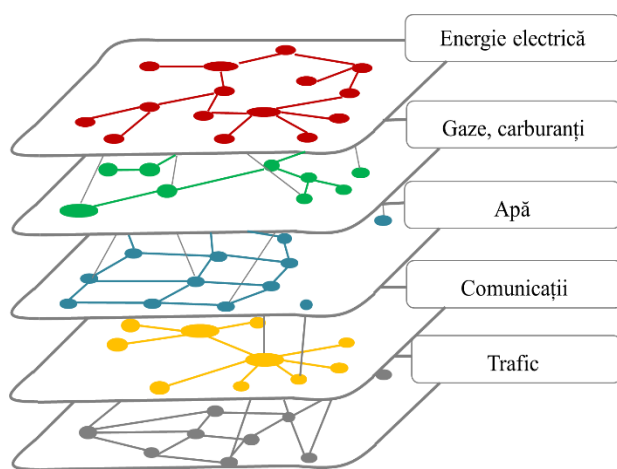


Fig. 4.3. Intercorelații între rețelele destinate transferului de fluxuri.

5. CONCLUZII

Ingineria rezilienței este preocupată de proiectarea sistemelor care să fie capabile să evite accidentele prin anticipare, să supraviețuiască perturbațiilor prin recuperarea și eventuala creștere a funcțiilor, ca o consecință a unui proces specific de adaptare.

Este inadecvat ca în studiul sistemelor socio-tehnice complexe, să se apeleze, ca în trecut, la principiul descompunerii. Au fost dezvăluite fenomene noi, caracteristice sistemelor complexe neliniare (haosul, fractalul, legile puterii,...). Probabilitatea unor evenimente extrem de rare în sistemele complexe neliniare, care includ și oameni, este mult mai mare decât cea estimată de modelele sistemului liniar și distribuția normală (Lebăda Neagră).

Reziliența inginerescă propune o viziune sistemică a accidentelor, conform căreia accidentele sunt cauzate de o combinație neliniară a variabilității performanței funcțiilor sistemului, mai degrabă decât de o combinație liniară a defecțiunilor componentelor.

Reziliența inginerescă este un concept proactiv care relevă capacitatea sistemelor tehnice de prevenție

a deteriorării în cazul apariției evenimentelor perturbatoare, atenuarea pierderilor în timpul evenimentelor și îmbunătățirea capacității de recuperare. Spre deosebire de managementul convențional al riscului urmărește suprimarea riscurilor (sub o anumite limită).

Posibil, să se impună un nou domeniu academic pe care l-am putea numi ingineria rezilienței, pentru a concepe tehnici adecvate sistemelor tehnico-organizaționale complexe în vederea asigurării performanțelor în condiții normale și anormale de funcționare cu:

– *Eventuale domenii de cercetare* - definiiri conceptuale; conexiuni; management al siguranței; evaluarea riscurilor și incertitudinilor; analiză accidente; acțiuni proactive pentru creșterea rezilienței.

– *Aplicabilitate* - aeronautică și control trafic; industrie (chimică și petrochimică, cu precădere); centrale nucleare; construcții civile și industriale; rețele infrastructuri tehnice ale societății.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Ahern, J., *From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world*, Landscape and Urban Planning 100 (2011) 341–343.
- [2] Forcellini, D. *The Role of Redundancy of Infrastructures on the Seismic Resilience (SR) of Sustainable Communities*, Sustainability 2023, 15, 11849. <https://doi.org/10.3390/su151511849>
- [3] Freckleton, D. et al. *Evaluation of Resiliency of Transportation Networks After Disasters*, Transportation Research Record, 2012, vol. 2284, pag. 109-116
- [4] Furuta, K. *Resilience Engineering. A New Horizon for Systems Safety*, in An, J. et al. Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident Toward Social-Scientific Literacy and Engineering Resilience, pag. 435-455 Ashgate, 2014.
- [5] Galizia, A. et al., *Markers and patterns of organizational resilience for risk analysis*, 13th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, HMS'2016, Aug.2016, Kyoto, Japan.
- [6] Gonzalez, A.D., et al. *The Interdependent Network Design Problem for Optimal Infrastructure System Restoration*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015, vol. 31 (5), pag. 334-350.
- [7] Heaslip, K., et al. *A Method to Evaluate Transportation Resiliency for Regional Networks*, In 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2009, Washington D.C.
- [8] Holling, C.S., *Resilience and stability of ecological systems*, Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, vol. 4, pag.1-23.
- [9] Hollnagel, E. *How Resilient Is Your Organisation? An Introduction to the Resilience Analysis Grid (RAG)*, Sustainable Transformation: Building a Resilient Organization, May 2010, Toronto, Canada.
- [10] Hollnagel, E. *Safety-I and Safety-II, the past and future of safety management*. August 2015; Cognition Technology and Work 17(3):461-464. DOI:10.1007/s10111
- [11] Hollnagel, E. et al. *Resilience Engineering. Concepts and Precepts*, CRC Press, 2006

REZILIENȚA INGINEREASCĂ

- [12] Hughes, J.F., Healy, K. *Measuring the resilience of transport infrastructure*, NZ Transport Agency research 2014, Report 546
- [13] Katopodis, T. *EU-CIRCLE methodological approach for assessing the resilience of the interconnected critical infrastructures of the virtual city scenario to climate*, Energetika, July 2018
- [14] Lhomme, S., et al. *Les réseaux techniques face aux inondations ou comment devenir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine*, Bulletin de l'Association de géographes français. Geographies, 2010, pag.487-502
- [15] Mattsson, L.G., Jenelius, E. *Vulnerability and resilience of transport systems. A discussion of recent research*, Transportation Research Part A, vol. 81, 2015, pag. 16–34.
- [16] Nemeth, C.P., Hollnagel, E. *Resilience Engineering in Practice*, vol. 2, Becoming Resilient, Ashgate, 2014 Organization, May 2010, Toronto, Canada.
- [17] Pitolakis, K., et al. *Systemic Vulnerability and Risk Assessment of Transportation Systems Under Natural Hazards Towards More Resilient and Robust Infrastructures*, Transportation Research Procedia, 2016, vol. 14, pag. 1335-1344
- [18] Provan, D. et al. *Safety II professionals: How resilience engineering can transform safety practice*, Reliability Engineering and System 195 (2020) 106740
- [19] Provitolo, D. Structural and dynamical complexities of risk and catastrophe systems: an approach by System Dynamics Modelling, in Bertelle C., Duchamp G.H., Kadri-Dahmani H. (Eds), *Complex Systems and Self-organization Modelling. Understanding Complex Systems*, Springer, Berlin-Heidelberg, 2009. pag. 129-138.
- [20] Raicu, Ș., Costescu, D., *Mobilitate. Infrastructuri de trafic*, Ed. AGIR, București, 2020
- [21] Raicu, Ș., et al. *Resilience of Urban Technical Networks*, Entropy, 2019, 21, 886, pag. 1-16.
- [22] Righi, A.W., et al. *A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal*, Reliability Engineering & System Safety, 2015, vol. 141, pag. 142-152.
- [23] Ta, C., et al. *Structuring a Definition of Resilience for the Freight Transportation System*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, vol. 2097 (1), pag. 19-25
- [24] Woods, D., *Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering*, Reliability Engineering System Safety, April 2015
- [25] Woods, D., *Creating Foresight: How Resilience Engineering Can Transform NASA's Approach to Risk Decision Making*, Testimony on the Future of NASA for Committee on Commerce, Science and Transportation, 2003.